



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÁREA DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER Nº 18010020

DISEÑO DE UNA HERRAMIENTA PARA EVALUAR LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN SISTEMA DE COMPRESIÓN

D. LLANOS VEGA, MARCOS

**TUTOR: D. FERNÁNDEZ GARCÍA, FRANCISCO JAVIER
COTUTOR: D. GONZÁLEZ PELÁEZ, DANIEL**

FECHA: JULIO 2017



ÍNDICE GENERAL DE DOCUMENTOS

Memoria del proyecto

Manual de instrucciones

Planos

Presupuesto del proyecto



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÁREA DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER Nº 18010020

MEMORIA DEL PROYECTO

D. LLANOS VEGA, MARCOS

TUTOR: D. FERNÁNDEZ GARCÍA, FRANCISCO JAVIER
COTUTOR: D. GONZÁLEZ PELÁEZ, DANIEL

FECHA: JULIO 2017



RESUMEN DEL PROYECTO

Este proyecto consistirá en diseñar una herramienta informática que permita evaluar la eficiencia energética del sistema de compresión y purificación de aire de la planta de Praxair en Gijón. Asimismo, este estudio no se limitará a un análisis estático del sistema en un instante concreto, sino que consistirá en un análisis continuo mediante el registro de las medidas de los sensores de la planta. De esta manera, se conseguirá la monitorización en tiempo real de todas las variables de funcionamiento de cada uno de los equipos que forman el proceso, incluyendo filtros, compresores, intercambiadores de calor y prepurificadores.

Por otro lado, uno de los grandes problemas que tienen estas plantas que trabajan de manera continua, son las paradas por mantenimiento, tanto por el coste de las reparaciones y sustituciones de elementos, como por la pérdida de producción. Siguiendo esta línea, contará con un histórico del último trimestre de todos los equipos analizados, facilitando así la detección de cualquier anomalía en alguna parte del sistema, mediante su comparación con valores anteriores. Gracias a esta función, se evitará trabajar con equipos deteriorados que posean bajos rendimientos, incluso podrá advertir de la cercanía de un fallo catastrófico del equipo, pudiendo así evitarlo antes de que ocurra. A su vez, evitará hacer paradas innecesarias para sustituir algún componente si éste todavía funciona aceptablemente. En definitiva, esta herramienta puede complementarse perfectamente dentro de un plan de mantenimiento predictivo, con el ahorro que ello supone.

Para llevar a cabo este proyecto se comenzará por el estudio de toda la documentación referente a este proceso, tanto en manuales como en planos, lo que permita conocer al detalle el funcionamiento de la instalación. Posteriormente se analizará el problema desde el punto de vista teórico, aplicando las diferentes leyes de la termodinámica, para saber cuáles son los pasos de cálculo que habrá que seguir en la programación de la herramienta.

Una vez se tenga claro el procedimiento de cálculo, se programará utilizando el software Microsoft Excel. No obstante, Excel no es un software específicamente de ingeniería, por lo que no posee ningún tipo de funciones referentes a las propiedades del aire. Por tanto, el primer paso a la hora de programar la herramienta será elaborar unas tablas con las propiedades termodinámicas del aire, en función de la presión, la temperatura y la humedad, de manera que sirvan de base de datos para que el programa pueda obtener estas propiedades automáticamente y con ellas realizar todos sus cálculos.

Finalmente, se comprobará su correcto funcionamiento en la planta, comparando los valores obtenidos con los que cabría esperar para este tipo de instalación. Asimismo, para concluir se tratará de optimizar el programa de manera que consuma los mínimos recursos posibles en el ordenador, facilitando su funcionamiento simultáneo con otras aplicaciones.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

Resumen del proyecto	1
Índice de contenidos	2
Lista de Figuras	7
Lista de Tablas.....	14
Nomenclatura y símbolos	25
1.- Introducción	28
1.1.- La eficiencia energética en la industria.....	28
1.2.- Objetivo del proyecto	28
1.3.- Limitaciones del proyecto.....	29
1.4.- Antecedentes	30
1.5.- Metodología	30
1.6.- Estructura de la memoria	31
2.- La empresa colaboradora, Praxair España S.L.U.....	34
3.- El proceso de separación de aire	38
3.1.- Composición del aire y su aprovechamiento industrial	38
3.2.- Evolución del proceso de separación de aire	40
3.2.1.- Licuación del aire	40
3.2.2.- Destilación fraccionada criogénica	43
3.2.3.- Separación de aire por métodos no criogénicos.....	53
3.3.- Sistemas de compresión de aire	53
3.3.1.- Descripción general de un sistema de compresión de aire.....	53
3.3.2.- Tipos de compresores.....	54
3.3.3.- Enfriadores y postenfriadores del sistema de compresión	59
4.- La planta de separación de aire Gijón III	60
4.1.- Descripción del proceso de Gijón III.....	61
4.2.- Descripción del sistema de compresión y purificación de aire.....	64
4.2.1.- Filtro de aspiración del BLAC	68



4.2.2.- Compresor de aire principal o BLAC	69
4.2.3.- Postenfriador de contacto directo o DCA	72
4.2.4.- Prepurificadores	74
4.2.5.- Filtro de polvo	76
4.2.6.- Filtro de aspiración del BAC	76
4.2.7.- Compresor de aire booster o BAC	77
4.2.8.- Aftercooler del BAC	78
5.- Análisis teórico del problema planteado.....	80
5.1.- Esquema del sistema de compresión y purificación de aire	80
5.2.- Propiedades del fluido de trabajo en cada punto del proceso	82
5.2.1.- Puntos reales del proceso (del 1 al 17).....	83
5.2.2.- Puntos ideales del proceso (los terminados en “s”)	85
5.2.3.- Resumen de obtención de las propiedades del aire en todos los puntos del proceso	87
5.3.- Caudales del proceso	92
5.3.1.- Balance de materia del aire seco	93
5.3.2.- Balance de materia del agua.....	96
5.4.- Análisis de los compresores.....	99
5.4.1.- Rendimiento isentrópico de los compresores.....	99
5.4.2.- Incremento de presión en los compresores	100
5.4.3.- Relación de presiones en los compresores	100
5.5.- Balance de energía en cada equipo	100
5.6.- Aprovechamiento de la potencia del motor del sistema de compresión.....	103
6.- Pasos previos al diseño del programa informático	106
6.1.- Elección del software a utilizar.....	106
6.2.- Estructura del libro de Excel.....	107
7.- Índice de hojas.....	110
8.- Obtención de las propiedades del aire	112
8.1.- Importación en Excel de las tablas de las propiedades termodinámicas del aire	119
8.2.- Procedimiento de interpolación en el programa diseñado	121



8.2.1.- Primer paso: extraer los datos de las tablas en el rango deseado.	123
8.2.2.- Segundo paso: interpolación en función de la temperatura.	126
8.2.3.- Tercer paso: interpolación en función de la presión.	130
8.2.4.- Cuarto paso: interpolación en función de la humedad relativa.....	132
9.- Hojas de los estados de funcionamiento del proceso	136
9.1.- Encabezado de la hoja.....	136
9.2.- Pantalla de resultados.....	138
9.3.- Lectura de los sensores	138
9.3.1.- Sensores auxiliares	141
9.3.2.- Importación de las medidas de los sensores con Historian	146
9.4.- Cálculos	150
9.4.1.- Cálculos de los flujos máxicos	150
9.4.2.- Cálculo de las propiedades de aire húmedo	151
9.4.3.- Cálculo de las propiedades del aire seco.....	155
9.4.4.- Cálculos de los caudales y potencias en los equipos	158
9.4.5.- Cálculo de las condiciones del aire en la entrada y la salida del sistema	162
10.- Representación y análisis de los resultados	166
10.1.- Análisis individual de cada uno de los equipos	167
10.1.1.- Etapas de compresión del BLAC	167
10.1.2.- Etapas de compresión del BAC	171
10.1.3.- Intercambiadores de calor	173
10.1.4.- Otros elementos.....	176
10.2.- Indicadores del funcionamiento del sistema de compresión	180
10.2.1.- Evolución de la presión y la temperatura del aire a lo largo del proceso	181
10.2.2.- Reparto de la potencia consumida por el motor eléctrico del sistema de compresión	184
10.2.3.- Relación entre la potencia aportada al aire en los compresores y la consumida por el motor eléctrico (rendimiento electromecánico del sistema).....	188
10.2.4.- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia del aire de entrada	189



10.2.5.- Relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada y la consumida por el motor.	191
10.2.6.- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia consumida por el motor eléctrico.....	192
10.2.7.- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia aportada al sistema en todos sus equipos.....	193
10.2.8.- Relación entre la potencia aportada y perdida en los equipos del sistema	194
10.2.9.- Rendimiento isentrópico conjunto de los 6 compresores.....	194
10.3.- Balance global del sistema.....	196
11.- Histórico semanal del último trimestre.....	206
11.1.- Encabezado de la hoja.....	206
11.2.- Histórico de los compresores.....	206
11.3.- Histórico del reparto de la potencia consumida por el motor.....	213
11.4.- Histórico de los intercambiadores de calor.....	216
11.5.- Histórico de los demás elementos.....	219
11.6.- Histórico de los indicadores del sistema.....	221
11.6.1.- Rendimiento electromecánico del sistema.....	221
11.6.2.- Relación entre la potencia del aire de salida y la del aire de entrada	223
11.6.3.- Relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada y consumida por el motor.....	225
11.6.4.- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia consumida por el motor eléctrico.....	227
11.6.5.- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia aportada al sistema en todos sus equipos.....	228
11.6.6.- Relación entre la potencia aportada y perdida en los equipos del sistema	229
11.6.7.- Rendimiento isentrópico conjunto de los 6 compresores.....	231
12.- Comprobación de funcionamiento y optimización de la herramienta.....	233
13.- Conclusiones y trabajos futuros.....	235
13.1.- Conclusiones.....	235
13.2.- Trabajos futuros.....	236
14.- Bibliografía.....	238



15.- Anexo I: Tablas de propiedades termodinámicas del aire	239
16.- Anexo II: Hoja de estado de funcionamiento	362
17.- Anexo III: Histórico del último trimestre	415



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. - Principales mercados a los que suministra Praxair	35
Figura 2.2. - Situación de Praxair en Europa.....	35
Figura 3.1. - Licuación del aire mediante el proceso Linde	41
Figura 3.2. - Licuación del aire mediante el proceso Claude	42
Figura 3.3. - Licuación del aire mediante el proceso mixto Linde-Claude	43
Figura 3.4. - Instalación de fraccionamiento con columna única de agotamiento (proceso Linde).....	44
Figura 3.5. - Proceso con doble columna de fraccionamiento y laminación (proceso Linde)	45
Figura 3.6. - Esquema del proceso de una planta de producción de nitrógeno gas de alta pureza y oxígeno gas de 99,5 % de pureza	47
Figura 3.7. - Esquema del proceso de alta presión para la obtención de nitrógeno y oxígeno criogénicos	49
Figura 3.8. - Acoplamiento de una unidad de licuación de nitrógeno a una planta de doble columna.....	50
Figura 3.9. - Unidad de licuación de nitrógeno integrada en el proceso	51
Figura 3.10. - Esquema de una planta de separación de aire con extracción de los componentes mayoritarios en fase gas y líquida y argón en fase líquida	52
Figura 3.11. – Compresor centrífugo.....	54
Figura 3.12. – Compresor de tornillo	56
Figura 3.13. – Compresor alternativo	58
Figura 4.1. - Esquema genérico de una planta de separación de aire criogénica	61
Figura 4.2. - Esquema del proceso de la planta de separación de aire Gijón III	62
Figura 4.3. – Sistema de compresión y purificación de aire de Gijón III.....	65
Figura 4.4. - Ubicación del sistema de compresión y purificación de aire dentro del proceso de separación de aire.....	66
Figura 4.5. - Filtro de aspiración del BLAC o filtro de aire principal.....	68
Figura 4.6. – Vista general del sistema de compresión	69
Figura 4.7. - Vista general del sistema de compresión desde el lado contrario.....	70



Figura 4.8. – Primera etapa de compresión del BLAC.....	71
Figura 4.9. – Comparación entre un intercambiador del lado de aire húmedo (IC1) y uno de aire seco (IC4).....	72
Figura 4.10. – Postenfriador de contacto directo.....	73
Figura 4.11. - Prepurificadores	74
Figura 4.12. – Filtro de polvo	76
Figura 4.13. – Sección longitudinal de un filtro de tipo cónico	77
Figura 4.14. – Comparación entre una etapa de compresión del BAC y una del BLAC. ...	78
Figura 4.15. – Aftercooler del BAC	79
Figura 5.1. – Esquema del sistema de compresión y purificación de aire de Gijón III.....	81
Figura 5.2. - Diagrama T-s de una compresión isentrópica (izquierda) y otra real (derecha)	86
Figura 5.3. – Distribución de las corrientes de aire seco por el proceso	95
Figura 5.4. – Flujos de entrada y salida de agua del sistema en el lado de aire húmedo	97
Figura 5.5. - Balance de materia a un intercambiador de calor	98
Figura 5.6. – Balance de potencia del sistema de compresión y purificación de aire	102
Figura 5.7. – Simplificación del balance de potencias en los prepurificadores y el filtro de polvo	103
Figura 7.1. – Índice de hojas del libro de Excel	110
Figura 8.1. – Extracto de la hoja “Tablas auxiliares”	120
Figura 8.2. – Extracto de la tabla “Entalpía_ASeco” en Excel	121
Figura 8.3. – Condiciones del punto 1 del proceso	122
Figura 8.4. – Visión general del subprograma de interpolación de variables diseñado	123
Figura 8.5. – Extracción de los valores de las entalpías para el valor mínimo de humedad relativa	123
Figura 8.6. – Valores de las entalpías interpoladas por temperatura.....	127
Figura 8.7. – Parejas de valores de la entalpía a interpolar por temperatura.....	128
Figura 8.8. – Interpolación por presión	131
Figura 8.9. – Interpolación por humedad relativa	133
Figura 8.10. – Interpolación para los casos de aire húmedo.....	135
Figura 9.1. – Encabezado de las hojas de “estado de funcionamiento”	137



Figura 9.2. – Encabezado de la hoja de “estado de funcionamiento personalizado”	138
Figura 9.3. – Lectura de los sensores	138
Figura 9.4. - Vista ampliada de la tabla generada con la lectura de los sensores de presión del BLAC.....	140
Figura 9.5. – Vista del menú del complemento del Historian en Excel	147
Figura 9.6. – Ventana de búsqueda de sensores en Historian.....	148
Figura 9.7. – Obtención de las mediciones de los sensores en tiempo real.....	149
Figura 9.8. – Obtención de las medidas de los sensores en el pasado.....	149
Figura 9.9. – Cálculos de los flujos máxicos	150
Figura 9.10. – Vista de uno de los puntos del proceso del lado de aire húmedo en el programa diseñado.....	155
Figura 9.11. - Vista de uno de los puntos del proceso del lado de aire seco en el programa diseñado	157
Figura 9.12. – Vista del compresor BLAC 1 en el apartado de cálculos de caudales y potencias de los equipos	158
Figura 9.13. – Condiciones de entrada al BLAC 1.....	158
Figura 9.14. – Potencia aportada en el BLAC 1	160
Figura 9.15. – Potencia disipada en el intercambiador de calor IC 1	160
Figura 9.16. – Drenaje de agua en el intercambiador de calor IC 2	161
Figura 9.17. – Vista del BAC 1 en el apartado de cálculo de caudales y potencias en el programa	161
Figura 9.18. Vista ampliada de las condiciones de entrada y salida del BAC 1	161
Figura 9.19. – Condiciones del aire de entrada al sistema	163
Figura 9.20. – Condiciones del aire de la salida de alta presión del sistema.....	163
Figura 9.21. – Interpolación de la entalpía en base húmeda de la salida de aire a alta presión.....	164
Figura 9.22. – Condiciones de salida del aire en base seca	165
Figura 10.1. – Resultados del BLAC mostrados por el programa.....	168
Figura 10.2. – Gráfico del rendimiento isentrópico del BLAC 1 mostrado por el programa	170
Figura 10.3. – Resultados de las etapas de compresión del BAC	171



Figura 10.4. – Visión general de los resultados de los intercambiadores de calor	173
Figura 10.5. – Visión general de los resultados del resto de elementos del sistema	176
Figura 10.6. – Evolución de la presión (azul) y la temperatura (rojo) del aire a lo largo del proceso	183
Figura 10.7. – Reparto de la potencia suministrada por el motor.....	186
Figura 10.8. - Aprovechamiento de la potencia consumida por el motor eléctrico.....	187
Figura 10.9. – Reparto de la potencia suministrada por el motor agrupando todas las pérdidas.....	188
Figura 10.10. – Rendimiento electromecánico del sistema.....	189
Figura 10.11. – Porcentaje de aprovechamiento de la potencia del aire de entrada al sistema	190
Figura 10.12. - Porcentaje de aprovechamiento de la potencia del aire de entrada al sistema y la consumida por el motor	192
Figura 10.13. - Rendimiento isentrópico conjunto de todas las etapas de compresión del sistema	195
Figura 10.14. – Visión general de la primera parte del balance global del sistema de compresión.....	196
Figura 10.15. – Representación gráfica de las potencias aportadas por los equipos al sistema	200
Figura 10.16. – Representación gráfica de las potencias disipadas en los equipos del sistema	201
Figura 10.17. – Evolución de la potencia de la corriente de aire a lo largo del proceso ...	203
Figura 11.1. – Encabezado de la hoja “Histórico del trimestre”	206
Figura 11.2. – Evolución de los rendimientos isentrópicos de las 6 etapas de compresión y el rendimiento conjunto en el último trimestre.....	208
Figura 11.3. – Evolución de los incrementos de presión en las diferentes etapas de compresión en el último trimestre	210
Figura 11.4. – Evolución del incremento de presión acumulado de las 6 etapas de compresión en el último trimestre	211
Figura 11.5. – Evolución de la relación de presiones de las distintas etapas de compresión en el último trimestre	212
Figura 11.6. – Evolución del reparto de la potencia consumida por el motor en el último trimestre	214



Figura 11.7. – Evolución de aprovechamiento de la potencia consumida por el motor en el trimestre	215
Figura 11.8. – Evolución de la variación de temperatura en los intercambiadores en el último trimestre.....	218
Figura 11.9. – Evolución de las pérdidas de presión en los intercambiadores en el último trimestre	219
Figura 11.10. – Evolución de las pérdidas de carga en los filtros y en el conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo en el último trimestre	220
Figura 11.11. – Evolución del rendimiento electromecánico del sistema de compresión en el trimestre	223
Figura 11.12. – Evolución del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la del aire de entrada en el último trimestre.....	225
Figura 11.13. – Evolución del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada y la consumida por el motor.	226
Figura 11.14. – Evolución del indicador de la relación entre la potencia de salida del aire y la consumida por el motor	228
Figura 11.15. – Evolución del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la potencia aportada en todos sus equipos	229
Figura 11.16. – Evolución del indicador de la relación entre la potencia aportada y la perdida en los equipos del sistema.....	230
Figura 11.17. – Evolución del rendimiento isentrópico conjunto de las 6 etapas de compresión.....	232
Figura 16.1. – Hoja de estado de funcionamiento	363
Figura 16.2. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	364
Figura 16.3. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	365
Figura 16.4. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	366
Figura 16.5. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	367
Figura 16.6. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	368
Figura 16.7. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	369
Figura 16.8. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	370
Figura 16.9. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	371
Figura 16.10. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	372



Figura 16.11. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	373
Figura 16.12. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	374
Figura 16.13. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	375
Figura 16.14. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	376
Figura 16.15. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	377
Figura 16.16. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	378
Figura 16.17. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	379
Figura 16.18. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	380
Figura 16.19. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	381
Figura 16.20. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	382
Figura 16.21. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	383
Figura 16.22. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	384
Figura 16.23. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	385
Figura 16.24. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	386
Figura 16.25. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	387
Figura 16.26. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	388
Figura 16.27. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	389
Figura 16.28. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	390
Figura 16.29. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	391
Figura 16.30. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	392
Figura 16.31. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	393
Figura 16.32. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	394
Figura 16.33. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	395
Figura 16.34. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	396
Figura 16.35. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	397
Figura 16.36. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	398
Figura 16.37. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	399
Figura 16.38. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	400
Figura 16.39. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	401



Figura 16.40. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	402
Figura 16.41. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	403
Figura 16.42. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	404
Figura 16.43. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	405
Figura 16.44. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	406
Figura 16.45. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	407
Figura 16.46. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	408
Figura 16.47. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	409
Figura 16.48. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	410
Figura 16.49. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	411
Figura 16.50. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	412
Figura 16.51. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	413
Figura 16.52. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación).....	414
Figura 17.1. – Histórico semanal del último trimestre	416
Figura 17.2. – Histórico semanal del último trimestre (continuación).....	417
Figura 17.3. – Histórico semanal del último trimestre (continuación).....	418
Figura 17.4. – Histórico semanal del último trimestre (continuación).....	419
Figura 17.5. – Histórico semanal del último trimestre (continuación).....	420
Figura 17.6. – Histórico semanal del último trimestre (continuación).....	421
Figura 17.7. – Histórico semanal del último trimestre (continuación).....	422
Figura 17.8. – Histórico semanal del último trimestre (continuación).....	423
Figura 17.9. – Histórico semanal del último trimestre (continuación).....	424
Figura 17.10. – Histórico semanal del último trimestre (continuación).....	425
Figura 17.11. – Histórico semanal del último trimestre (continuación).....	426
Figura 17.12. – Histórico semanal del último trimestre (continuación).....	427



LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. - Composición del aire.....	38
Tabla 4.1. – Condiciones de diseño del compresor de aire	70
Tabla 5.1. – Procedimiento de cálculo de los puntos del proceso (puntos del 0 al 3).....	88
Tabla 5.2. – Procedimiento de cálculo de los puntos del proceso (puntos del 4 al 6s)	89
Tabla 5.3. - Procedimiento de cálculo de los puntos del proceso (puntos del 7 al 10).....	90
Tabla 5.4. – Procedimiento de cálculo de los puntos del proceso (puntos del 11 al 14).....	91
Tabla 5.5. – Procedimiento de cálculo de los puntos del proceso (puntos del 15 al 17).....	92
Tabla 8.1. – Tablas de la entalpía en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (Aire húmedo).....	115
Tabla 8.2. – Tablas de la entropía en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (Aire húmedo).....	116
Tabla 8.3. – Tablas de la temperatura en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (Aire húmedo)	117
Tabla 8.4. – Tabla de la entalpía en función de presión y la temperatura (Aire seco)	117
Tabla 8.5. – Tabla de la entropía en función de la presión y la temperatura (Aire seco)..	118
Tabla 8.6. – Tabla de la temperatura en función de la presión y la entropía (Aire seco)..	118
Tabla 9.1. – Comparación de los valores de los rendimientos de los compresores calculados con la presión de 1013 mbar cuando se registra la presión mínima	143
Tabla 9.2. - Comparación de los valores de los rendimientos de los compresores calculados con la presión de 1013 mbar cuando se registra la presión máxima	144
Tabla 9.3. – Variables de las propiedades definidas en los puntos del proceso de la parte de aire húmedo	152
Tabla 9.4. – Procedimiento de cálculo de las variables que definen un punto del proceso para los puntos reales de la parte de aire húmedo	152
Tabla 9.5. - Procedimiento de cálculo de las variables que definen el punto 0 del proceso	153
Tabla 9.6. - Procedimiento de cálculo de las variables que definen un punto del proceso para los puntos ideales de la parte de aire húmedo.....	154
Tabla 9.7. - Variables de las propiedades definidas en los puntos del proceso de la parte de aire seco	156



Tabla 9.8. - Procedimiento de cálculo de las variables que definen un punto del proceso para los puntos reales de la parte de aire seco	156
Tabla 9.9. - Procedimiento de cálculo de las variables que definen un punto del proceso para los puntos ideales de la parte de aire seco.....	157
Tabla 10.1. - Resultados del BLAC 1 generados por el programa.....	169
Tabla 10.2. - Resultados del BAC 1 mostrados por el programa	172
Tabla 10.3. – Resultados del intercambiador IC 1	174
Tabla 10.4. – Resultados del intercambiador IC 4	175
Tabla 10.5. – Resultados del filtro de aspiración del BLAC.....	177
Tabla 10.6. - Resultados del filtro de aspiración del BAC.....	178
Tabla 10.7. – Resultados del conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo	179
Tabla 10.8. – Condiciones de salida del prepurificador 1	180
Tabla 10.9. - Condiciones de salida del prepurificador 2.....	180
Tabla 10.10. - Evolución de la presión y la temperatura del aire a lo largo del proceso...	182
Tabla 10.11. - Reparto de la potencia consumida por el motor eléctrico del sistema de compresión.....	185
Tabla 10.12. – Aprovechamiento de la potencia consumida por el motor eléctrico	187
Tabla 10.13. – Relación entre la potencia aportada al aire en los compresores y la consumida por el motor eléctrico	189
Tabla 10.14. – Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia del aire de entrada	190
Tabla 10.15. – Relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada y la consumida por el motor.....	192
Tabla 10.16. – Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia consumida por el motor.....	193
Tabla 10.17. – Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia aportada al sistema en todos sus equipos	193
Tabla 10.18. – Relación entre la potencia aportada y la perdida en los equipos del sistema	194
Tabla 10.19. – Rendimiento isentrópico conjunto de las 6 etapas de compresión	195
Tabla 10.20. – Potencia de la corriente de aire entrante al sistema (en base húmeda).....	196
Tabla 10.21. – Potencia de las corrientes de aire salientes del sistema (en base húmeda)	197



Tabla 10.22. – Potencia de las corrientes de aire salientes del sistema (en base seca)	197
Tabla 10.23. – Potencias aportadas en los diferentes equipos del sistema	198
Tabla 10.24. – Potencias disipadas en los diferentes equipos del sistema	199
Tabla 10.25. – Evolución de la potencia que lleva la corriente de aire a lo largo del proceso	202
Tabla 10.26. - Balance global de energía del sistema de compresión y purificación de aire	204
Tabla 11.1. – Valores de los rendimientos isentrópicos de las 6 etapas de compresión en el último trimestre.....	207
Tabla 11.2. – Valores de los incrementos de presiones en cada etapa de compresión en el último trimestre medidos en bar	208
Tabla 11.3. – Valores de la relación de presiones de las diferentes etapas de compresión en el último trimestre.....	212
Tabla 11.4. – Histórico del reparto de la potencia consumida por el motor eléctrico medidas en porcentaje respecto a la potencia total consumida por el mismo	213
Tabla 11.5. – Aprovechamiento de la potencia consumida por el motor en el último trimestre	215
Tabla 11.6. – Histórico de variaciones de temperatura (en °C) y pérdidas de presión (en bar) en intercambiadores del último trimestre (intercambiadores IC 1, IC 2 e IC 3)	216
Tabla 11.7. - Histórico de variaciones de temperatura (en °C) y pérdidas de presión (en bar) en intercambiadores del último trimestre (DCA, IC 4 y aftercooler del BAC).....	217
Tabla 11.8. – Histórico de las pérdidas de presión (en bar) de los dos filtros de aspiración de los compresores y del conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo en el trimestre	220
Tabla 11.9. – Histórico del indicador del rendimiento electromecánico del sistema de compresión.....	222
Tabla 11.10. – Histórico del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la del aire de entrada.....	224
Tabla 11.11. – Histórico del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada más la consumida por el motor.....	226
Tabla 11.12. – Histórico del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la potencia consumida por el motor.....	227



Tabla 11.13. – Histórico del indicador de la relación de la potencia del aire de salida y la potencia aportada en todos sus equipos	229
Tabla 11.14. – Histórico del indicador de la relación entre la potencia aportada y la pérdida en los equipos del sistema.....	230
Tabla 11.15. – Histórico del rendimiento isentrópico conjunto de las 6 etapas de compresión.....	231
Tabla 15.1. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa.....	240
Tabla 15.2. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	241
Tabla 15.3. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	242
Tabla 15.4. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	243
Tabla 15.5. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	244
Tabla 15.6. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	245
Tabla 15.7. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	246
Tabla 15.8. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	247
Tabla 15.9. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	248
Tabla 15.10. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	249
Tabla 15.11. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	250
Tabla 15.12. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	251
Tabla 15.13. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	252
Tabla 15.14. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	253



Tabla 15.15. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	254
Tabla 15.16. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	255
Tabla 15.17. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	256
Tabla 15.18. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	257
Tabla 15.19. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	258
Tabla 15.20. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	259
Tabla 15.21. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	260
Tabla 15.22. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	261
Tabla 15.23. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	262
Tabla 15.24. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	263
Tabla 15.25. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	264
Tabla 15.26. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	265
Tabla 15.27. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	266
Tabla 15.28. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	267
Tabla 15.29. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	268
Tabla 15.30. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	269
Tabla 15.31. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	270



Tabla 15.32. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	271
Tabla 15.33. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	272
Tabla 15.34. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	273
Tabla 15.35. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	274
Tabla 15.36. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa.....	275
Tabla 15.37. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	276
Tabla 15.38. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	277
Tabla 15.39. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	278
Tabla 15.40. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	279
Tabla 15.41. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	280
Tabla 15.42. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	281
Tabla 15.43. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	282
Tabla 15.44. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	283
Tabla 15.45. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	284
Tabla 15.46. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	285
Tabla 15.47. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	286
Tabla 15.48. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	287



Tabla 15.49. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	288
Tabla 15.50. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	289
Tabla 15.51. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	290
Tabla 15.52. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	291
Tabla 15.53. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	292
Tabla 15.54. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	293
Tabla 15.55. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	294
Tabla 15.56. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	295
Tabla 15.57. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	296
Tabla 15.58. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	297
Tabla 15.59. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	298
Tabla 15.60. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	299
Tabla 15.61. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	300
Tabla 15.62. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	301
Tabla 15.63. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	302
Tabla 15.64. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	303
Tabla 15.65. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	304



Tabla 15.66. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	305
Tabla 15.67. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	306
Tabla 15.68. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)	307
Tabla 15.69. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta	308
Tabla 15.70. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	309
Tabla 15.71. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	310
Tabla 15.72. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	311
Tabla 15.73. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	312
Tabla 15.74. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	313
Tabla 15.75. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	314
Tabla 15.76. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	315
Tabla 15.77. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	316
Tabla 15.78. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	317
Tabla 15.79. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	318
Tabla 15.80. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	319
Tabla 15.81. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	320
Tabla 15.82. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	321



Tabla 15.83. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	322
Tabla 15.84. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	323
Tabla 15.85. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	324
Tabla 15.86. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	325
Tabla 15.87. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	326
Tabla 15.88. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	327
Tabla 15.89. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	328
Tabla 15.90. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	329
Tabla 15.91. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	330
Tabla 15.92. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	331
Tabla 15.93. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	332
Tabla 15.94. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	333
Tabla 15.95. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	334
Tabla 15.96. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	335
Tabla 15.97. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	336
Tabla 15.98. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	337
Tabla 15.99. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	338



Tabla 15.100. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	339
Tabla 15.101. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	340
Tabla 15.102. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	341
Tabla 15.103. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	342
Tabla 15.104. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	343
Tabla 15.105. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	344
Tabla 15.106. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	345
Tabla 15.107. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación).....	346
Tabla 15.108. – Entalpía (en J/kg) en función de la presión y la temperatura	347
Tabla 15.109. – Entalpía (en J/kg) en función de la presión y la temperatura (continuación)	348
Tabla 15.110. – Entalpía (en J/kg) en función de la presión y la temperatura (continuación)	349
Tabla 15.111. – Entalpía (en J/kg) en función de la presión y la temperatura (continuación)	350
Tabla 15.112. – Entalpía (en J/kg) en función de la presión y la temperatura (continuación)	351
Tabla 15.113. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión y la temperatura	352
Tabla 15.114. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión y la temperatura (continuación).....	353
Tabla 15.115. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión y la temperatura (continuación).....	354
Tabla 15.116. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión y la temperatura (continuación).....	355
Tabla 15.117. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión y la temperatura (continuación).....	356



Tabla 15.118. – Temperatura (en °C) en función de la presión y la entropía	357
Tabla 15.119. – Temperatura (en °C) en función de la presión y la entropía (continuación)	358
Tabla 15.120. – Temperatura (en °C) en función de la presión y la entropía (continuación)	359
Tabla 15.121. – Temperatura (en °C) en función de la presión y la entropía (continuación)	360
Tabla 15.122. – Temperatura (en °C) en función de la presión y la entropía (continuación)	361



NOMENCLATURA Y SÍMBOLOS

A continuación se resumen los símbolos y la nomenclatura utilizada a lo largo de esta memoria. Todas las variables están medidas en unidades del Sistema Internacional (S.I.) como aquí se indica, salvo en algunas ocasiones excepcionales, donde se indicará claramente en la memoria la unidad utilizada en su lugar.

h_{mca}	Altura de la columna de agua (en mca)
ρ	Densidad (en kg/m ³)
h	Entalpía (en J/kg)
s	Entropía (en J/(kg*K))
\dot{y}	Flujo másico de agua (en kg agua/s)
\dot{x}	Flujo másico de aire seco (en kg aire seco/s)
\dot{m}	Flujo másico total (en kg/s)
\dot{V}	Flujo volumétrico (en m ³ /s)
g	Gravedad (9,81 m/s ²)
w_{sat}	Humedad absoluta de saturación del aire (en kg agua/kg aire seco)
w	Humedad absoluta del aire (en kg agua/kg aire seco)
HR	Humedad relativa del aire (en tanto por uno o en %, normalmente se utilizará en tanto por uno para los cálculos y en % para hablar de ella)
φ	Humedad relativa del aire (en tanto por uno)
ΔP	Incremento de presión en un equipo (en Pa)
Pot	Potencia (en W)
P	Presión (en Pa)
$P_{w_{sat}}$	Presión de saturación del vapor (en Pa)
R_p	Relación de presiones de un compresor (adimensional)



η	Rendimiento, en el caso de los compresores, rendimiento isentrópico (en tanto por uno o en %, normalmente se utilizará en tanto por uno para los cálculos y en % para hablar de él)
T_K ó $T[K]$	Temperatura (en K)
T	Temperatura (en °C)

Asimismo a lo largo de la memoria se recurrirá en numerosas ocasiones a llamar a las posiciones del proceso por el punto asignado a esa posición y dado que habitualmente son los subíndices de las variables anteriores, se enumeran estos puntos a continuación.

Nota: Dado que los subíndices en Excel quedan excesivamente pequeños y no se pueden ver bien se utilizará el símbolo “_” para denotar un subíndice. Así cuando en Excel se vea $T_{_1}$ se referirá a T_1 y así sucesivamente.

- 0** : Entrada al filtro de aspiración del BLAC (Condiciones del aire ambiental)
- 1** : Salida del filtro de aspiración del BLAC y entrada al BLAC 1
- 2** : Salida del BLAC 1 y entrada al intercambiador de calor IC 1
- 2s** : Salida del BLAC 1 en caso isentrópico
- 3** : Salida del intercambiador de calor IC 1 y entrada al BLAC 2
- 4** : Salida del BLAC 2 y entrada al intercambiador de calor IC 2
- 4s** : Salida del BLAC 2 en caso isentrópico
- 5** : Salida del intercambiador de calor IC 2 y entrada al BLAC 3
- 6** : Salida del BLAC 3 y entrada al intercambiador de calor IC 3
- 6s** : Salida del BLAC 3 en caso isentrópico
- 7** : Salida del intercambiador de calor IC 3 y entrada al BLAC 4
- 8** : Salida del BLAC 4 y entrada al DCA
- 8s** : Salida del BLAC 4 en caso isentrópico
- 9** : Salida del DCA y entrada al conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo
- 10** : Salida del conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo
- 11** : Entrada al filtro de aspiración del BAC
- 12** : Salida del filtro de aspiración del BAC y entrada al BAC 1



13 : Salida del BAC 1 y entrada al intercambiador de calor IC 4

13s : Salida del BAC 1 en caso isentrópico

14 : Salida del intercambiador de calor IC 4 y entrada al BAC 2

15 : Salida del BAC 2 y entrada al aftercooler del BAC

15s : Salida del BAC 2 en caso isentrópico

16 : Salida del aftercooler del BAC (Salida de aire a alta presión)

17: Salida de aire a baja presión



1.- INTRODUCCIÓN

1.1.- La eficiencia energética en la industria

La eficiencia energética es un eje estratégico en las nuevas políticas dirigidas a frenar las emisiones y el cambio climático. Siguiendo esta directriz, han sido muchas las empresas que han puesto en marcha planes de mejora de la eficiencia energética en sus instalaciones, siendo Praxair una de ellas.

Esta empresa, afincada en Asturias desde hace décadas, cuenta actualmente con cuatro plantas en nuestra región (Gijón II, Gijón III, Tabaza y Avilés). En ellas produce nitrógeno, oxígeno y argón, imprescindibles para el funcionamiento diario de muchas otras empresas, como Arcelor Mittal o DuPont. Para conseguir esta producción, utiliza el proceso de separación criogénica del aire. Éste consiste en aplicar unas compresiones y destilaciones sucesivas al aire, de manera que se consigan extraer por separado los tres componentes principales del mismo, gracias a sus diferentes temperaturas de ebullición.

En estas plantas, la energía consumida para comprimir el aire (aproximadamente 20 veces su valor atmosférico) es el principal gasto energético y por tanto, a su vez el mayor coste a nivel económico. Esto provoca que sobre él recaiga gran parte de la atención cuando se trata de optimizar la instalación.

Sin embargo, el cálculo detallado de estos equipos es complejo, debido a que hay muchas variables influyendo en el proceso, por lo que hasta ahora en esta planta simplemente se medía la potencia consumida por el motor eléctrico del equipo, como indicador del correcto funcionamiento del sistema de compresión. Obviamente, esta medición aporta un análisis muy superficial del sistema, ya que en caso de producirse algún problema, impide averiguar cuál es el componente concreto que está fallando y provocando esa disminución de la eficiencia.

1.2.- Objetivo del proyecto

El objetivo que persigue este trabajo es el de diseñar una herramienta informática que permita monitorizar en tiempo real el funcionamiento de un sistema de compresión y purificación de aire, en base a las medidas tomadas por diferentes sensores del proceso.

Esta herramienta estará enfocada principalmente al análisis de la eficiencia del sistema de compresión. No obstante, no se limitará a obtener los rendimientos de los compresores que forman parte del sistema, sino que extenderá su análisis a todos los equipos que forman parte del proceso desde la entrada del aire ambiental hasta el punto donde se condensa el mismo y pasa a fase líquida, incluyendo dentro del sistema de



compresión de aire otros equipos intermedios que no son compresores, como intercambiadores de calor, filtros o prepurificadores.

De esta forma, el usuario no tendrá únicamente un valor global de la eficiencia del sistema, sino que podrá ver el funcionamiento de cada uno de los equipos que forman el sistema de manera independiente, lo cual resulta de gran ayuda para ver cuál de los mismos es el que puede estar provocando una disminución de la eficiencia global.

Sin embargo, todo este análisis no tendría mucho sentido si no se le aporta una cierta perspectiva a los datos proporcionados. Un ejemplo de esto es una máquina que está trabajando con un rendimiento del 80%. Esto puede ser su valor normal de funcionamiento, lo cual no supondría ningún problema para la instalación, o puede haber sufrido una importante disminución de su valor de diseño, si éste se ubica en torno al 95%, lo cual sí supondría un problema. Por tanto para poder comparar los datos que se están obteniendo del análisis actual del sistema, la propia herramienta dispondrá de un histórico con valores semanales del último trimestre de manera que permita relativizar los resultados obtenidos, comparándolos con los de semanas anteriores para ver si se ha producido un empeoramiento en algún equipo del sistema y cuál ha sido su gravedad.

Con todo esto, esta herramienta puede ser el aliado perfecto del mantenimiento predictivo, ya que avisa al usuario de cualquier funcionamiento anómalo del sistema sin necesidad de pararlo. Así se evitan tanto las paradas por averías de los componentes que supone el mantenimiento correctivo, como los costosos cambios de piezas que todavía funcionan aceptablemente y numerosas paradas que implica el mantenimiento preventivo.

1.3.- Limitaciones del proyecto

En este proyecto se ha contado principalmente con tres limitaciones.

La primera de ellas fue la gran envergadura y complejidad que conlleva un proceso industrial de este tipo, lo que provocó que no se pudiera abarcar el estudio completo del mismo. En su lugar, se optó por realizar sólo el análisis de una parte del mismo, en este caso, el sistema de compresión y purificación de aire, englobando así toda la parte del proceso que se desarrolla con aire en estado gaseoso, es decir, desde la entrada del aire ambiental hasta la salida del BAC.

La segunda limitación que tuvo el trabajo fue la ubicación de los sensores de medición de las diferentes variables del proceso, como la temperatura o la presión, los cuales en ocasiones no estaban en el lugar más apropiado o simplemente no había sensor en el punto deseado y había que aproximar su valor al de otro sensor cercano o calcular su valor aproximado. Esto siempre implica un pequeño error añadido al estudio. No obstante, viendo los resultados que se obtuvieron al final del mismo, se comprobó como todas estas aproximaciones fueron bastante acertadas y los errores mínimos. Asimismo, hubo zonas donde la falta de sensores concretos impidió un análisis en mayor profundidad. Por



ejemplo en los prepurificadores, donde la falta de caudalímetros independientes para cada uno de los mismos, los cuales son necesarios para realizar el balance de energía a la salida de ambos cuando éstos están trabajando simultáneamente, impidió hacer el análisis individualizado de ambos, limitándolo a un estudio de ambos como un bloque.

La última de estas limitaciones está referida al cálculo de las propiedades de los fluidos (entalpía, entropía, etc) involucrados en este trabajo. Debido a que la herramienta a desarrollar tenía que estar escrita en algún programa genérico de los que disponía la empresa y que a su vez los trabajadores ya estuvieran familiarizados con él, no se pudo hacer con programas específicos de ingeniería térmica, los cuales calculan las propiedades de fluidos como el aire con gran exactitud. Para solucionar esto, fue necesario elaborar unas tablas de manera manual con las propiedades del aire, tanto seco como húmedo a partir de sus valores de presión, temperatura y humedad, las cuales se copiarían posteriormente al programa diseñado para poder trabajar con ellas.

1.4.- Antecedentes

Para este estudio se ha analizado una de las plantas de separación de aire que la empresa Praxair tiene en Gijón, concretamente la planta de Gijón III, la cual produce nitrógeno, oxígeno y argón mediante un proceso de destilación fraccionada a partir del aire que toma de la atmósfera.

No obstante, en el capítulo 3 de esta memoria se explicará de manera detallada el funcionamiento de la planta, así como los diferentes equipos que la forman.

1.5.- Metodología

La metodología a seguir en este proyecto va a ser progresiva y ordenada y se basará principalmente en cuatro bloques de trabajo.

- Bloque I: Aprendizaje y familiarización con el proceso de separación de aire.

El primer bloque consta del aprendizaje del proceso de separación de aire mediante destilación llevado a cabo en la planta de Gijón III. Para ello fue necesario un minucioso estudio tanto de la documentación escrita disponible en la empresa en forma de manuales, planos y diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID), como la información recopilada de los conocimientos de los compañeros que allí trabajan y la búsqueda por el autor.

- Bloque II: Análisis teórico del funcionamiento del sistema de compresión y purificación de aire

En este segundo bloque se abordará el análisis teórico del sistema de compresión y purificación de aire. En él se detallarán los cálculos referentes a las propiedades del fluido en cada punto, los rendimientos de los equipos, las potencias consumidas, balances de



materia y energía, etc, basándose en diferentes leyes y principios de la termodinámica y de la física en general. Una vez concluido, este bloque formará la base sobre la que se apoye el programa desarrollado.

- Bloque III: Desarrollo del programa informático que monitorice el sistema

El tercer bloque abordará el desarrollo de la herramienta informática que permita monitorizar todo el funcionamiento del sistema de compresión de aire utilizando los datos de los sensores de la planta que sean necesarios. Para ello todos los cálculos llevados a cabo en este bloque serán los que previamente se explicaron en el bloque II.

- Bloque IV: Comprobación del correcto funcionamiento de la herramienta diseñada y optimización de la misma

El último bloque constará de la observación y comparación de los resultados obtenidos por la herramienta diseñada para comprobar su correcto funcionamiento, así como su grado de error. Además se intentará optimizar en la medida de lo posible el programa de manera que no consuma más recursos de los necesarios en el ordenador que se vaya a utilizar.

1.6.- Estructura de la memoria

La memoria se ha estructurado en capítulos basándose sobre todo en los pasos que se han tomado para realizar este proyecto, con el objetivo de facilitar al lector la comprensión de la metodología que se siguió para concluir cada tarea y su orden. De esta manera, se enumeran a continuación los trece capítulos de los que consta la memoria, así como una breve descripción de cada uno.

- Capítulo 1: Introducción.

Servirá de punto de partida del proyecto comentando cuál es el problema planteado, cómo se va a tratar de resolver, las limitaciones que hay y los objetivos buscados.

- Capítulo 2: La empresa colaboradora, Praxair España S.L.U..

En él se recogerá una pequeña descripción de Praxair, la empresa que dio pie a este proyecto, explicando cuáles son sus productos, sus clientes, su posición dentro del mercado, etc.

- Capítulo 3: El proceso de separación de aire.

Explicará el proceso de separación de aire, haciendo hincapié en su funcionamiento, los diferentes tipos que existen y cuál ha sido su evolución en los últimos años. Este capítulo se corresponde con el Bloque I de la metodología.



- Capítulo 4: La planta de separación de aire Gijón III.

Comenzará con una explicación general del proceso de separación de aire llevado a cabo en Gijón III, para a continuación centrarse en el sistema de compresión y purificación de aire de la planta, así como los equipos que la componen. Este capítulo se corresponde con el Bloque I de la metodología.

- Capítulo 5: Análisis teórico del sistema de compresión de aire.

Se centrará en el análisis pormenorizado de cada punto del sistema de compresión de aire y explicará todos los cálculos incluidos dentro del programa, los cuales se basan en diferentes leyes de la termodinámica o de la física en general. Este capítulo se corresponde con el Bloque II de la metodología.

- Capítulo 6: Pasos previos al diseño del programa informático.

Servirá de introducción a los capítulos siguientes donde se abordará el diseño de la herramienta, correspondiéndose cada uno de estos a una parte del programa implementado. En éste se razonará la elección del software utilizado para programar la herramienta, en este caso Excel, así como la estructura que tendrá la misma. Este capítulo se corresponde con el Bloque III de la metodología.

- Capítulo 7: Índice de hojas.

Explicará el índice creado como inicio del programa, así como el sistema de hipervínculos utilizado para conectar todas las hojas de cálculo entre sí de manera automática. Este capítulo se corresponde con el Bloque III de la metodología.

- Capítulo 8: Obtención de las propiedades del aire.

Abordará el proceso de elaboración por parte del autor de unas tablas con las propiedades termodinámicas del aire. Además, se detallará el subprograma implementado para que el programa utilice estas tablas de manera completamente autónoma y pueda obtener los valores necesarios para el resto de operaciones. Este capítulo se corresponde con el Bloque III de la metodología.

- Capítulo 9: Hojas de los estados de funcionamiento del proceso.

Detallará cada una de las partes de las hojas que muestran el estado de funcionamiento del sistema de compresión y purificación de aire, explicando detalladamente cada una de las funciones implementadas, ya que en ellas es donde se realizan la mayoría de los cálculos. De esta forma, se plasmará en el programa todo lo recopilado en el capítulo 5. Este capítulo se corresponde con el Bloque III de la metodología.



- Capítulo 10: Representación y análisis de los resultados.

En él se recogerán los resultados que genere el programa tras el cálculo, exponiéndolos de manera útil y clara para el usuario, permitiendo obtener unas conclusiones de ellos. Este capítulo se corresponde con el Bloque III de la metodología.

- Capítulo 11: Histórico semanal del último trimestre.

Aglutinará los resultados del último trimestre de manera que se pueda observar la evolución de las variables en este periodo. Este capítulo se corresponde con el Bloque III de la metodología.

- Capítulo 12: Comprobación de funcionamiento y optimización de la herramienta.

Se realizarán pruebas con el programa diseñado, con el objetivo de contrastar su buen funcionamiento. Además se tratará de optimizar el mismo de manera que consuma los menos recursos posibles del ordenador. Este capítulo se corresponde con el Bloque IV de la metodología.

- Capítulo 13: Conclusiones y trabajos futuros.

Constará de las conclusiones del proyecto, así como algunas propuestas de mejora del sistema de compresión de aire. Además se recogerán unas sugerencias sobre futuros trabajos relacionados con el tema tratado.



2.- LA EMPRESA COLABORADORA, PRAXAIR ESPAÑA S.L.U.

Dado que este proyecto fue posible gracias a un acuerdo de colaboración entre la Universidad de Oviedo y una empresa privada, Praxair, se comenzará haciendo una breve descripción de la misma. De esta manera, otorgará al lector una visión global de la empresa, así como de su entorno industrial, permitiéndole una mejor comprensión de esta memoria.

Praxair es la mayor empresa de producción de gases de América y una de las mayores del mundo. En su equipo cuenta con más de 26.000 trabajadores repartidos en los más de 50 países en los cuales tiene alguna de sus plantas. Posee más de un millón de clientes, con los que alcanzó una facturación de 11.000 millones de dólares en el año 2015, siendo la tercera empresa a nivel mundial en cuanto a volumen de gas producido (Praxair España S.L.U., 2016).

Como dice el eslogan de la compañía, “Making our planet more productive”, Praxair tiene por misión mejorar la productividad del planeta. Para ello impulsa el desarrollo de tecnologías, productos y servicios que ayuden a proteger nuestro entorno mediante la mejora de la eficiencia energética en los procesos industriales de sus clientes, gracias al uso de los gases que produce.

Los principales mercados a los que suministra gases se recogen en la Figura 2.1 y son los siguientes:

- Industria manufacturera.
- Industria metalúrgica.
- Industria energética (producción de petróleo y gas, solar, biocombustibles, etc).
- Industria química.
- Alimentación y bebidas.
- Medicina.
- Electrónica.
- Industria aeroespacial.

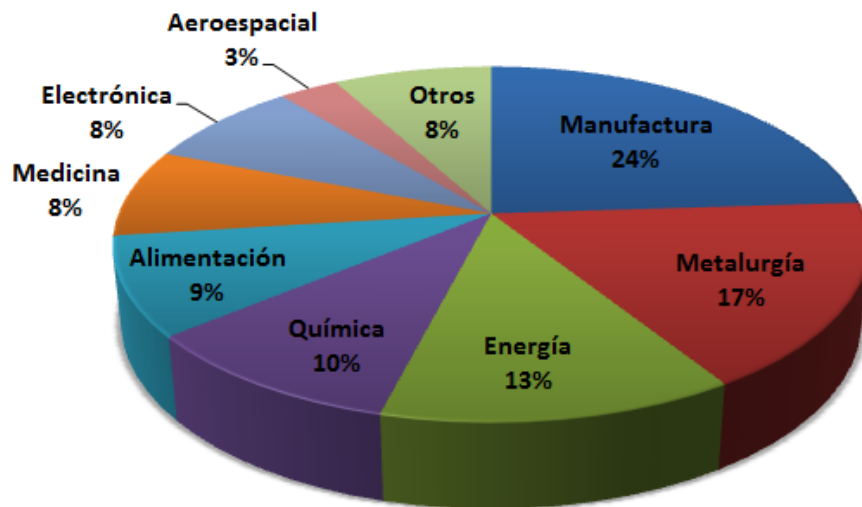


Figura 2.1. - Principales mercados a los que suministra Praxair

A nivel continental, la Figura 2.2 muestra cuál es la situación de la empresa en Europa, donde se puede apreciar cómo está presente en la mayoría de los países de nuestro entorno. Mientras que a nivel nacional, el enclave de Asturias es uno de los más importantes, contando actualmente con cuatro plantas, las cuales se encargan de generar casi la totalidad del argón producido por Praxair en España.

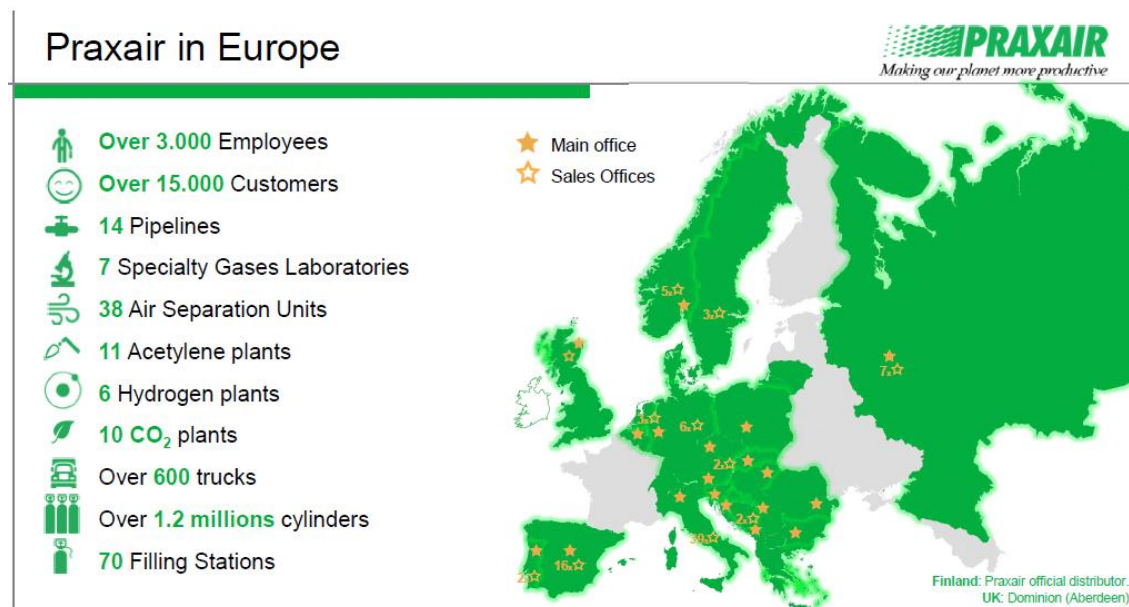


Figura 2.2. - Situación de Praxair en Europa

Dentro de su catálogo de productos, Praxair cuenta con una gran variedad de gases diferentes, los cuales se pueden agrupar principalmente en tres tipos:

- Gases atmosféricos: son los derivados del aire como por ejemplo el oxígeno, el nitrógeno o el argón.



- Gases de proceso: son los derivados de un proceso industrial o del gas natural como por ejemplo el hidrógeno, el dióxido de carbono o el acetileno.
- Gases especiales: son los gases utilizados para aplicaciones electrónicas y de instrumentación como por ejemplo arsina o fosfina.

Para la producción de estos gases, Praxair cuenta con las siguientes tecnologías, siendo las dos primeras las más utilizadas en España:

- Separación criogénica del aire. En ellas los gases componentes del aire se separan mediante destilación, debido a que la temperatura del mismo disminuye por debajo de la temperatura de ebullición de algunos de sus componentes, haciendo que unos se condensen antes que otros, por lo que los gases producidos salen en estado líquido y a una temperatura mucho menor de la ambiental. Las cuatro plantas instaladas en Asturias son de este tipo. Su principal ventaja frente a otro tipo de plantas es la gran pureza que consiguen, siendo por ejemplo para el nitrógeno o el oxígeno superior al 99%.
- Separación de aire no criogénico. En ellas se separa el oxígeno o el nitrógeno de los demás componentes del aire mediante un proceso de adsorción, sin necesidad de disminuir su temperatura por debajo de su punto de ebullición. Las VPSA de oxígeno o las plantas de membrana de nitrógeno son un ejemplo de este tipo de plantas. Éstas son plantas de fácil operación y menor tamaño que las anteriores, pero tienen el inconveniente de que la pureza del gas producido es menor que las de tipo criogénico (para el oxígeno, por ejemplo, sólo alcanzan el 94% de pureza como máximo, mientras que las criogénicas superan el 99%).
- Control de la atmósfera.
- Disolución de gas.
- Separaciones gas-líquido.
- Tecnología de oxidación (combustión).
- Refrigeración.
- Producción y purificación de hidrógeno.
- Captura y purificación de dióxido de carbono.

Una vez producido el gas, Praxair también se encarga de su suministro a los clientes, para lo cual cuenta con diferentes métodos:

- “Packaged gases”. Es el suministro con botellas y permite gran flexibilidad porque sirve para cualquier tipo de gas y se pueden transportar por carretera en un camión normal. El problema es su bajo volumen de transporte, lo que incrementa su coste para grandes cantidades.
- “Bulk liquid gases”. Es el transporte a granel en camiones cisterna donde el producto va en estado líquido y en condiciones de alta presión y baja



temperatura. Se utiliza para oxígeno, nitrógeno, argón, dióxido de carbono, hidrógeno y helio.

- Distribución por tubería. Permite suministrar grandes volúmenes de gas de manera continua, rápida y económica. Se utiliza para suministrar oxígeno, nitrógeno, hidrógeno, monóxido de carbono y aire a grandes clientes. En Asturias se utiliza este tipo de distribución para el suministro a las plantas de Arcelor Mittal y a Dupont. Desde las plantas de Gijón se suministra por tubería oxígeno a y nitrógeno a la planta de Arcelor Mittal en Veriña. Desde la planta de Tabaza se suministra oxígeno a Dupont y nitrógeno a Dupont y a la planta de Arcelor Mittal en Avilés. Desde la planta de Avilés se suministra oxígeno y argón a la planta de Arcelor Mittal en Avilés y nitrógeno a Arcelor Mittal de Avilés y a Dupont. A su vez todas las plantas de Praxair en Asturias están conectadas entre ellas por una tubería de oxígeno.
- Plantas in situ. Son aquellas plantas que se ubican dentro de la instalación del propio cliente al que suministran. Pueden ser criogénicas, no criogénicas o de gases especiales. Las plantas no criogénicas como las VPSA suelen ser instalaciones de este tipo ya que aunque no producen oxígeno con purezas tan elevadas como las criogénicas, su reducido tamaño y fácil operación las hace óptimas para trabajar como plantas in situ controladas por el cliente.



3.- EL PROCESO DE SEPARACIÓN DE AIRE

3.1.- Composición del aire y su aprovechamiento industrial

La composición del aire en las capas inferiores de la atmósfera es prácticamente constante en cualquier lugar de la Tierra. Así la composición habitual del aire en base seca a nivel del mar es la que se recoge en la Tabla 3.1.

Componente	Porcentaje en volumen
Nitrógeno	78,084
Oxígeno	20,946
Argón	0,934
Dióxido de carbono	0,035
Neón	0,001818
Helio	0,000524
Metano	0,000179
Kriptón	0,000114
Hidrógeno	0,000055
Óxido nitroso	< 0,00003
Monóxido de carbono	< 0,00001
Xenón	< 0,000009
Ozono	< 0,000007
Dióxido de nitrógeno	< 0,000002
Yodo	< 0,000001
Amoníaco	< 0,0003

Tabla 3.1. - Composición del aire

No obstante el aire ambiental no está realmente seco, sino que cuenta con un cierto porcentaje de humedad, en forma de vapor de agua. Así, este porcentaje en volumen del vapor de agua dentro del aire en base húmeda a nivel del mar se encuentra entre el 1 y el 4%. Este dato es importante ya que demuestra que el agua es el cuarto componente mayoritario del aire.

Las diferentes propiedades de estos gases que componen el aire provocan que cada uno de ellos se utilice en distintos ámbitos dentro de la industria.



- **Nitrógeno.**

Junto con el potasio y el fósforo son los principales nutrientes de los vegetales. Estos lo toman del suelo, donde determinado tipo de bacterias lo fijan del aire, pasándolo a nitrógeno combinado en moléculas más o menos complejas pero solubles en agua y asimilables por las plantas. La fertilización artificial del suelo agrícola requiere el aporte de nitrógeno en forma amoniacal, de nitratos o de urea, entre otras. La primera materia para la producción de fertilizantes nitrogenados es el amoníaco que se produce industrialmente a partir del nitrógeno del aire, por reacción química con el hidrógeno.

Asimismo, en la industria química y en otras similares como la alimentaria, el nitrógeno gas se utiliza para inertizar atmósferas, evitando la presencia del aire que podría dar lugar a mezclas explosivas. Este proceso se conoce como "blanketing" y se basa en el barrido con nitrógeno de depósitos, reactores, equipos y tuberías en la industria química para limpiarlo de aire. Este gas también se utiliza para evitar degradaciones de tipo oxidativo, como en el caso de los alimentos envasados en atmósferas inertes con nitrógeno.

También se usa en estado puro o acompañando al oxígeno como diluyente en las reacciones químicas. En estado líquido encuentra aplicaciones minoritarias como refrigerante en la congelación de alimentos o en aplicaciones medicinales.

- **Oxígeno.**

Se utiliza en forma de aire enriquecido como comburente en la producción de energía por combustión, por ejemplo en centrales térmicas. Como oxidante encuentra aplicación en las industrias siderúrgica (proceso LD) y metalúrgica (sopletes de oxicorte y soldadura autógena). Otra de sus principales aplicaciones es la depuración de agua, además de su importante papel en otras industrias (química, aviación, aeroespacial, medicinal, etc).

El oxígeno resulta más costoso producirlo cuanto mayor sea la pureza requerida. De esta forma, la principal clasificación de los tipos de oxígeno se hace en función de su nivel de pureza:

- Aire enriquecido: porcentaje de oxígeno entre el 85 y el 95 %.
- Oxígeno de baja pureza: porcentaje de oxígeno entre el 95 y el 98,5 %.
- Oxígeno de alta pureza: porcentaje de oxígeno superior al 98,5 %.

- **Argón.**

Se utiliza en la soldadura bajo argón de aceros inoxidables y otros metales como el aluminio, en donde no se pueden utilizar oxígeno o nitrógeno porque producirían óxidos o nitruros respectivamente. También se utiliza para llenar lámparas especiales. Asimismo las mezclas de argón y oxígeno se utilizan para descarbonar aceros inoxidables (ELC o Extra Low Carbon).



- **Neón.**

Se utiliza mezclado con helio en atmósferas artificiales para la presurización y despresurización de buceadores y submarinistas, así como en el llenado de lámparas y tubos de iluminación para anuncios. Además cuenta con otras aplicaciones como la construcción de sistemas de rayos X.

- **Helio.**

Se usa principalmente en laboratorios de investigación (superconductividad, equipos de resonancia magnética nuclear, etc). No obstante, no se suele obtener del aire, ya que se separa más fácilmente del gas natural, al que acompaña en algunos yacimientos en forma de componente minoritario.

3.2.- Evolución del proceso de separación de aire

Analizando el aire como una mezcla de gases, se puede determinar que no contiene azeótropos, lo cual facilita su separación. Se habla de azeótropos o mezclas azeotrópicas cuando dos o más compuestos que forman una mezcla hierven a una temperatura constante, provocando que su mezcla se comporte como si de un solo compuesto se tratase. Así por ejemplo, la mezcla de etanol al 95,6% con agua produce una mezcla azeotrópica, la cual hierve a 78,2 °C. Al comportarse como un único componente, no hierve primero el etanol y luego el agua, sino que lo hacen a la vez, lo que provoca que la proporción de ambos elementos dentro de la mezcla líquida siga siendo la misma.

Al no ser el aire un azeótropo, posibilita la separación de sus tres componentes más abundantes mediante el uso de la destilación fraccionada. Esta técnica ya se viene aplicando en la industria desde hace doscientos años, por lo que ha ido perfeccionándose con los años.

3.2.1.- Licuación del aire

El primer paso para separar el aire en sus principales componentes es la licuación del mismo. Para ello es necesario alcanzar al menos una licuación parcial del aire, para lo que utiliza una combinación de compresiones, enfriamientos y expansiones (efecto Joule-Thomson) con la máxima recuperación posible del frío generado, como etapa previa a su fraccionamiento, el cual se estudiará más adelante. Evidentemente el aire debe estar seco y exento de CO₂ para evitar su solidificación en el interior de los equipos.

A lo largo de los años han aparecido diferentes procesos, los cuales son los siguientes:



- Proceso Linde: se basa en una laminación isentálpica.
- Proceso Claude: se basa en una expansión isentrópica.
- Proceso mixto Linde-Claude: se basas en una combinación de los dos anteriores.

3.2.1.1.- Proceso Linde

La alternativa más simple es la conocida como proceso Linde o proceso regenerativo simple y fue diseñada por Karl von Linde en 1895. Consiste en un ciclo de cuatro etapas, el cual se muestra en la Figura 3.1. Comienza con una compresión isoterma desde el punto A hasta el B, seguida de un enfriamiento isobárico en un intercambiador de calor entre B y C y de una laminación isentálpica entre C y D a través de una válvula estranguladora, obteniéndose una fracción líquida de aire (L) y otra vapor (V). La primera se separa del sistema, mientras que la segunda sirve para enfriar el aire comprimido en un intercambiador de calor, antes de devolverlo a la atmósfera por el punto E.

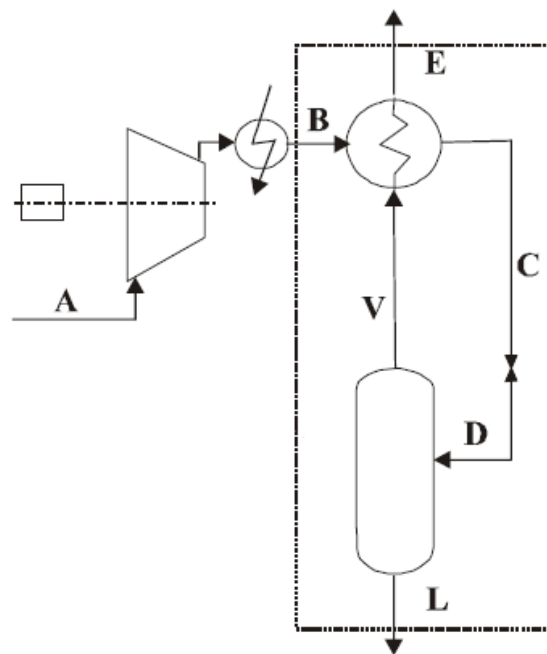


Figura 3.1. - Licuación del aire mediante el proceso Linde

3.2.1.2.- Proceso Claude

Como alternativa a la laminación isentálpica del proceso Linde (entre los puntos C y D), George Claude diseñó en 1902 el proceso que lleva su nombre (Figura 3.2). En él consideró la conveniencia de expandir el aire frío en una máquina térmica en la que se recupera parte del trabajo y se consigue mayor generación de frío. Así, la evolución del aire en la turbina de expansión consigue una mayor eficiencia que en la válvula estranguladora (en un diagrama T-s, la línea que une los puntos C y D en este caso sería más vertical que para el proceso Linde) y se consigue mayor proporción de aire líquido en



igualdad de otras circunstancias. En el caso ideal de un sistema reversible sería una evolución isentrópica.

Esta innovación permitió trabajar a presiones bastante más bajas que con el proceso Linde, reduciendo la inversión de capital necesaria y aumentando la eficiencia energética, proporcionalmente a la mejora del rendimiento iséntropico de la máquina. Esto provocó la rápida implantación de este proceso en lugar del de Linde.

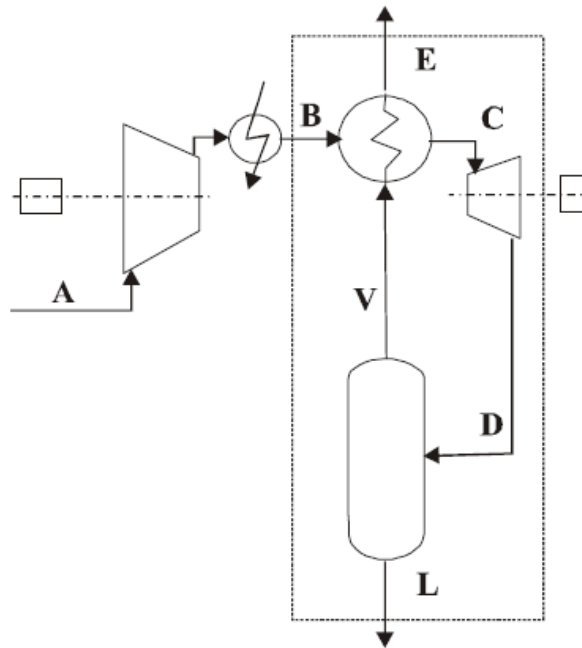


Figura 3.2. - Licuación del aire mediante el proceso Claude

3.2.1.3.- Proceso mixto Linde-Claude

La mejora de la eficiencia energética de las plantas industriales fue paulatina, a medida que se modernizaban sus instalaciones, pero pronto surgieron problemas inesperados debido a la excesiva erosión en la turbina de expansión, ocasionada por las gotas de aire líquido condensado en su interior.

Para solventarlos se recurrió a combinar las ventajas de los dos procesos anteriores, apareciendo el proceso mixto Linde-Claude que aprovecha las ventajas de ambos procesos (Figura 3.3). La fase líquida se separa exclusivamente por laminación en la válvula de laminación, como en el proceso Linde, mientras que la turbina de expansión genera frío como el proceso Claude. Ambos equipos se acoplan dividiendo el caudal de aire en dos fracciones; una que se enfría todo lo posible con el aire de salida del sistema y se somete a una laminación isentálpica, llegando a condensar parcialmente, y una segunda fracción que solo se enfría lo necesario para que, al expandirse en la máquina, llegue a las proximidades de la curva de saturación de la fase vapor. En definitiva, la laminación produce la licuación, mientras que la expansión, además de producir frío, recupera energía.

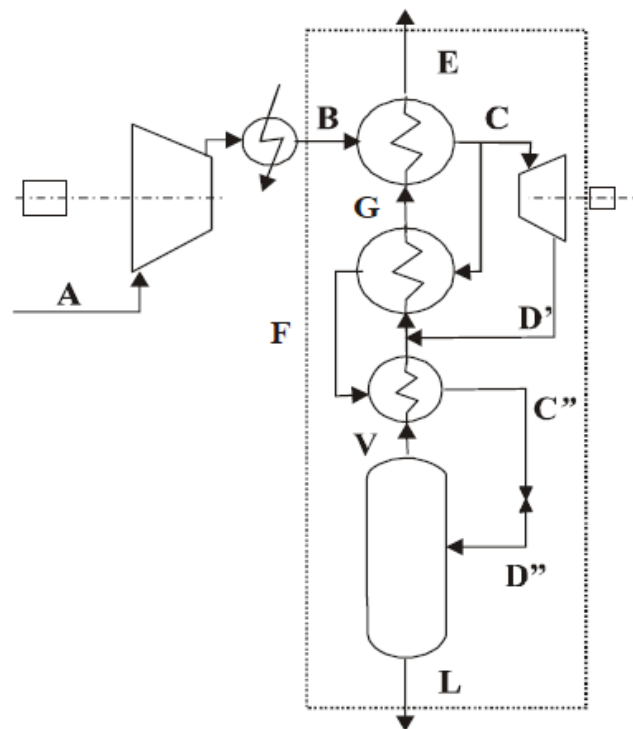


Figura 3.3. - Licuación del aire mediante el proceso mixto Linde-Claude

Con estos avances se incrementó notablemente la eficiencia del proceso de producción de aire líquido, pasando de unos valores en torno al 7 % para el proceso Linde a valores en torno al 30 % para el proceso mixto Linde-Claude.

3.2.2.- Destilación fraccionada criogénica

El aire líquido es un producto químico que ya sólo se suministra a un mercado minoritario. En sus principales aplicaciones industriales ha sido sustituido por sus distintos componentes, debido a que su fraccionamiento es relativamente barato. Efectivamente, la diferencia de composición entre las fases vapor y líquida en equilibrio del aire licuado a presiones por encima de la atmosférica permite la fácil separación de sus componentes mayoritarios en columnas convencionales de destilación a baja temperatura (temperaturas criogénicas).

En las unidades más sencillas se separan tres fracciones: oxígeno, nitrógeno de alta pureza y un nitrógeno residual de baja pureza que se devuelve a la atmósfera. Las dos primeras pueden obtenerse en fase vapor a temperaturas próximas a la ambiente, o en fase líquida a bajas temperaturas. Por el contrario, la tercera siempre se separa en fase gas. Además, se puede separar con relativa facilidad una fracción de argón bruto con oxígeno, que posteriormente se purifica en una instalación anexa.



3.2.2.1.- Separación criogénica de componentes mayoritarios en fase gas mediante sistemas regenerativos simples de Linde.

La alternativa más simple de fraccionamiento, la cual apareció a comienzos del siglo XX, consiste en el empleo de una única columna que trabaja a una presión ligeramente por encima de la atmosférica, en la que se introduce el aire frío después de someterlo a una laminación, de la cual quedará parcialmente licuado. En la Figura 3.4 se puede ver un esquema de este sistema. A la vez que se conseguía un agotamiento del nitrógeno en el oxígeno de la corriente del fondo, se producía un aire enriquecido en oxígeno.

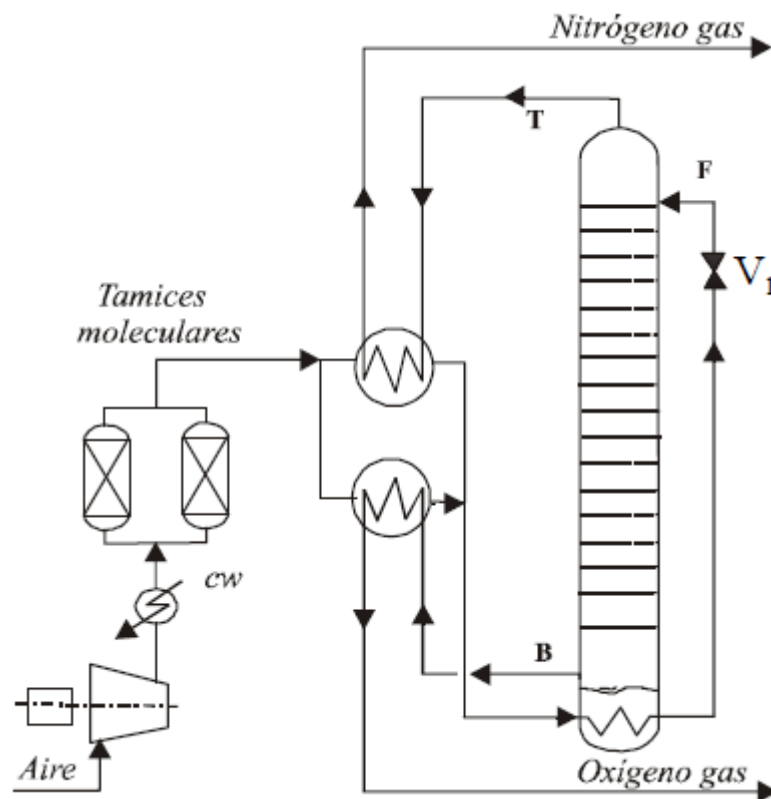


Figura 3.4. - Instalación de fraccionamiento con columna única de agotamiento (proceso Linde)

El oxígeno se extrae como gas por encima de la superficie del líquido del hervidor (punto B) y su concentración sólo puede llegar al 95 %, pues lleva consigo casi todo el argón. Por otra parte, dado que no se dispone de un reflujo líquido frío que introducir por encima de la alimentación, no resulta posible rectificar la fracción de vapor que sale por cabeza (T) y que posee una concentración de nitrógeno próxima al 90 % en volumen. Ambas fracciones intercambian frío con el aire comprimido de alimentación. No obstante, este proceso posee dos inconvenientes importantes que son la baja pureza del nitrógeno obtenido y su elevado consumo energético.

El desarrollo tecnológico más importante que se logró al cabo de unos años consistió en realizar la destilación en dos columnas dispuestas en serie, en vez de en una sola (Figura



3.5). La primera se mantenía a la presión de 6,5 ata (aproximadamente 6,5 barA), y de ella se obtenían dos fracciones, una de oxígeno enriquecido, por el fondo y otra de nitrógeno por cabeza. Ambas fracciones se laminaban por separado (válvulas V_2 y V_3) y se introducían en la columna de baja presión (dispuesta encima de la otra), que se encontraba en torno a 1,5 ata (aproximadamente 1,5 barA) para llevar a cabo una segunda destilación. La gran ventaja de esta disposición de doble columna reside en que, manteniendo esa diferencia de presión, puede transmitirse calor desde la cabeza de la columna de alta presión al fondo de la de baja presión mediante un equipo condensador-evaporador, conocido como calandria.

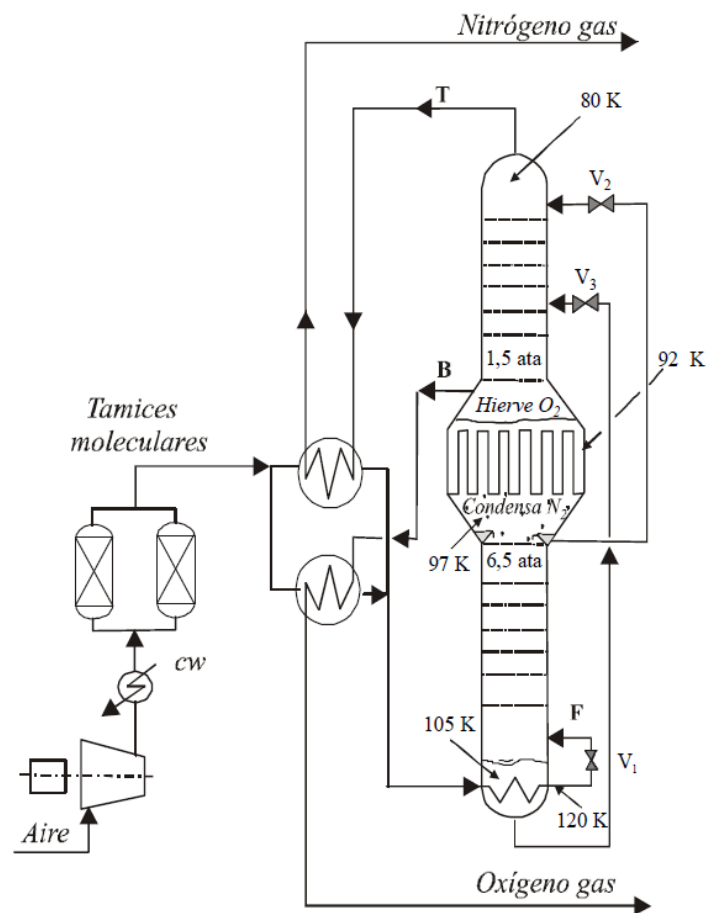


Figura 3.5. - Proceso con doble columna de fraccionamiento y laminación (proceso Linde)

Ahora los vapores ascendentes por la columna inferior pueden rectificarse con parte del condensado conseguido en la calandria como reflujo y se obtiene un nitrógeno mucho más puro, que se extrae en fase líquida y se lamina en V_2 , para acabar de rectificarlo en la columna superior a baja presión, saliendo por cabeza (T).

El líquido de fondo de la columna inferior se lamina en V_3 y también se introduce en la columna superior, generando frío. La fase líquida, rica en oxígeno se agota en la sección inferior de la columna superior de baja presión, pero la concentración del oxígeno vapor



que se separa por encima del nivel de líquido (B) no puede ser mayor de 95% debido al presencia de casi todo el argón del aire de alimentación. Mientras tanto, en el fondo de la columna de alimentación la concentración es del orden del 40 % de oxígeno.

La presión a la que hay que comprimir el aire es del orden de 65 ata para compensar las pérdidas de energía en las tres laminaciones, cuando teóricamente debería ser suficiente comprimir el aire a unas 7 ata para compensar las pérdidas a través del aislamiento térmico y las de recuperación del frío en los intercambiadores. Evidentemente, esta mejora energética debe conseguirse sustituyendo las laminaciones por expansiones en máquinas térmicas.

3.2.2.2.- Separación criogénica de componentes mayoritarios en fase gas mediante procesos mixtos Linde-Claude.

El acoplamiento de una máquina expansora ha sido probado a escala industrial en distintas posiciones. La más sencilla es la que se muestra en la Figura 3.6, expandiendo parte del aire comprimido y frío con su escape conectado a la columna de baja presión. Dicho proceso, que todavía se aplicaba a mediados del siglo XX, permitía la producción de cierta cantidad de nitrógeno gas de alta pureza (1 ppm de O_2) y oxígeno gas del 99,5%, comprimiendo el aire a 6,8 ata y con descarga a la atmósfera de un nitrógeno residual (en torno a la mitad del nitrógeno total que entraba al sistema con el aire) con un 2,4 % de O_2 y la mayor parte del argón del aire.

Dada la baja presión a la que se comprime el aire en este proceso (6,8 ata), no merece la pena laminarlo a la entrada de la columna de alta presión, por lo que se suprime la válvula de expansión V_1 . El frío correspondiente a esta evolución isentálpica se obtiene expansionando el 15-20% de la alimentación directamente hacia la columna de baja presión a través de una turbina de expansión que recupera energía. Ese frío se transmite a la columna inferior a través de la calandria, produciendo una buena cantidad de reflujo de nitrógeno que se emplea en las dos columnas.

Puede observarse que en este proceso el secado y descarbonatación del aire se hace por solidificación en dos intercambiadores de calor reversibles en vez de hacerlo mediante tamices moleculares, que es una tecnología relativamente moderna. Al enfriarse el aire húmedo y cargado de CO_2 que pasa a través de uno de ellos se forma hielo en sus paredes, de modo que a la salida está casi completamente seco. Antes de que se atasque, se cambia el flujo de aire al segundo intercambiador y ahora se hace pasar el nitrógeno residual por el primero de ellos para que el hielo se sublime y quede dispuesto para un nuevo ciclo de secado. El cambio periódico de flujo se hace mediante un juego de válvulas reversibles.

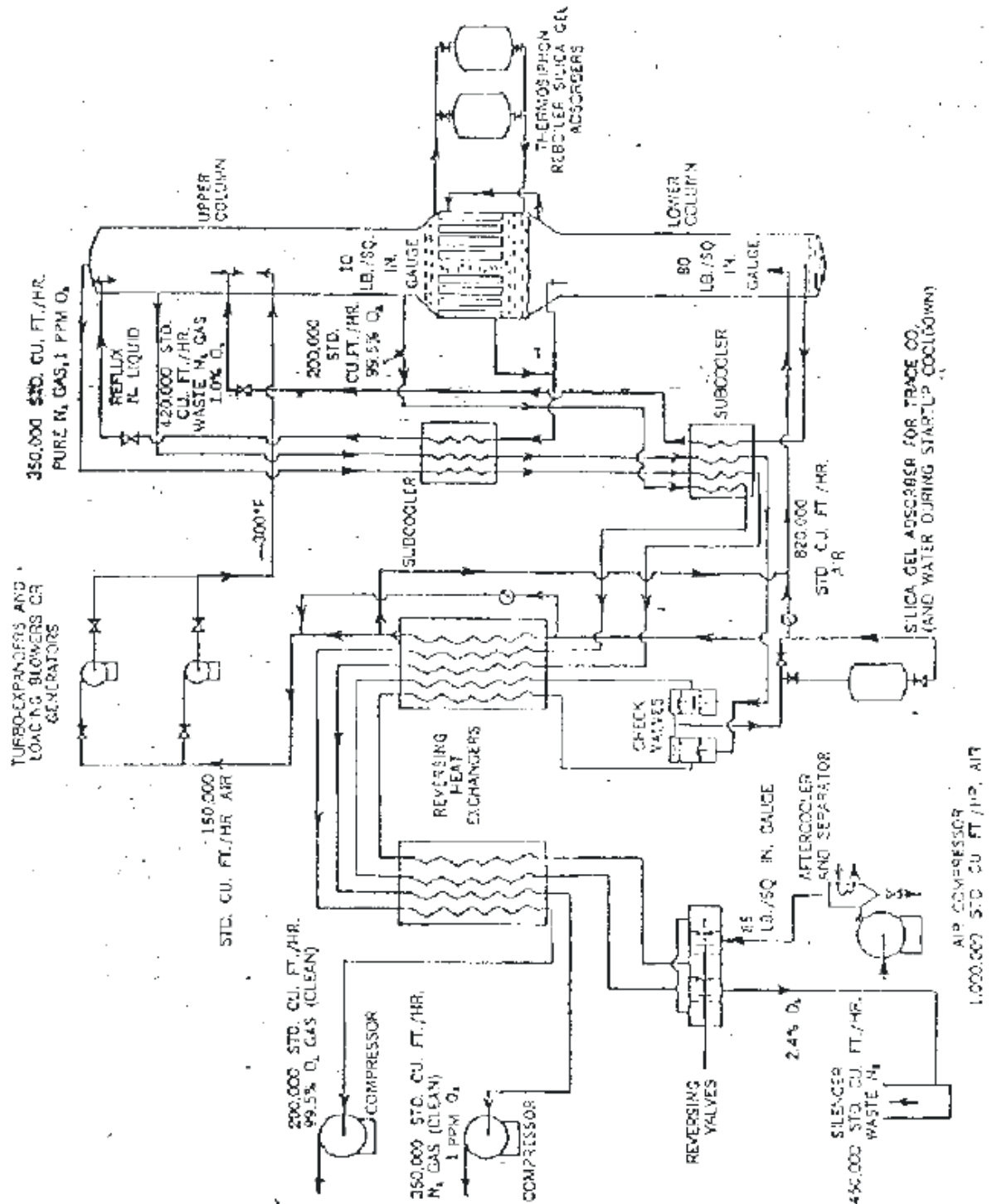


Figura 3.6. - Esquema del proceso de una planta de producción de nitrógeno gas de alta pureza y oxígeno gas de 99,5 % de pureza



3.2.2.3.- Separación criogénica de componentes mayoritarios en fase líquida mediante procesos mixtos Linde-Claude.

Las plantas que producen oxígeno y/o nitrógeno líquido requieren un aporte adicional de energía para compensar la diferencia de entalpía que tienen los gases calientes a los líquidos fríos, es decir, la presión que debe dar el compresor es muy superior, del orden de 170-200 ata, a pesar del mejor aprovechamiento que supone la instalación de una turbina de expansión.

En el diagrama del proceso de la Figura 3.7 se puede comprobar que la máquina expansora se dispone en paralelo con la válvula de laminación V_1 . A diferencia del proceso anteriormente descrito, la descarga de esta máquina se mezcla con el aire laminado y se introduce en la columna de alta presión. El nitrógeno puro (solo 1 ppm de oxígeno) sale de la parte alta de la columna de alta presión, mientras que el oxígeno, con una pureza del 99,5 al 99,95 % sale del hervidor de la columna de baja presión. El argón, por su parte, escapa con el nitrógeno residual que se devuelve a la atmósfera.

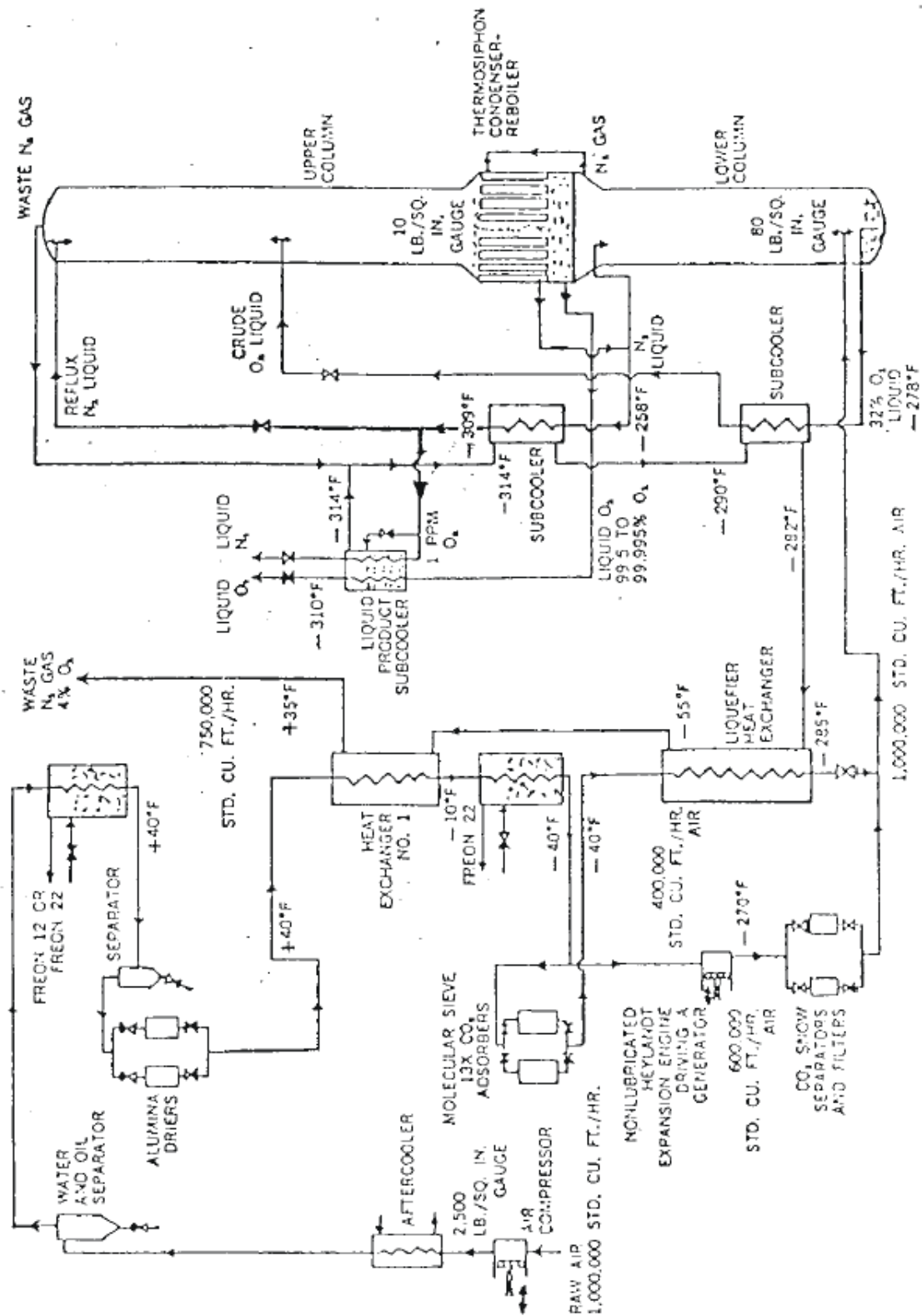


Figura 3.7. - Esquema del proceso de alta presión para la obtención de nitrógeno y oxígeno criogénicos



Posteriormente se acoplaron a las plantas de fraccionamiento con producción de gases unas unidades de licuación de oxígeno y de nitrógeno. Sin embargo, pronto se reconoció que sólo era necesaria la planta de licuación de nitrógeno, pues disponiendo de un fuerte reflujo de nitrógeno en la columna superior se podía extraer, si fuera necesario, la totalidad del oxígeno en fase líquida.

En definitiva, el proceso integrado con la unidad de licuación de nitrógeno, también conocida como unidad de reciclaje es el que se muestra en la Figura 3.8. El compresor de aire principal es el estrictamente necesario para sacar toda la producción de la planta en estado gaseoso. Pero además poniendo en marcha la unidad de licuación de nitrógeno y ajustando los valores de los reflujos se puede sacar una gran parte de la producción tanto de nitrógeno como de oxígeno en fase líquida.

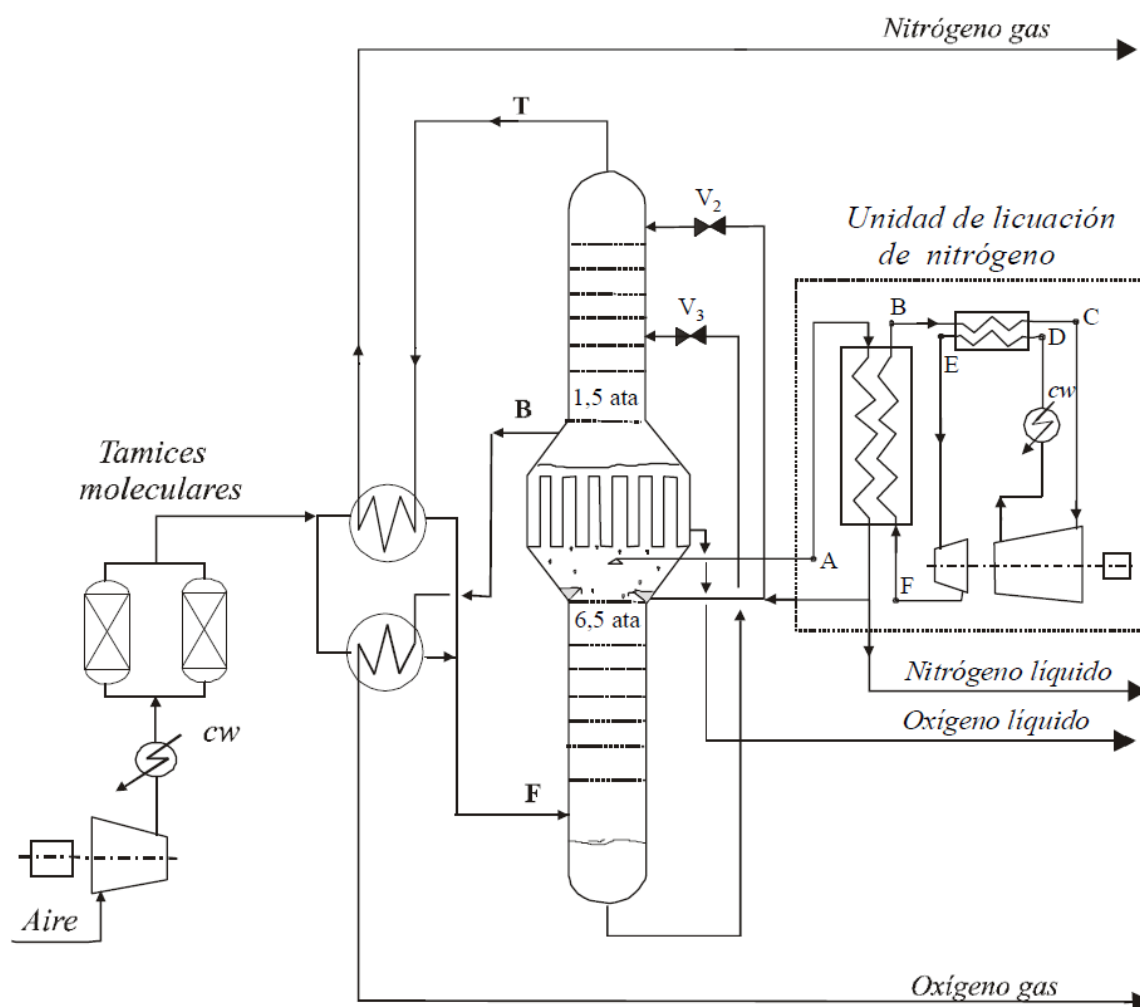


Figura 3.8. - Acoplamiento de una unidad de licuación de nitrógeno a una planta de doble columna

El siguiente paso consistió en integrar el circuito de nitrógeno del sistema de licuación, que era un circuito cerrado de difícil regulación, con la corriente de nitrógeno a licuar, tal y como se indica en la Figura 3.9.

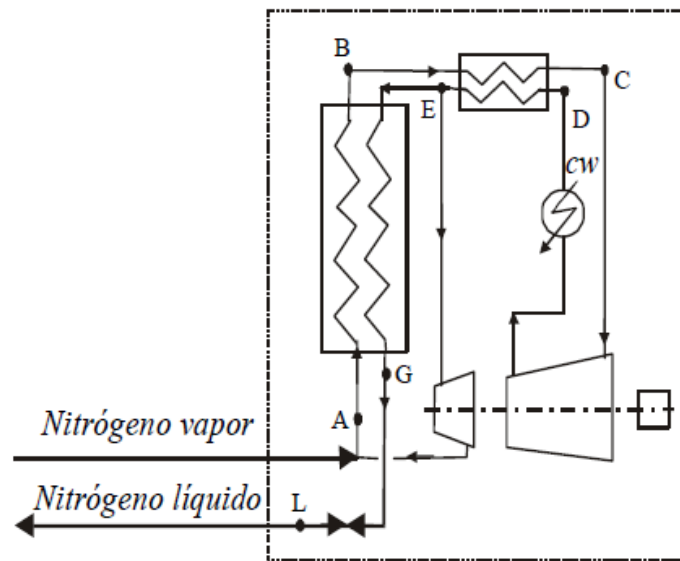


Figura 3.9. - Unidad de licuación de nitrógeno integrada en el proceso

3.2.2.4.- Separación y purificación de argón

Además, cuando se quiere obtener argón como subproducto, se extrae una corriente de aire de la columna superior a la altura del plato donde se produce el porcentaje máximo de argón (un 12% aproximadamente) y hay poco nitrógeno presente. Este vapor se rectifica separadamente en una columna auxiliar, denominada columna de argón bruto, cuya salida por colas vuelve a la columna principal. En la cabeza se dispone un condensador parcial, utilizando como fluido refrigerante parte del aire enriquecido del fondo de la columna a presión. El líquido producido en esta evaporación “flash” se evapora por el calor que toma del argón bruto saliente por cabeza de la columna, que condensa en parte para constituir el reflujo de la columna.

El argón no condensado se saca como producto por cabezas con una pureza en torno al 98 %. El oxígeno que acompaña esta corriente se puede separar por medios químicos, como por ejemplo un reactor DESOXO donde se mezcla esta corriente con hidrógeno para que reaccione con el oxígeno formando agua.

Seguidamente se muestra el esquema de una planta de separación de aire con separación de argón en la Figura 3.10.

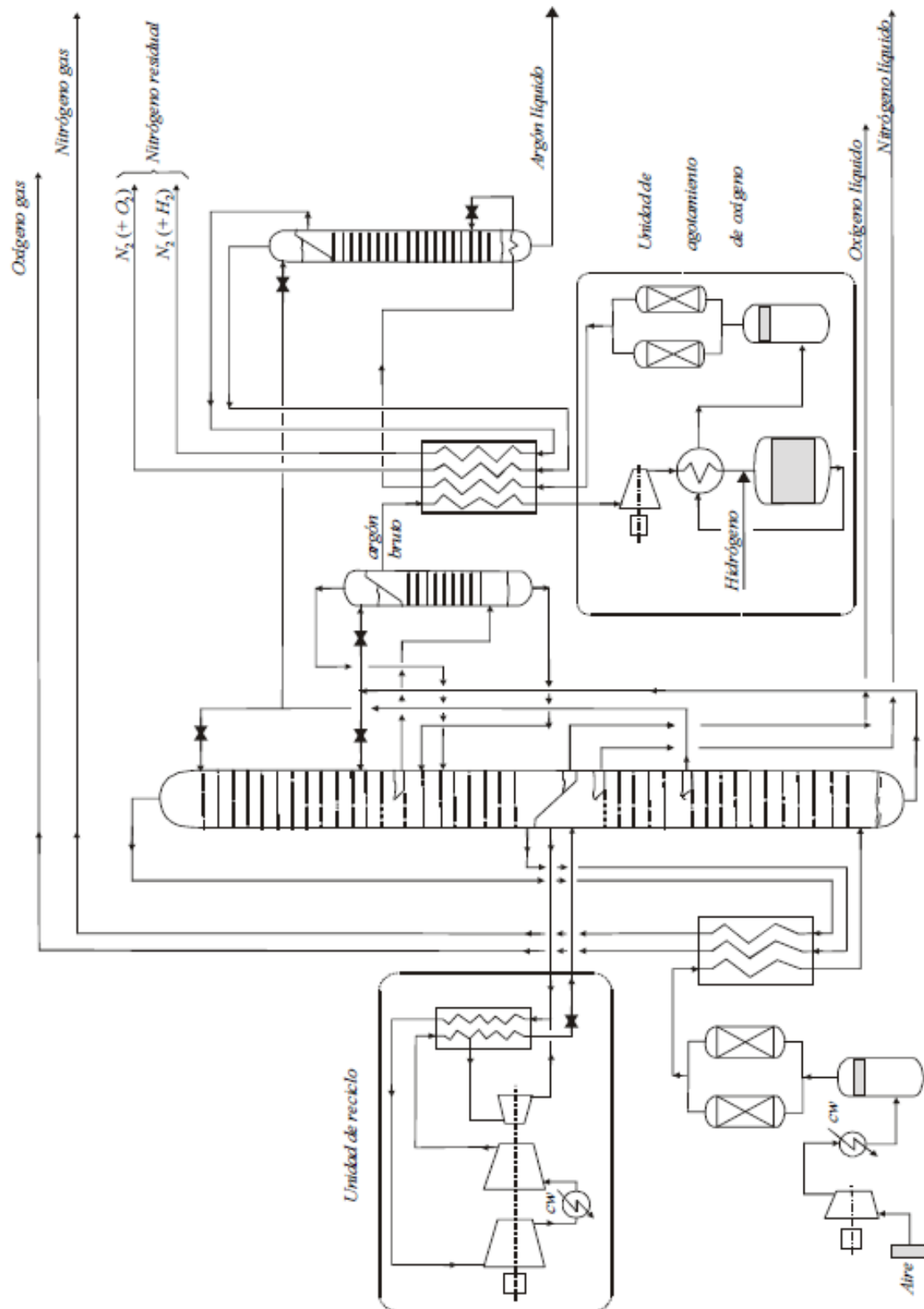


Figura 3.10. - Esquema de una planta de separación de aire con extracción de los componentes mayoritarios en fase gas y líquida y argón en fase líquida



3.2.3.- Separación de aire por métodos no criogénicos

Actualmente, muchas de las empresas dedicadas a la separación de aire, Praxair entre ellas, están invirtiendo gran cantidad de dinero y esfuerzo en mejorar las técnicas de separación de aire por métodos no criogénicos. Principalmente aparecen la adsorción con ciclos de presión o PSA (“Pressure Swing Adsorption”) y la permeación a través de membranas poliméricas.

Aunque estas nuevas tecnologías todavía no son competitivas con la producción mediante métodos criogénicos, su menor infraestructura ha provocado un incremento en su aplicación industrial, sobre todo para producir nitrógeno y en menor medida para la producción de oxígeno. No obstante, estas técnicas poseen aún dos importantes inconvenientes. Todavía no son capaces de alcanzar las purezas de las plantas criogénicas, siendo cercanas en el caso del nitrógeno, pero más lejanas en el del oxígeno (94 % de las no criogénicas frente a más del 99 % de las criogénicas) y su menor nivel de producción. Esto provoca que cuando se necesita una gran cantidad de producción o un nivel alto de pureza aún haya que recurrir a las plantas de tipo criogénico.

No obstante, en esta memoria no se entrará a explicar estas técnicas con mayor profundidad, ya que su proceso difiere bastante del estudiado y su extensión daría para otro proyecto, quedando así éstas fuera del alcance del proyecto.

3.3.- Sistemas de compresión de aire

Si algo poseen en común todos estos procesos de separación criogénica de aire es su primera parte, la cual siempre consta de un sistema de compresión de aire para elevar la presión del aire desde su valor atmosférico hasta el que sea necesario en cada caso.

Dada la importancia de estos sistemas dentro del proceso de separación de aire, así como dentro de este proyecto del cual son el eje principal del mismo, se dedicará este apartado a hacer una pequeña introducción de los mismos, los tipos de los que se usan habitualmente en estas instalaciones y las ventajas e inconvenientes de cada uno.

3.3.1.- Descripción general de un sistema de compresión de aire

Cualquier sistema de compresión de aire de una planta de separación criogénica de aire consta de una estructura similar. Todos ellos están formados por una serie de etapas de compresión con enfriamientos intermedios entre las distintas etapas y un postenfriador al final de todas las etapas de compresión.



3.3.2.- Tipos de compresores

El componente principal de cualquier sistema de compresión son sus compresores. Éstos pueden ser de muy diversos tipos, sin embargo en los procesos de separación de aire predominan mayormente tres, los cuales se explican a continuación.

3.3.2.1.- Compresores centrífugos

Este tipo de compresores utiliza los álabes de un rodete giratorio para comprimir el aire por medio de la fuerza centrífuga. El número de rodetes es igual al número de etapas de compresión. En la Figura 3.11 se puede apreciar cómo sería un compresor de este tipo con parte de su voluta cortada para ver el rodete del interior del mismo.



Figura 3.11. – Compresor centrífugo

La capacidad de un compresor centrífugo está controlada normalmente por una válvula de control en la aspiración o por la posición de los álabes giratorios a su entrada. Como se verá más adelante, los compresores estudiados en este proyecto contarán con álabes guía en las etapas de compresión impares para regular su flujo.

Los compresores centrífugos tienen un rango de funcionamiento estable limitado. Cuando funcionan por debajo de este rango, se produce un fenómeno conocido como oleaje o bombeo. Este fenómeno ocurre cuando el flujo que circula a través del compresor es insuficiente, provocando que la presión de descarga sea superior a la presión generada



en la salida del compresor, y la dirección del flujo se invierte momentáneamente. Ahora bien, tan pronto como la dirección del flujo se invierte, desciende la aportación de presión y se reanuda la dirección normal del flujo, repitiendo esta acción indefinidamente. Este efecto de oleaje provoca un aumento excesivo de la temperatura en el gas comprimido, ya que cada vez que pasa por el compresor el aire se calienta aún más, lo que favorece el oleaje y somete al compresor a vibraciones y tensiones dañinas, lo cual disminuye su vida útil.

Su funcionamiento se basa en que las paletas del rodete aumentan la velocidad del gas comprimido y el giro del mismo empuja el gas hacia fuera a causa de la fuerza centrífuga. A medida que el gas se desplaza por el rodete, su temperatura va aumentando hasta que llega al borde de éste, de donde sale a gran velocidad. El gas se recoge entonces alrededor del rodete en un espacio denominado difusor y se dirige hacia la voluta. En el difusor y la voluta se produce una desaceleración de la alta velocidad del gas y su energía cinética se convierte en presión (ecuación de la energía) a medida que se acumula el gas en este espacio reducido. Es importante destacar que la velocidad máxima del gas que sale de rotor depende de la velocidad periférica y del diámetro del rotor. Asimismo esta velocidad periférica viene determinada por la velocidad de giro del motor y la relación de transmisión.

La fuerza centrífuga máxima que puede transmitirse al gas depende de la masa y de la velocidad del gas cuando sale del rodete. Como la fuerza centrífuga existente determina la presión máxima disponible, y la fuerza centrífuga depende de la masa del gas, que a su vez lo hace de la densidad, y de la velocidad del rodete, se deduce que, si la velocidad de la máquina es constante (la mayoría de las máquinas empleadas en este sector tienen una velocidad fija), la presión de salida de la voluta dependerá de la densidad del gas. A su vez esta densidad depende de otros factores, ya que por ejemplo es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura (ley de los gases ideales).

Ventajas de los compresores centrífugos:

- Los costes globales de mantenimiento de los compresores centrífugos son más bajos que los de un compresor alternativo de la misma capacidad.
- Los compresores centrífugos tienen mayor capacidad volumétrica por unidad de espacio construido que las máquinas alternativas equivalentes.
- Los compresores centrífugos suministran un flujo de aire comprimido constante y sin intermitencias en su rango de funcionamiento estable.
- En condiciones normales, es habitual que los compresores centrífugos funcionen ininterrumpidamente durante 2 o 3 años.

Inconvenientes de los compresores centrífugos:

- Los compresores centrífugos tienen un rango de funcionamiento estable limitado. Esto provoca que cuando el caudal de aire es bajo, sea preciso



ventear aire comprimido a la descarga del compresor para evitar el bombeo/oleaje y mantener el funcionamiento dentro de los niveles de estabilidad.

- En casos de baja demanda tienen un importante sobrecoste de funcionamiento innecesario debido al aire venteadado.
- Los cambios significativos de las condiciones atmosféricas (por ejemplo, la densidad del aire, la temperatura y la humedad relativa) alteran las características de funcionamiento de un compresor centrífugo (por ejemplo, el caudal, la presión y las curvas de bombeo).

3.3.2.2.- Compresores de tornillo

Los compresores de aire rotativos de tornillo son máquinas de desplazamiento positivo. Estos emplean un sistema de dos rotores para comprimir el aire. Poseen un rotor macho formado por lóbulos, que son los salientes convexos del rotor, y un rotor hembra formado por alveólos que son las ranuras cóncavas del rotor. El aire penetra en los espacios situados entre los lóbulos convexos del rotor macho y las correspondientes ranuras cóncavas del rotor hembra. Al girar los rotores, los lóbulos penetran en las ranuras y desplazan, comprimen y empujan el aire hacia el punto de descarga. En la Figura 3.12 se puede apreciar cómo sería un compresor de tornillo, con ambos rotores, el rotor macho con sus lóbulos (abajo) y el rotor hembra con sus alveólos (arriba).



Figura 3.12. – Compresor de tornillo

Los dos tipos principales de compresores de aire de tornillo son los de tornillo seco y los de tornillo lubricado con aceite. Para evitar contaminar el aire, los de tornillo lubricado cuentan con separadores de aceite y filtros para eliminar el aceite del aire comprimido una vez que éste sale del compresor. La capacidad de este tipo de compresores se controla principalmente por una válvula de corredera que permite la recirculación del aire comprimido hasta la aspiración del compresor y por una válvula de control de admisión de aire.



Ventajas de los compresores de tornillo:

- Para trabajar con caudales situados en el tramo inferior del rango de los compresores centrífugos, los compresores de tornillo son más eficientes que éstos.
- Para trabajar con caudales situados en el tramo superior del rango de los compresores alternativos, los compresores de tornillo son más eficientes que éstos.
- No se necesita una cimentación tan sólida y los costes de instalación son menores que los de los compresores alternativos, ya que no poseen unas cargas desequilibradas tan grandes.
- Los compresores de tornillo ocupan menos espacio que un compresor alternativo de capacidad similar.

Inconvenientes de los compresores de tornillo:

- Es necesario respetar escrupulosamente los límites de temperatura debido a los estrechos márgenes de tolerancia de sus piezas. Cualquier desviación con respecto a éstos causará una rápida disminución de su rendimiento.
- Poseen reparaciones costosas y prolongadas debido a su diseño y sus márgenes de tolerancia.

3.3.2.3.- Compresores alternativos

Los compresores de aire alternativos emplean el movimiento de avance y retroceso de un pistón en un cilindro para comprimir el aire. Al igual que ocurría con los de tornillo, estos también son máquinas de desplazamiento positivo. Los compresores de este tipo que poseen varias etapas tienen un cilindro y un pistón para cada una de ellas. En la Figura 3.13 se puede ver un ejemplo de este tipo de compresores.



Figura 3.13. – Compresor alternativo

Los compresores de aire alternativos se utilizan para satisfacer las necesidades de caudales medias y bajas con un amplio abanico de presiones. Este caudal es generalmente constante, y está determinada por el tamaño del compresor y la velocidad de giro de su cigüeñal. Normalmente, la presión de descarga se controla con una válvula de venteo.

En el cabezal del cilindro hay al menos una válvula de admisión y una válvula de descarga, las cuales funcionan de la misma manera que lo harían en el cilindro de un motor de combustión interna. Cuando el pistón retrocede, la válvula de descarga se mantiene cerrada por el aire comprimido que hay aguas abajo de ella y penetra aire en el cilindro a través de la válvula de admisión. Cuando el pistón avanza comprimiendo el aire, la válvula de admisión se mantiene cerrada por el aumento de la presión en el interior del cilindro y la que se abre es la de descarga, dejando salir por ella el aire comprimido, cuando éste supera la presión que hay aguas abajo de la válvula.

La acción alterna de un compresor alternativo produce pulsaciones de presión tanto en la aspiración como en la descarga, provocando tensiones en las tuberías y en otros equipos cercanos. Para reducir este efecto vibratorio, a veces se incorporan a la corriente de aire amortiguadores de pulsaciones situados en los puntos de succión y de descarga del compresor, y con frecuencia se instala un tanque compensador que sirve de atenuador entre el compresor de aire y el resto de la planta.

Ventajas de los compresores alternativos:

- Los compresores alternativos se adaptan a una extensa gama de caudales y presiones.
- Los compresores alternativos pueden funcionar con temperaturas de descarga más altas que los compresores centrífugos y los de tornillo.



- Aunque normalmente necesitan más mantenimiento correctivo y reparaciones que otros tipos, los compresores alternativos son más fáciles de reparar, teniendo menor coste y tiempo de parada que los demás.

Inconvenientes de los compresores alternativos:

- Para trabajar con grandes caudales, el compresor alternativo tiene un tamaño mucho mayor que un compresor centrífugo de la misma capacidad.
- Las pulsaciones causadas por la acción alternativa pueden causar problemas al resto de la instalación.
- Los compresores alternativos están sujetos a mucha mayor fricción que los otros tipos, por lo que su desgaste es más rápido y exigen más paradas para mantenimiento.

3.3.3.- Enfriadores y postenfriadores del sistema de compresión

Los sistemas de compresión siempre cuentan con una serie de enfriadores, tanto entre las diferentes etapas de compresión como al final de las mismas, para combatir el aumento de temperatura del aire que aparece en su compresión.

Estos enfriamientos son necesarios debido a que los compresores de las diferentes etapas son incapaces de trabajar en condiciones ideales (rendimiento isentrópico del 100%), lo que provoca que además de aumentar la presión del aire, también aumente considerablemente su temperatura. Debido a esta razón y según recoge (Greene, 1990), siempre que la relación de presiones entre la entrada y la salida del sistema supere el valor de 4 será necesario poner etapas intermedias de enfriamiento para evitar que la temperatura del aire aumente en exceso, lo que provocaría un consumo innecesariamente mayor de potencia para comprimir dicho aire.

Los enfriadores interetapas suelen ser intercambiadores de calor de tipo carcasa-tubos, los cuales enfrían el aire con una corriente de líquido refrigerante, que normalmente es agua procedente del sistema de refrigeración de la planta.

En cambio, en cuanto al postenfriador suele haber más variedad, la cual está determinada principalmente por el clima de la zona donde se vaya a instalar el sistema de compresión. Por lo general se utilizan intercambiadores de carcasa-tubos, al igual que para los enfriadores interetapas, aunque también aparecen intercambiadores de calor de convección forzada que enfrían el gas de trabajo mediante su contacto con el aire ambiental o refrigeradores mecánicos.



4.- LA PLANTA DE SEPARACIÓN DE AIRE GIJÓN III

La planta de Gijón III, que será en base a la cual se haga el estudio de eficiencia de sus compresores de aire, es una planta de separación de aire de tipo criogénica. Como su nombre indica, esta es una de las dos plantas que Praxair tiene Gijón y que se encuentran ubicadas en el polígono de Somonte II.

El objetivo de este tipo de plantas es la obtención por separado de los tres gases principales que componen el aire, que son el nitrógeno, el oxígeno y el argón. Para ello el proceso consta de un sistema de compresiones y destilaciones sucesivas que permite separar estos gases hasta las purzas deseadas.

En la Figura 4.1 se puede ver cómo sería una planta de separación de aire criogénica. Este tipo de instalaciones constan principalmente de las siguientes partes:

- Compresión de aire. Incluye el filtro de aspiración de aire, el compresor de aire BLAC, el motor y el silenciador de venteo.
- Enfriamiento de aire. Consta del postenfriador de contacto directo (DCA) y el enfriador evaporativo (EVC).
- Eliminación de contaminantes. Incluye los prepurificadores, los silenciadores de venteo, el filtro de polvo y el horno de regeneración.
- Separación y licuefacción. Incluye la caja fría, la turbina de expansión, los silenciadores de venteo y las bombas de reflujo criogénicas.
- Compresión de oxígeno. Incluye los compresores de oxígeno “booster” (BOC) con sus motores y los silenciadores de venteo.
- Compresión de nitrógeno. Incluye el compresor de nitrógeno (BLNC) con su motor y el silenciador de venteo.

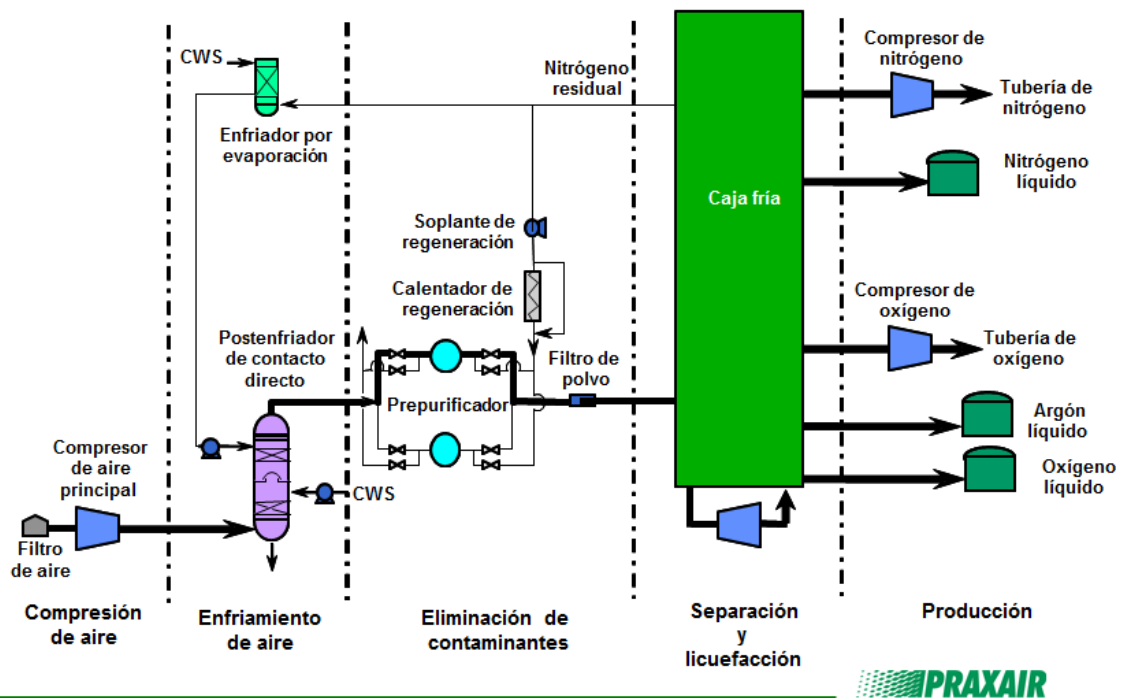


Figura 4.1. - Esquema genérico de una planta de separación de aire criogénica

4.1.- Descripción del proceso de Gijón III

A continuación se explicará el proceso de separación de aire concreto llevado a cabo en la planta de Gijón III, sin entrar en excesivo detalle, simplemente para obtener una visión general del mismo que permita entender mejor su funcionamiento al lector.

En la Figura 4.2 se muestra un esquema de la misma con sus principales equipos etiquetados en color azul para facilitar su comprensión. En ella se indican también la corriente de aire de entrada en color azul claro y las corrientes de los productos de salida en color verde.

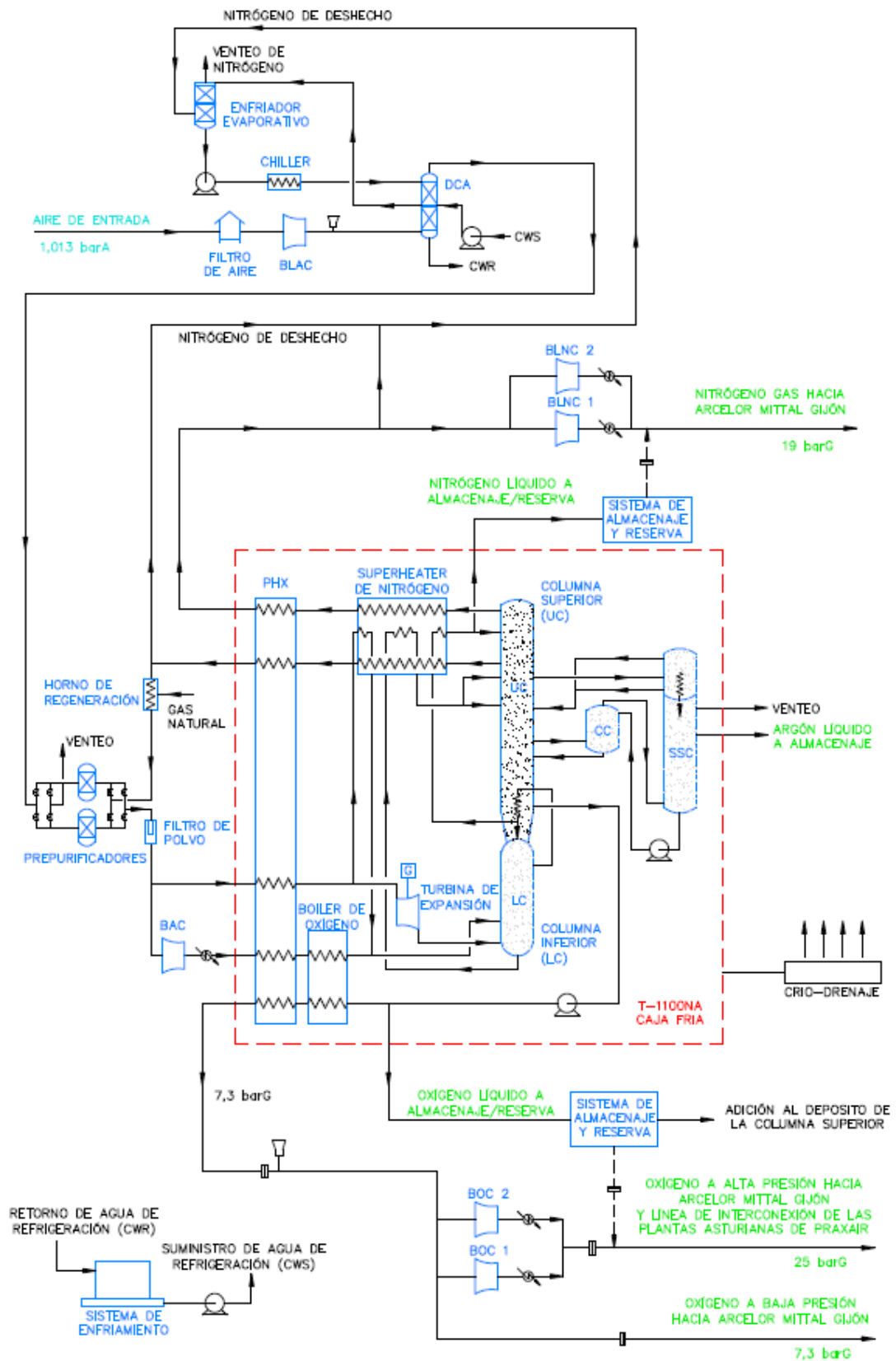


Figura 4.2. - Esquema del proceso de la planta de separación de aire Gijón III



Este proceso empieza con el aire que entra proveniente de la atmósfera y que tras su paso por el filtro de aire principal para eliminar las partículas mayores, pasa al compresor de aire “baseload” (BLAC) donde se produce una primera compresión del aire.

El aire que sale del BLAC se dirige al postenfriador de contacto directo de dos etapas (DCA). En la primera etapa intercambia energía con el agua de refrigeración proveniente de la torre de refrigeración, mientras que en la segunda etapa lo hace con el agua de refrigeración proveniente del enfriador evaporativo (EVC). Esta corriente de agua proveniente del enfriador evaporativo se encuentra a menor temperatura que la de la torre de refrigeración, ya que en el enfriador evaporativo se ha enfriado con nitrógeno de desecho de la caja fría.

Una vez que el aire sale del postenfriador de contacto directo se dirige a los prepurificadores, donde se purifica siguiendo un proceso térmico de adsorción. En esta purificación se eliminan los inertes como el H_2O y el CO_2 que podrían congelarse en la caja fría y provocar atascos, así como hidrocarburos que pueda contener el aire (acetileno, metano, etano, etc) y que poseen riesgo de combustión. La instalación cuenta con dos prepurificadores colocados en paralelo para trabajar de manera continua, ya que mientras uno purifica el aire, el otro se regenera con un flujo en sentido contrario de nitrógeno residual del PHX.

La corriente de aire que sale del prepurificador, la cual sale limpia seca y libre de CO_2 , se divide en dos partes. Una parte se dirige hacia la columna inferior de la caja fría (LC) tras pasar por el intercambiador de calor primario (PHX), donde se enfría con el oxígeno y el nitrógeno que sale de la caja fría, y por la turbina de expansión.

La segunda parte del aire que sale del prepurificador se dirige al compresor de aire “booster” (BAC) donde se produce una segunda compresión de aire después de la del BLAC. Al salir del BAC pasa por el PHX donde se enfría y a continuación por el boiler de oxígeno donde se condensa al cruzarse con la corriente de oxígeno que viene de la columna superior (UC). El aire que sale del boiler se introduce en la columna inferior de la caja fría.

En la columna inferior de la caja fría se evapora primero el nitrógeno debido a que tiene una menor temperatura de ebullición que el oxígeno. Parte de este nitrógeno que se evapora se va a la columna superior tras enfriarse en el superheater de nitrógeno, mientras que otra parte se recircula a la columna inferior nuevamente, tras pasar por la parte inferior de la columna superior donde se condensa. El líquido que se queda en el fondo también pasa a la columna superior tras pasar por el superheater de nitrógeno. Una parte de ese nitrógeno líquido de recirculación que se saca de la caja fría será el que se lleve a los tanques de almacenamiento de nitrógeno.



La columna superior sigue un funcionamiento similar a la inferior. En ella el líquido que se va quedando al fondo se va enriqueciendo con oxígeno y argón, mientras que el vapor de la parte superior se va enriqueciendo en nitrógeno.

El oxígeno líquido que sale de la columna superior se envía al boiler de oxígeno donde se condensa y a continuación al PHX donde se calienta. Esta corriente se divide en dos partes. Una se envía al cliente como oxígeno a baja presión, mientras que la otra se comprime con los dos compresores de oxígeno “booster” (BOC) para suministrarlo como oxígeno a alta presión. Si el cliente no necesita todo el oxígeno producido, una parte del mismo se almacena como líquido según sale de la columna superior.

El nitrógeno que sale de la columna superior sigue dos caminos. Uno es el de suministro al cliente, el cual al salir de la columna superior pasa por el superheater de nitrógeno y el PHX donde aumenta su temperatura y por el compresor de nitrógeno (BLNC). El segundo camino es el de nitrógeno de desecho. Éste también pasa por el superheater de nitrógeno y el PHX para aumentar su temperatura y luego se divide en dos partes, una hacia el enfriador evaporativo para enfriar el agua de refrigeración, y otro hacia los prepurificadores para su regeneración, tras pasar por el horno de regeneración para calentar el nitrógeno.

De la parte media de la columna superior se extrae una corriente líquida formada principalmente por argón y oxígeno y con una mínima parte de nitrógeno que se envía a la columna de argón (SSC). En la columna de argón, el argón se evapora y se concentra con el nitrógeno en la parte superior, mientras el oxígeno se queda como líquido en la parte inferior. Esta corriente gaseosa de argón que incluye una mínima parte de nitrógeno se condensa en el condensador de argón al cruzarse con una corriente que viene de la columna inferior de la caja fría, y a continuación se lleva a los depósitos de almacenaje de argón.

4.2.- Descripción del sistema de compresión y purificación de aire

El proceso de separación de aire mediante destilación fraccionada es un proceso complejo y formado por gran variedad de equipos, por lo que como ya se comentó en el alcance del proyecto, este estudio se limitará a una parte del mismo. La parte analizada será el sistema de compresión y purificación de aire, que es la primera de todo el proceso y además la que posee un mayor consumo energético, por lo que la hace de gran importancia en el análisis global.

En la Figura 4.3 se puede apreciar cómo es el sistema de compresión y purificación de aire montado en Gijón III. En esta imagen se pueden ver los prepurificadores, detrás de ellos el filtro de aire principal y después el sistema de compresión con sus respectivos



intercambiadores de calor. Asimismo, en la parte central sobresale el postenfriador de contacto directo. Al fondo aparecen las torres de refrigeración, pero esas ya no se incluyen dentro del sistema estudiado.



Figura 4.3. – Sistema de compresión y purificación de aire de Gijón III

A continuación, se muestra en la Figura 4.4 un esquema simplificado del proceso de separación de aire utilizado en las plantas de Praxair en Asturias, resaltando con un rectángulo de color rojo la parte del sistema que entrará dentro del alcance de este proyecto, que es el sistema de compresión y purificación de aire.

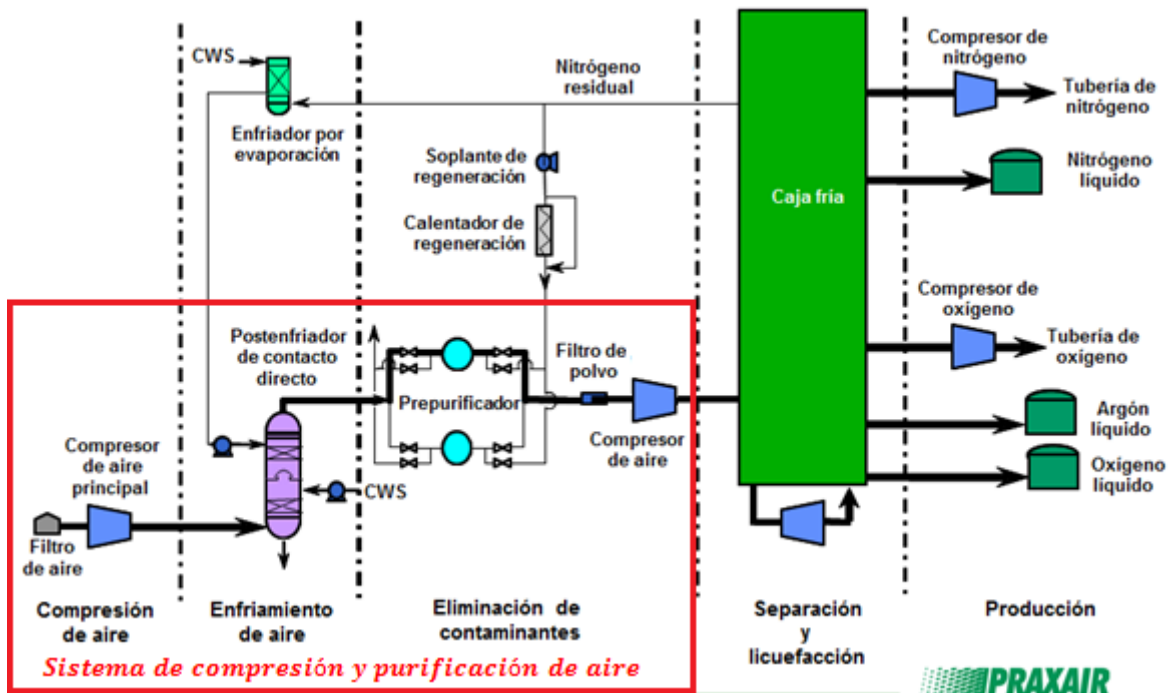


Figura 4.4. - Ubicación del sistema de compresión y purificación de aire dentro del proceso de separación de aire

A su vez el sistema de compresión y purificación de aire se encuentra formado por diferentes equipos, los cuales se enumeran a continuación, y son los que se analizarán en este proyecto:

- Filtro de aspiración del BLAC o filtro de aire principal.
- Compresor de aire principal o BLAC (“Base Load Air Compressor”), formado por 4 etapas de compresión (BLAC 1, BLAC 2, BLAC 3 y BLAC 4) y 3 intercambiadores de calor intermedios entre cada una de las etapas de compresión (IC1, IC2 e IC3).
- Postenfriador de contacto directo o DCA (“Direct Contact Aftercooler”).
- Prepurificadores, formado por 2 equipos colocados en paralelo.
- Filtro de polvo.
- Filtro de aspiración del BAC.
- Compresor de aire booster o BAC (“Booster Air Compressor”), formado por 2 etapas de compresión (BAC 1 y BAC 2) y 1 intercambiador de calor intermedio (IC4).
- Aftercooler del BAC, formado por un intercambiador de calor.

Así, el proceso de compresión y purificación de aire comienza con el aire atmosférico que entra al sistema a través del filtro de aire principal. Allí se eliminan las partículas grandes antes de entrar en la línea de aspiración del BLAC.



El aire filtrado es comprimido por el BLAC hasta aproximadamente 10 barG y luego conducido hasta el postenfriador de contacto directo de dos etapas (DCA). En la primera etapa del DCA el aire es enfriado hasta una temperatura aproximadamente 2 °C superior a la temperatura del agua de la torre de refrigeración. En la segunda etapa del DCA se enfría el aire hasta una temperatura de aproximadamente 1 °C por encima de la temperatura del agua procedente del enfriador evaporativo. El agua de refrigeración que sale de la primera etapa del DCA se devuelve al colector de retorno de la torre de enfriamiento. En cambio, el agua que sale de la segunda etapa se lleva al enfriador evaporativo donde se enfría con nitrógeno de desecho excedente de la caja fría antes de ser bombeada de nuevo a la segunda etapa del DCA. El enfriador evaporativo enfría el agua hasta aproximadamente 11 °C (cuando la temperatura de nitrógeno de desecho es 19 °C). Para el bombeo del agua se dispone de dos bombas para cada etapa.

A continuación, el aire de proceso es sometido a un proceso de purificación. El sistema de prepurificación utiliza un proceso térmico de adsorción. Se utilizan dos prepurificadores colocados en paralelo con el fin de mantener una operación continua. Así, mientras uno purifica el aire, el otro está siendo regenerado. La corriente de aire que deja el prepurificador y se dirige al filtro de polvo está limpia, seca y libre de dióxido de carbono.

A la salida del filtro de polvo esta corriente de aire se divide en dos. El 25% aproximadamente se dirige al compresor de aire BAC, donde se comprime aún más antes de pasar al intercambiador de calor primario PHX donde se enfría al cruzarse en contracorriente con nitrógeno de desecho y nitrógeno y oxígeno producto. El 75% restante de la corriente de aire que sale del filtro de polvo se dirige directamente al PHX, sin pasar por el BAC, donde también se enfría, para posteriormente dirigirse a la turbina de expansión.

En los planos se puede ver un extracto del diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID). En él se muestran detalladamente todos los elementos del sistema de compresión y purificación de aire, así como sus conexiones, por lo que se recomienda al lector su visión antes de continuar con la lectura de la memoria, ya que le ayudará a comprender mejor el sistema que se está describiendo.

Además, cabe destacar que el fluido de trabajo cambia su composición a lo largo del sistema. Al comienzo del mismo entra como aire húmedo procedente de la atmósfera, va perdiendo progresivamente humedad en los intercambiadores de calor del BLAC y en el DCA hasta que finalmente pierde toda la humedad restante en los prepurificadores, saliendo de éstos como aire seco.

Realmente en los prepurificadores, se eliminan también otros componentes del aire como el CO₂ y los hidrocarburos. No obstante, esto no se tendrá en cuenta debido a dos razones. La primera es que no se dispone de analizadores de estos componentes en el ambiente, lo que impediría calcular la cantidad de gases que se extraen de la corriente en los prepurificadores. La segunda es la proporción de éstos en el aire, la cual es muy



pequeña (menor del 0,05%), lo que provoca que una pequeña variación en ella casi no afecte a las propiedades globales del aire, por lo que no merece la pena complicar los cálculos para que el resultado final casi no se vea afectado.

A continuación se hará una explicación más detallada de los equipos que intervienen en el sistema de compresión y purificación de aire.

4.2.1.- Filtro de aspiración del BLAC

Todas las plantas de separación de aire cuentan con un filtro en la entrada de aire ambiental al sistema. En la Figura 4.5 se puede apreciar cómo es el filtro de aire principal de Gijón III con su salida hacia la primera etapa del BLAC que está detrás de él.



Figura 4.5. - Filtro de aspiración del BLAC o filtro de aire principal

Este filtro posee dos etapas de filtrado. La primera capta las partículas más grandes de impurezas y polvo, mientras que la segunda capta las más finas. En definitiva, la función de estos filtros es eliminar las partículas que normalmente contiene el aire que entra a la planta. Según este filtro se va tupiendo aumenta la caída de presión en el mismo. Para evitar esto, se recomienda limpiar el filtro cada cierto tiempo para evitar una caída de presión excesiva.



4.2.2.- Compresor de aire principal o BLAC

La unidad de compresión de aire consta de la combinación de un compresor de aire multietapa llamado “baseload” (BLAC, baseload air compressor) y un compresor de aire multietapa llamado “booster” (BAC, booster air compressor) accionados ambos por el mismo motor eléctrico y transmisión y con el mismo sistema de lubricación. En el caso de Gijón III, el modelo de compresor utilizado es el VK 100-6 del fabricante Mannesmann Demag.

En la Figura 4.6 se puede apreciar cómo es el sistema de compresión formado por el BLAC y el BAC, con sus respectivos intercambiadores de calor interetapas. Concretamente en esta imagen se puede ver la primera etapa de compresión del BLAC, llamada BLAC 1, la cual tiene su aspiración en la tubería de color verde. El resto de etapas de compresión están en la parte superior pero no están visibles. Debajo de las etapas de compresión se encuentran los intercambiadores de calor. En la parte central hay dos de gran tamaño que son el IC 2 (izquierda) y el IC 1 (derecha). A la derecha de estos se encuentra el IC 4, el cual debe su pequeño tamaño a que es el perteneciente al BAC y por último aparece el aftercooler del BAC. El intercambiador IC 3 no se puede ver en esta imagen porque está detrás del IC 2.



Figura 4.6. – Vista general del sistema de compresión

Asimismo en la Figura 4.7 se muestra el mismo sistema de compresión visto desde el lado contrario con lo que ahora si se puede apreciar el intercambiador de calor IC 3 a la izquierda del intercambiador IC 2.



Figura 4.7. - Vista general del sistema de compresión desde el lado contrario

Este sistema consta de 6 compresores centrífugos. Las primeras 4 etapas pertenecen al BLAC, mientras que las 2 últimas etapas pertenecen al BAC. El accionamiento de estas 6 etapas del compresor se realiza mediante un motor eléctrico de 19400 kW.

Las condiciones de diseño del compresor son las recogidas en la Tabla 4.1.

	BLAC	BAC
Caudal [Nm³/h]	155350	39340
Temperatura de entrada [°C]	25	15,6
Presión de entrada [barA]	1,01	9,30
Presión de descarga [barA]	10,69	20,20
Humedad relativa [%]	entre 0 % y 100 % dependiendo del punto del proceso	0%

Tabla 4.1. – Condiciones de diseño del compresor de aire

El aire filtrado procedente del filtro de aspiración es comprimido en el compresor de aire BLAC desde condiciones atmosféricas hasta las condiciones de descarga requeridas por el proceso. Este compresor es de tipo centrífugo multietapa con 4 etapas de compresión y con enfriamiento intermedio entre cada etapa de compresión. En la Figura 4.8 se puede



ver el compresor de la primera etapa del BLAC y su descarga al intercambiador de calor IC 1.



Figura 4.8. – Primera etapa de compresión del BLAC

La capacidad del compresor se controla mediante los álabes guía de entrada existentes en las etapas impares (etapas BLAC 1 y BLAC 3), estando sincronizado el movimiento de los dos grupos de álabes. Asimismo, también existen álabes guía en la primera etapa del BAC. Durante el funcionamiento normal de la planta los álabes se ajustan automáticamente mediante la programación del PLC, con el objetivo de mantener el flujo de aire requerido por la planta. Para incrementar la producción de la planta se aumenta el flujo de aire comprimido abriendo más los álabes. Por el contrario, para disminuir la producción se reduce la apertura de los álabes, disminuyendo así el flujo de aire comprimido.

Para el enfriamiento entre cada etapa se disponen intercambiadores de calor de tipo carcasa-tubos, donde el aire circula por el lado de la carcasa y el agua de refrigeración circula a contracorriente por el lado de los tubos. En los intercambiadores entre las etapas del BLAC se produce condensación de agua producida por la disminución de la temperatura del aire de proceso, lo que implica una disminución de la humedad absoluta de saturación que soporta esa corriente de aire. Esa corriente de agua condensada es recogida en cada intercambiador y dirigida al sistema de drenaje a fin de evitar su transporte a la siguiente etapa de compresión. Hay que tener en cuenta que este fenómeno no ocurre en el intercambiador que se encuentra entre las etapas de compresión del BAC, ya que en este caso el aire ya no tiene humedad. Asimismo, en la Figura 4.9 se puede observar la gran diferencia de tamaño que existe entre un intercambiador del lado de aire húmedo,



concretamente el IC 1, y uno del lado de aire seco, concretamente el IC 4. Esto se debe principalmente a la diferencia de caudales que circulan por ellos, siendo cuatro veces mayor el del lado de aire húmedo.



Figura 4.9. – Comparación entre un intercambiador del lado de aire húmedo (IC1) y uno de aire seco (IC4)

En cuanto al BAC, ya se completará su explicación más adelante para seguir el orden del proceso.

4.2.3.- Postenfriador de contacto directo o DCA

El postenfriador de contacto directo (DCA) localizado aguas abajo de los compresores de aire combina las funciones de postenfriador del BLAC y de separador de humedad. Esto se debe a que con la disminución de la temperatura del aire, el vapor de agua que lleva a la corriente en forma de humedad se condensa y se separa de ésta a causa de la disminución de la humedad absoluta de saturación del aire. En la Figura 4.10 se puede ver el aspecto exterior de este equipo.



Figura 4.10. – Postenfriador de contacto directo

El DCA consta de dos etapas, colocadas una a continuación de la otra, estando la primera en la parte inferior del DCA y la segunda encima de ésta.

La primera etapa del DCA intercambia calor entre la corriente de aire ascendente y la corriente de agua de refrigeración descendente. En ella se enfría el aire hasta una temperatura en torno a $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ superior a la temperatura combinada de la entrada de agua de refrigeración y la salida del agua de la segunda etapa.

La segunda etapa del DCA, en cambio, intercambia calor entre la corriente de aire ascendente y la corriente de agua descendente procedente del enfriador evaporativo. Este agua procedente del enfriador evaporativo está a una temperatura menor que la del sistema de refrigeración, ya que mientras en la torre de refrigeración el agua intercambia calor con el aire ambiental, en el enfriador evaporativo lo hace con nitrógeno de desecho procedente de la caja fría, el cual está a una temperatura mucho menor que la ambiental. En esta



segunda etapa se enfría el aire hasta una temperatura en torno a $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ superior a la temperatura del agua fría procedente del enfriador evaporativo.

Antes de abandonar el DCA, el aire pasa a través de un demister (separador de humedad) de alta eficiencia donde se retira todo el agua en suspensión que se ha condensado debido a la saturación del aire.

4.2.4.- Prepurificadores

En estos equipos la empresa no permite entrar en demasiados detalles en su explicación ya que su método de separación de los contaminantes forma parte de varias patentes. Por tanto, simplemente se hará una explicación general de su funcionamiento sin detallar los fenómenos que ocurren en el interior de los mismos. En la Figura 4.11 se pueden ver ambos prepurificadores con el filtro de aspiración del BLAC a su derecha.



Figura 4.11. - Prepurificadores

El proceso criogénico de separación de aire requiere que sean retirados dos clases principales de contaminantes que normalmente se encuentran en la atmósfera. La primera clase de contaminantes son aquellos que se congelarán a temperaturas criogénicas (por debajo de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$), como la humedad y el dióxido de carbono. Ambos dos, se congelarían, obstruyendo las tuberías del sistema en la zona de la caja fría, provocando un empeoramiento de la eficiencia del proceso de separación de aire e incluso su parada. La segunda clase de contaminantes son los hidrocarburos y los gases no condensables (helio, hidrógeno, neón). Los hidrocarburos tales como el metano y el acetileno pueden reaccionar



violentamente con el oxígeno dentro del sistema de separación de aire, provocando un riesgo para la seguridad.

El sistema prepurificador, que retira estos contaminantes, consiste en dos prepurificadores y un filtro de polvo. Los prepurificadores están formados por varias capas de distintos materiales porosos, los cuales retienen los contaminantes mediante un proceso de adsorción y una reacción exotérmica que se produce en su interior. Este proceso de adsorción se basa en que las moléculas del gas quedan adheridas a la superficie porosa de un sólido con el que entran en contacto. De esta forma, todo el agua y la mayor parte del dióxido de carbono y los hidrocarburos pesados serán retirados de la corriente de aire. En cambio, los hidrocarburos ligeros tales como metano y etano sólo serán retirados parcialmente.

El material del interior de los prepurificadores alcanza gradualmente su punto de saturación de contaminantes, haciendo que no pueda retener más. Antes de llegar a esa saturación, es necesario retirar los contaminantes para que no se llegue a saturar el material poroso lo que provocaría que no limpiase el aire. Este proceso de limpieza del prepurificador se conoce como regeneración del mismo.

Por ello, este sistema cuenta con dos prepurificadores colocados en paralelo de manera que mientras uno limpia el aire el otro está regenerándose, haciendo que el sistema pueda trabajar en continuo. Para regenerar los prepurificadores se emplea una corriente de nitrógeno de desecho procedente de la caja fría, la cual se hace circular por el mismo en sentido contrario a como lo haría el aire. No obstante, el funcionamiento de estos prepurificadores no es tan simple como parece, ya que el flujo no puede cambiar bruscamente porque dañaría su interior. Así el ciclo de cada prepurificador se puede dividir en 6 pasos, los cuales se enumeran a continuación con las válvulas que se abrirían en cada paso para el prepurificador 1 (ver P&ID).

- Adsorción. El aire circula a través del prepurificador, en donde se retiene el agua, el CO₂ y los hidrocarburos. Se encuentra abierta la válvula KV 551A.
- Despresurización. Se reduce la presión del prepurificador hasta alcanzar la del nitrógeno de desecho. Para ello se abre la válvula de despresurización del prepurificador correspondiente. Se encuentran abiertas las válvulas KV 551A y KV 552A.
- Calentamiento. Se calienta el prepurificador con nitrógeno de desecho que pasa por el horno de regeneración. Esta corriente de nitrógeno retira los contaminantes del prepurificador, los cuales salen del mismo acompañando al nitrógeno. Se encuentra abierta la válvula KV 553N.
- Enfriamiento. Se enfría el prepurificador con nitrógeno de desecho procedente de la caja fría hasta alcanzar la temperatura del aire que viene del DCA. Al final de este paso el prepurificador ya está libre de contaminantes. Se encuentra abierta la válvula KV 553N.



- Represurización. Se cierra la válvula de venteo y se abre la válvula de represurización, lo que hace la presión del prepurificador aumente su presión. Este paso termina cuando la diferencia de presión entre ambos prepurificadores sean menor de 7 psi. Se encuentra abierta la válvula KV 554A.
- Mezcla. Los dos prepurificadores funcionan simultáneamente como si ambos estuvieran en el paso de adsorción. Con ello se consigue igualar la temperatura de ambos con lo que se evitan problemas por choque térmico aguas abajo. Se encuentra abierta la válvula KV 551A.

4.2.5.- Filtro de polvo

Este filtro posee la función de captar cualquier partícula del material que componen el interior de los prepurificadores y que puedan salir arrastrados con la corriente de aire. Está diseñado para retirar el 99% de las partículas mayores de 1 μm y el 100% de las de 3 μm . A su salida, la corriente de aire ya se considera completamente limpia y seca, por lo que ya no supondrá problemas en los equipos aguas abajo. En la Figura 4.12 se puede ver el filtro de polvo.



Figura 4.12. – Filtro de polvo

4.2.6.- Filtro de aspiración del BAC

Éste es un filtro de tipo cónico también conocido como “strainer”, el cual se compone de una malla metálica que se introduce dentro de la tubería. En la Figura 4.13 se puede apreciar cómo sería la malla (“mesh”) del interior del filtro.

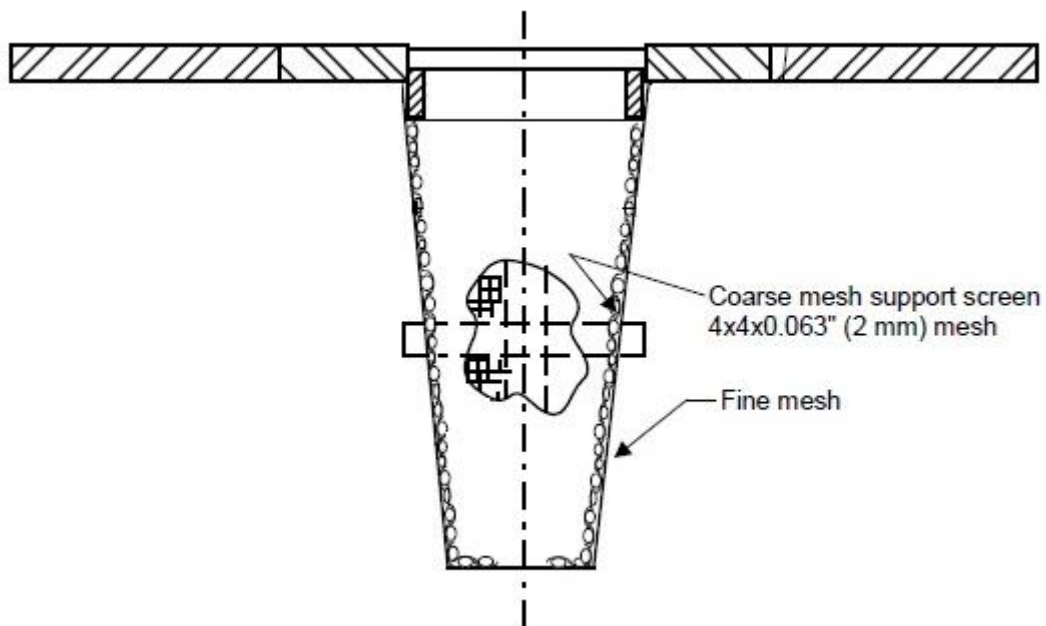


Figura 4.13. – Sección longitudinal de un filtro de tipo cónico

4.2.7.- Compresor de aire booster o BAC

Aproximadamente el 25% del aire prepurificado que sale del filtro de polvo se desvía hacia el BAC donde se le aplica una segunda compresión. Esta máquina cuenta con 2 etapas de compresión. Al igual que ocurría con el BLAC, éste también con unos álabes guía en su etapa impar (BAC 1), con el que regular el caudal de aire que circula a su través.

En la Figura 4.14 se puede apreciar la diferencia de tamaño entre los compresores del BAC y los del BLAC. En la parte de arriba de la imagen aparece una de las etapas del BAC, la cual es claramente más pequeña que las dos etapas del BLAC que se encuentran debajo de ella. Este menor tamaño se debe principalmente al menor caudal que circula por estas respecto a las del BLAC.



Figura 4.14. – Comparación entre una etapa de compresión del BAC y una del BLAC.

También existe un intercambiador de calor de tipo carcasa-tubos entre las dos etapas de compresión del BAC con el aire de proceso circulando por el lado de la carcasa, mientras que el agua de refrigeración fluye por los tubos.

El BAC cuenta con un bypass regulado por la válvula electroneumática UV 595A para evitar el oleaje en el compresor. De esta forma, esta válvula se abre en el arranque de la planta para evitar el oleaje en el BAC, y una vez se alcanza un funcionamiento estacionario se cierra completamente. Pese a que el flujo de aire pueda variar ligeramente, ya no será necesario abrir esta válvula hasta que el caudal llegue a valores muy bajos, lo cual sólo ocurrirá en el arranque de la planta.

4.2.8.- Aftercooler del BAC

Aguas abajo del BAC, se encuentra un postenfriador de carcasa y tubos para enfriar el aire que sale del BAC, el cual se puede apreciar en la Figura 4.15.



Figura 4.15. – Aftercooler del BAC

La temperatura del aire a la salida del aftercooler del BAC tendrá que ser siempre menor de 60 °C, para el correcto funcionamiento de la caja fría. Para ello este intercambiador hace circular agua de refrigeración por el lado de los tubos, mientras el aire procedente del BAC va por el lado de la carcasa, produciendo el intercambio de energía entre ambos lo que hace que disminuya la temperatura del aire hasta valores poco por encima de la temperatura ambiental.



5.- ANÁLISIS TEÓRICO DEL PROBLEMA PLANTEADO

Antes de empezar a programar nada será necesario analizar el problema teóricamente para saber cuáles serán los pasos a seguir a la hora de programar la herramienta informática. De esta forma, en este capítulo de la memoria se explicarán los cálculos que se llevarán a cabo en el programa, pero desde un punto de vista teórico, es decir, de dónde salen esas ecuaciones, sin centrarse en cómo se aplicarán a la herramienta o los resultados que con ella saldrán.

5.1.- Esquema del sistema de compresión y purificación de aire

Para comenzar se mostrará un esquema del sistema de compresión y purificación de aire que será la base de este proyecto y que ayudará al lector a tener una visión global del mismo, indicándole la ubicación de cada equipo así como las conexiones entre ellos.

En la Figura 5.1 se puede ver cómo sería el esquema del sistema estudiado. Además en él se muestran con un número dentro de un círculo sombreado en gris la ubicación de los distintos puntos del proceso. Así por ejemplo, si se habla del punto 3, se referirá a la salida del intercambiador de calor IC 1 y a la entrada de la segunda etapa de compresión del BLAC (BLAC 2).

El recorrido que sigue el aire dentro del proceso es relativamente sencillo y debido a que ya fue explicado en detalle anteriormente en el apartado dedicado a la descripción del sistema de compresión, este apartado no se detendrá otra vez en ello. Simplemente se hará un recorrido rápido por los diferentes equipos.

El aire ambiental entra al sistema a través del filtro de aspiración del BLAC y pasa por todas las etapas de compresión del BLAC y sus respectivas etapas de interenfriamiento. A continuación se dirige al DCA y de aquí a los prepurificadores, para terminar en el filtro de polvo. Una vez sale del filtro de polvo, la corriente se divide en dos partes, una sale ya directamente del sistema como aire a baja presión, mientras que otra se dirige hacia el BAC. Esta segunda corriente de aire pasará por el filtro de aspiración del BAC, las dos etapas de compresión del BAC con su respectivo interenfriamiento y por último pasará por el aftercooler del BAC. Esta corriente que sale del aftercooler del BAC será la salida de aire a alta presión.

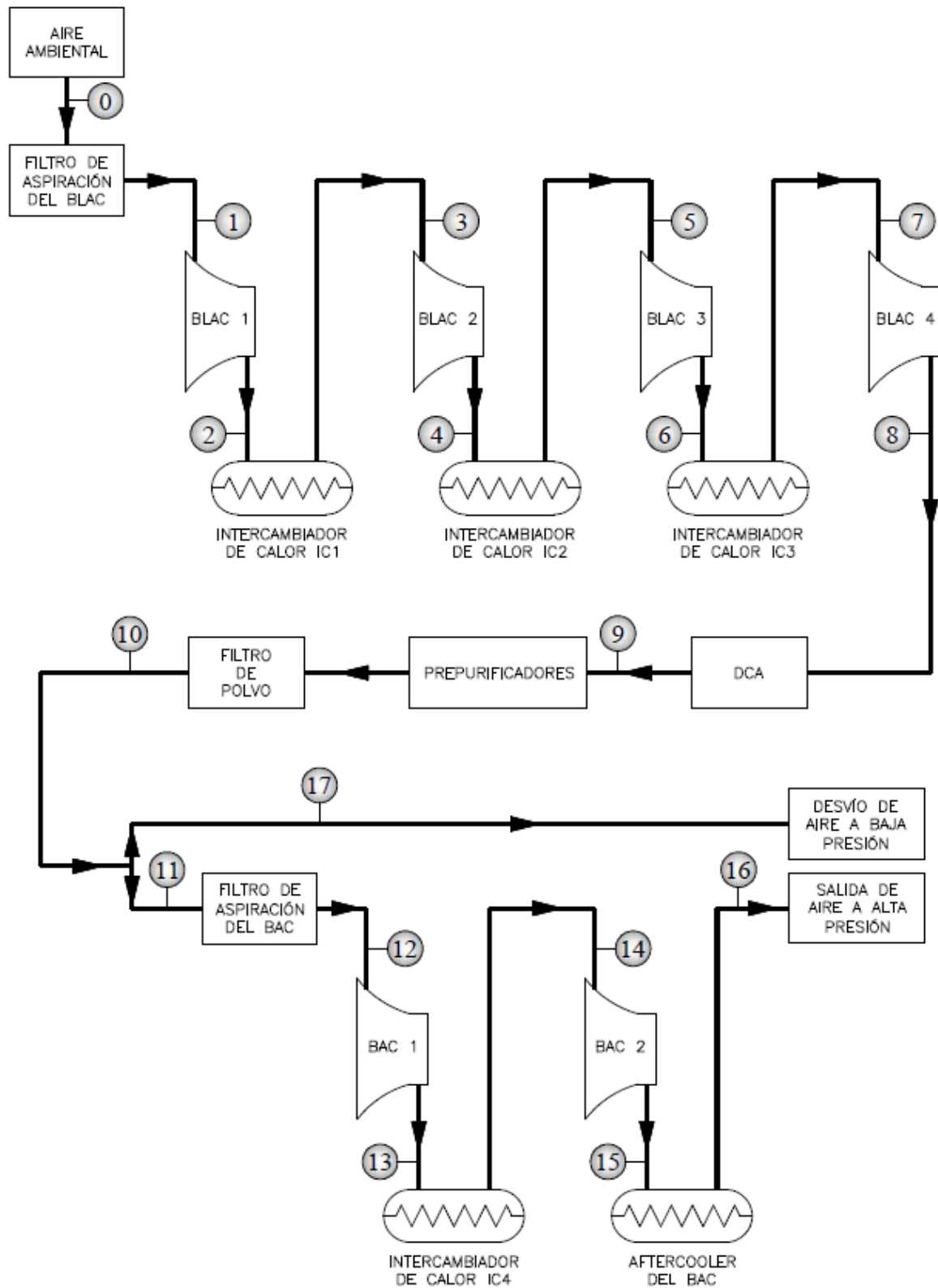


Figura 5.1. – Esquema del sistema de compresión y purificación de aire de Gijón III



Como se puede apreciar en la Figura 5.1 no existe un punto entre los prepurificadores y el filtro de polvo, salta desde el punto 9 que representa la entrada a los prepurificadores al punto 10 que representa la salida del filtro de polvo. Por tanto implicará que a la hora de analizar los equipos haya que tomar ambos dos como un único bloque, por lo que en el programa y a lo largo de esta memoria a veces se hablará de estos como el conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo.

Esto se ha tenido que hacer debido a la imposibilidad de conocer las propiedades del aire a la entrada del filtro de polvo en el punto donde se mezclan las corrientes de salida de ambos prepurificadores. La planta cuenta con sensores de presión y temperatura a la salida de cada uno de los prepurificadores pero no aguas abajo de su punto de mezcla, impidiendo conocer las condiciones de entrada al filtro de polvo.

La razón de no poder conocer las condiciones aguas abajo del punto de mezcla tiene que ver con los ciclos de trabajo y regeneración que tienen los prepurificadores y que se explicaron anteriormente en el apartado “4.2.4. Prepurificadores”.

En uno de los ciclos, ambos prepurificadores están trabajando a la vez, lo que provoca que una parte del aire circule por uno de ellos, mientras el resto lo haga por el otro. Esto no sería un problema si ambas corrientes saliesen a la misma temperatura y presión. Desgraciadamente no ocurre así, ya que un prepurificador viene de estar regenerándose con nitrógeno, mientras el otro limpiaba el aire, por lo que ambos poseen temperaturas diferentes. De esta forma sería necesario realizar un balance de energía en el punto de mezcla de ambos, ya que además al tener presiones diferentes en ambos equipos, circularán distintos caudales por cada uno y no valdrá con hacer una simple media de las variables.

5.2.- Propiedades del fluido de trabajo en cada punto del proceso

El primer paso necesario para comenzar a analizar este proceso, al igual que ocurriría en cualquier otro de esta índole, será tener todos los puntos del mismo completamente definidos en función de las propiedades termodinámicas de los mismos. De esta manera, se definirá cada punto con su presión, temperatura, entalpía y entropía. Asimismo, en el caso del aire húmedo, también se definirá la humedad absoluta y la humedad relativa.

Hay que tener en cuenta que estas propiedades no son independientes, sino que están relacionadas entre ellas, por lo que en cada punto será suficiente con tener definidas tres de ellas para poder hallar las otras tres en el caso del aire seco, siempre y cuando la presión sea una de las variables conocidas. Aunque se hable de tener tres variables conocidas, en el caso del aire seco, serán simplemente dos, ya que ya se conocerá una de ellas que es la



humedad que será siempre cero, por eso valdría con definir la presión y la temperatura por ejemplo para obtener todas las condiciones de ese punto.

5.2.1.- Puntos reales del proceso (del 1 al 17)

En estos casos, las tres variables conocidas serán la presión, la temperatura y la humedad (cuando sea aire seco la humedad será cero), mientras que la entalpía y la entropía se obtendrán a partir de las otras tres utilizando las tablas de propiedades termodinámicas del aire seco y del aire húmedo.

Dado que estos son puntos reales del proceso, la presión y la temperatura se obtendrán a partir del valor registrado por el sensor correspondiente a esa zona del proceso. Las presiones se medirán con un sensor de presión que tendrá un TAG en el P&ID de la forma PT y su correspondiente número, mientras que las temperaturas lo harán con los sensores de temperatura, los cuales poseen un TAG de la forma TE con su correspondiente número. No obstante, en algunos casos será necesario medir la presión a partir de varios sensores, ya que algunos sensores miden presiones diferenciales entre dos puntos del proceso, los nombrados como PDT. Por último, cabe destacar que la mayoría de los sensores miden presiones relativas, es decir, presiones por encima de la atmosférica, por lo que todos aquellos sensores que operen de esta forma habrá que sumarles la presión atmosférica, ya que para todo el proyecto se trabajará con presiones absolutas, ya que las tablas termodinámicas de propiedades de los fluidos están referidas a presiones absolutas.

A diferencia de la presión y la temperatura, la humedad absoluta de cada punto del proceso tiene un poco más de complicación. Partiendo de la humedad relativa del aire ambiental registrada en el sensor MI 501 se puede obtener la humedad absoluta del aire con la ecuación 5.1, es decir, los kilogramos de agua que entran al sistema por cada kilogramo de aire. De esta manera, esta cantidad de agua que entra acompañando al aire ambiente es la máxima humedad absoluta que tendrá la corriente de aire en todo el proceso, ya que a partir de ahí irá disminuyendo hasta llegar a los prepurificadores, donde se extrae toda la humedad del aire y sale como aire seco.

$$w = 0,622 * \frac{P_{w,sat}}{\frac{P}{\phi} - P_{w,sat}} \quad (\text{ec. 5.1})$$

Donde $P_{w,sat}$ es la presión de vapor de saturación y se calcula con una de las dos ecuaciones siguientes (ecuaciones 5.2 y 5.3), en función de si la temperatura del aire es menor o mayor que 0 °C. Para el caso de temperaturas inferiores a 0 °C, se utilizará la ecuación que recomienda el Código Técnico de la Edificación en uno de sus documentos de apoyo al “DB DE-HE Ahorro de energía” (Ministerio de fomento, 2013). En cambio, para el caso de temperaturas mayores o iguales de 0 °C, se utilizará la ecuación de Preining, la cual aunque es más complicada, es mucho más precisa. Sin embargo, esta



última tiene el inconveniente de que no sirve para temperaturas menores de 0 °C. Por último, cabe destacar que la temperatura de estas dos ecuaciones está medida en diferentes unidades. Así en la ecuación del CTE, la temperatura se encuentra medida en grados Celsius (°C), mientras que en la ecuación de Preining lo hace en Kelvin (K).

$$P_{w,sat} = 610,5 * e^{\frac{21,875*T}{265,5+T}} \quad \text{si } T < 0^{\circ}C \quad (\text{ec. 5.2})$$

$$P_{w,sat} = e^{77,3449 - \frac{7235,4246}{T_K} - 8,2 * \ln(T_K) + 5,7113 * 10^{-3} * T_K} \quad \text{si } T \geq 0^{\circ}C \quad (T_K \geq 273,15 K) \quad (\text{ec. 5.3})$$

Esta humedad absoluta representa los kilogramos de agua por cada kilogramo de aire que hay en cada punto del proceso. De esta forma, según el aire va pasando por los diferentes equipos, la humedad de la corriente de aire puede sufrir dos casos.

El primero, el cual ocurre en la mayoría de los equipos, es que la humedad absoluta se mantenga constante en la salida de la máquina respecto a su entrada, es decir los mismos kilogramos de agua que entran con el aire, salen con él. Hay que tener en cuenta que la humedad relativa, a diferencia de la absoluta, sí variará, debido a que aunque la humedad absoluta se mantiene constante, las demás condiciones como la presión y la temperatura variarán respecto a la entrada produciendo un cambio en la presión de saturación del vapor y a su vez en la humedad relativa. Por ejemplo, en la salida de los compresores la humedad absoluta es la misma que a su entrada, pero al aumentar la presión y la temperatura, aumenta la presión de vapor de saturación, disminuyendo la humedad relativa en la salida del equipo.

El segundo caso es el que ocurre en los intercambiadores de calor. En ellos la presión se mantiene aproximadamente igual en la entrada que en la salida (sólo hay una pequeña pérdida por caídas de presión), mientras que la temperatura disminuye considerablemente en la salida respecto a la entrada, lo que provoca que la presión de vapor de saturación también disminuya. Al ocurrir esto, provoca que la humedad absoluta de saturación del aire disminuya, es decir, la corriente de aire es capaz de llevar menos kilogramos de agua en la salida del equipo que en su entrada, por lo que si la humedad absoluta se mantiene constante, la humedad relativa aumentará a la salida del mismo, pudiendo alcanzar el punto de saturación (HR=100%). Esto provoca que en algunos intercambiadores la humedad absoluta que traía el aire en su entrada sea mayor que la humedad absoluta de saturación para las condiciones de salida, lo cual obviamente no es posible porque habría una humedad relativa mayor del 100%. Cuando ocurre esto significa que el aire ha alcanzado su punto de saturación. Por tanto, la humedad absoluta del aire a la salida del equipo será la de saturación y la diferencia de agua que llevaba el aire a la entrada respecto a la de la salida, será el agua que se ha condensado y separado del aire, yéndose por el drenaje que tienen los intercambiadores.



Dado que resulta más visual trabajar con las tablas termodinámicas en función de la humedad relativa que de la absoluta, ya que la relativa siempre está comprendida entre 0 y 1 o entre 0 y 100 si se toman como valores porcentuales, habrá que calcular también la humedad relativa de todos los puntos del proceso. Para ello se utilizará la ecuación 5.4.

$$\varphi = \frac{w}{w + 0,622} * \frac{P}{P_{w,sat}} \quad (\text{ec. 5.4})$$

Una vez que se conocen estas propiedades, se obtendrán los valores de la entalpía y la entropía del aire en cada punto del proceso. Para ello se interpolará en la tabla de la propiedad buscada, ya sea en las de aire húmedo o en las de aire seco.

A continuación se muestra la ecuación genérica para interpolar entre dos variables x e y (ecuación 5.5). Sin embargo, para cada caso habrá que poner la variable correspondiente (presión, temperatura, humedad, etc) y hacer tantos pasos de interpolación como número de variables independientes haya implicadas. Por ejemplo, para interpolar una entalpía en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa, habrá que realizar tres pasos de interpolación. No obstante, esto quedará más claro cuando se explique la programación de las interpolaciones en la herramienta en el apartado 8.2. Procedimiento de interpolación en el programa diseñado.

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1) \quad (\text{ec. 5.5})$$

5.2.2.- Puntos ideales del proceso (los terminados en “s”)

Habrán algunas excepciones dentro del proceso donde no se podrá seguir el procedimiento normal para conocer las propiedades del fluido en ese punto, ya que son puntos ficticios que se utilizan para calcular el rendimiento de las máquinas. Esto ocurre por ejemplo en los puntos de salida isentrópica de los compresores. En estos puntos habrá que proceder de forma inversa a lo anterior, partiendo ahora de la presión, la humedad absoluta y la entropía para obtener la temperatura, la humedad relativa y la entalpía.

Recordando un poco de teoría, se entenderá mejor el significado de estos puntos. Los compresores, como cualquier otra máquina, no trabajan al 100% de su rendimiento, ya que tienen unas pérdidas. En otras palabras, no todo el trabajo que consumen lo transforman en trabajo útil, sino que una parte se desaprovecha en forma de pérdidas. Cuando se trata de compresores, al igual que ocurre con otras máquinas fluidomecánicas como las turbinas, se suele utilizar su rendimiento isentrópico para analizar cuál es su grado de pérdidas. De esta forma, un compresor ideal sería aquel capaz de producir una compresión adiabática e internamente reversible, lo que equivale a decir que mantenga constante la entropía de su fluido de trabajo en la salida respecto a la entrada.



Desgraciadamente, esto es imposible y ninguna máquina es capaz de trabajar con un rendimiento del 100% por lo que siempre hay un porcentaje de pérdidas. Estas pérdidas se producen porque la compresión real que se produce no es internamente reversible. En su lugar, se malgasta parte de la energía en calentar el fluido más de lo esperado, provocando que la entropía real de salida sea mayor que la de entrada. Esto produce unas pérdidas, ya que ese trabajo del compresor que se ha convertido en energía térmica ya no podrá volver a transformarse en energía útil en una etapa posterior de expansión, a diferencia de lo que ocurre con la energía empleada en aumentar la presión del fluido. No obstante, es importante no confundir un proceso isentrópico con uno isotérmico, ya que en el isentrópico la entropía no varía, pero al aumentar la presión, la temperatura también tendrá un ligero aumento, mientras que en un proceso isotérmico la temperatura se mantiene constante. En la Figura 5.2 se puede ver cómo sería la comparación de una compresión isentrópica frente a una compresión real.

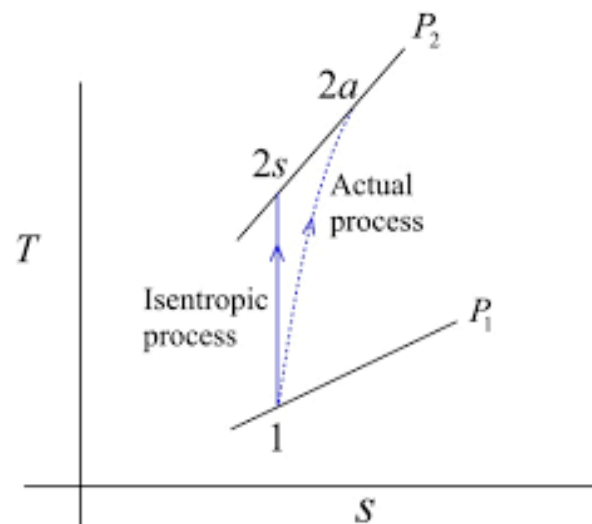


Figura 5.2. - Diagrama T-s de una compresión isentrópica (izquierda) y otra real (derecha)

Por tanto estos puntos isentrópicos son puntos ficticios del proceso que no existen en la realidad, por lo que no se puede medir la temperatura con un sensor como ocurría en los anteriores. De esta forma, las únicas propiedades que se podrán conocer de estos puntos son las derivadas del análisis teórico de un proceso isentrópico.

La primera es que su entropía será igual a la que tenía el fluido a la entrada del compresor, poniéndolo en forma de genérica la entropía de un punto is será igual a la del punto $i - 1$, por ejemplo la entropía del punto $2s$ será igual a la del punto 1.

La segunda es que la presión de la salida isentrópica será igual a la de la salida real, ya que se busca conocer el caso ideal para alcanzar la misma presión que se consigue en la realidad. Así la presión de un punto is será igual a la del punto i .

Por último aparece la humedad absoluta, la cual se mantendrá igual que la de entrada del compresor, ya que en un compresor al aumentar la temperatura, disminuye la humedad



relativa en la salida, por lo que aún con 100% de humedad relativa en la entrada, la salida estará lejos de la saturación, provocando que la humedad absoluta se mantenga constante. Así la humedad absoluta de un punto i_s será igual a la del punto $i - 1$.

Con estas tres variables independientes entre sí ya se pueden conocer las demás propiedades, las cuales se obtendrán interpolando en las tablas de propiedades termodinámicas del aire. En este caso, se calculará primero la temperatura, para lo que será necesaria una tabla que relacione ésta con la entropía, la presión y la humedad absoluta, que son las tres variables conocidas en los puntos ideales. Una vez se obtiene la temperatura se procederá de igual forma a los puntos reales para calcular la humedad relativa y la entalpía.

5.2.3.- Resumen de obtención de las propiedades del aire en todos los puntos del proceso

A continuación se recogen en las siguientes tablas (Tabla 5.1, Tabla 5.2, Tabla 5.3, Tabla 5.4 y Tabla 5.5) el procedimiento seguido para calcular todos los puntos del proceso, siendo la medida de esa que genere un sensor, calculándola o interpolando en las tablas del aire.



Punto 0: Aire ambiental (Entrada al sistema)		
Presión	P_0	P_{amb}
Temperatura	T_0	TE 500
Humedad relativa	HR_0	MI 501
Humedad absoluta	w_0	Calculada
Entalpía	h_0	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_0	Interpolada en las tablas de aire
Punto 1: Salida del filtro de aspiración del BLAC y entrada en el BLAC 1		
Presión	P_1	$P_{amb} - PDT\ 500$
Temperatura	T_1	TE 500
Humedad absoluta	w_1	Calculada
Humedad relativa	HR_1	Calculada
Entalpía	h_1	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_1	Interpolada en las tablas de aire
Punto 2: Salida del BLAC 1 y entrada al intercambiador de calor IC1		
Presión	P_2	PT 502 + PT 502
Temperatura	T_2	TE 502
Humedad absoluta	w_2	Calculada
Humedad relativa	HR_2	Calculada
Entalpía	h_2	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_2	Interpolada en las tablas de aire
Punto 2s: Salida del BLAC 1 en caso isentrópico		
Presión	P_{2s}	P_2
Entropía	s_{2s}	s_1
Humedad absoluta	w_{2s}	w_1
Temperatura	T_{2s}	Interpolada en las tablas de aire
Humedad relativa	HR_{2s}	Calculada
Entalpía	h_{2s}	Interpolada en las tablas de aire
Punto 3: Salida del intercambiador de calor IC1 y entrada en el BLAC 2		
Presión	P_3	PT 502
Temperatura	T_3	TE 503
Humedad absoluta	w_3	Calculada
Humedad relativa	HR_3	Calculada
Entalpía	h_3	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_3	Interpolada en las tablas de aire

Tabla 5.1. – Procedimiento de cálculo de los puntos del proceso (puntos del 0 al 3)



Punto 4: Salida del BLAC 2 y entrada al intercambiador de calor IC2		
Presión	P_4	PT 504 + PT 504
Temperatura	T_4	TE 504
Humedad absoluta	w_4	Calculada
Humedad relativa	HR_4	Calculada
Entalpía	h_4	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_4	Interpolada en las tablas de aire
Punto 4s: Salida del BLAC 2 en caso isentrópico		
Presión	P_{4s}	P_4
Entropía	s_{4s}	s_3
Humedad absoluta	w_{4s}	w_3
Temperatura	T_{4s}	Interpolada en las tablas de aire
Humedad relativa	HR_{4s}	Calculada
Entalpía	h_{4s}	Interpolada en las tablas de aire
Punto 5: Salida del intercambiador de calor IC2 y entrada en el BLAC 3		
Presión	P_5	PT 504
Temperatura	T_5	TE 505
Humedad absoluta	w_5	Calculada
Humedad relativa	HR_5	Calculada
Entalpía	h_5	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_5	Interpolada en las tablas de aire
Punto 6: Salida del BLAC 3 y entrada al intercambiador de calor IC3		
Presión	P_6	PT 506 + PT 506
Temperatura	T_6	TE 506
Humedad absoluta	w_6	Calculada
Humedad relativa	HR_6	Calculada
Entalpía	h_6	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_6	Interpolada en las tablas de aire
Punto 6s: Salida del BLAC 3 en caso isentrópico		
Presión	P_{6s}	P_6
Entropía	s_{6s}	s_5
Humedad absoluta	w_{6s}	w_5
Temperatura	T_{6s}	Interpolada en las tablas de aire
Humedad relativa	HR_{6s}	Calculada
Entalpía	h_{6s}	Interpolada en las tablas de aire

Tabla 5.2. – Procedimiento de cálculo de los puntos del proceso (puntos del 4 al 6s)



Punto 7: Salida del intercambiador de calor IC3 y entrada en el BLAC 4		
Presión	P_7	PT 506
Temperatura	T_7	TE 507
Humedad absoluta	w_7	Calculada
Humedad relativa	HR_7	Calculada
Entalpía	h_7	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_7	Interpolada en las tablas de aire
Punto 8: Salida del BLAC 4 y entrada al DCA		
Presión	P_8	PT 510
Temperatura	T_8	TE 510
Humedad absoluta	w_8	Calculada
Humedad relativa	HR_8	Calculada
Entalpía	h_8	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_8	Interpolada en las tablas de aire
Punto 8s: Salida del BLAC 4 en caso isentrópico		
Presión	P_{8s}	P_8
Entropía	s_{8s}	s_7
Humedad absoluta	w_{8s}	w_7
Temperatura	T_{8s}	Interpolada en las tablas de aire
Humedad relativa	HR_{8s}	Calculada
Entalpía	h_{8s}	Interpolada en las tablas de aire
Punto 9: Salida del DCA y entrada al bloque de los prepurificadores y el filtro de polvo		
Presión	P_9	PT 534
Temperatura	T_9	TE 534
Humedad absoluta	w_9	Calculada
Humedad relativa	HR_9	Calculada
Entalpía	h_9	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_9	Interpolada en las tablas de aire
Punto 10: Salida del bloque de los prepurificadores y el filtro de polvo		
Presión	P_{10}	PT 580
Temperatura	T_{10}	TE 581
Humedad absoluta	w_{10}	Calculada
Humedad relativa	HR_{10}	Calculada
Entalpía	h_{10}	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_{10}	Interpolada en las tablas de aire

Tabla 5.3. - Procedimiento de cálculo de los puntos del proceso (puntos del 7 al 10)



Punto 11: Entrada al filtro de aspiración del BAC		
Presión	P_{11}	PT 580
Temperatura	T_{11}	TE 581
Humedad absoluta	w_{11}	Calculada
Humedad relativa	HR_{11}	Calculada
Entalpía	h_{11}	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_{11}	Interpolada en las tablas de aire
Punto 12: Salida del filtro de aspiración del BAC y entrada al BAC 1		
Presión	P_{12}	PI 594
Temperatura	T_{12}	TE 581
Humedad absoluta	w_{12}	Calculada
Humedad relativa	HR_{12}	Calculada
Entalpía	h_{12}	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_{12}	Interpolada en las tablas de aire
Punto 13: Salida del BAC 1 y entrada al intercambiador de calor IC4		
Presión	P_{13}	PT 593 + PDT 593
Temperatura	T_{13}	TE 592
Humedad absoluta	w_{13}	Calculada
Humedad relativa	HR_{13}	Calculada
Entalpía	h_{13}	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_{13}	Interpolada en las tablas de aire
Punto 13s: Salida del BAC 1 en caso isentrópico		
Presión	P_{13s}	P_{13}
Entropía	s_{13s}	s_{12}
Humedad absoluta	w_{13s}	w_{12}
Temperatura	T_{13s}	Interpolada en las tablas de aire
Humedad relativa	HR_{13s}	Calculada
Entalpía	h_{13s}	Interpolada en las tablas de aire
Punto 14: Salida del intercambiador de calor IC4 y entrada al BAC 2		
Presión	P_{14}	PT 593
Temperatura	T_{14}	TE 593
Humedad absoluta	w_{14}	Calculada
Humedad relativa	HR_{14}	Calculada
Entalpía	h_{14}	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_{14}	Interpolada en las tablas de aire

Tabla 5.4. – Procedimiento de cálculo de los puntos del proceso (puntos del 11 al 14)



Punto 15: Salida del BAC 2 y entrada al aftercooler del BAC		
Presión	P_{15}	PI 594 + PDT 594
Temperatura	T_{15}	TE 595
Humedad absoluta	w_{15}	Calculada
Humedad relativa	HR_{15}	Calculada
Entalpía	h_{15}	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_{15}	Interpolada en las tablas de aire
Punto 15s: Salida del BAC 2 en caso isentrópico		
Presión	P_{15s}	P_{15}
Entropía	s_{15s}	s_{14}
Humedad absoluta	w_{15s}	w_{14}
Temperatura	T_{15s}	Interpolada en las tablas de aire
Humedad relativa	HR_{15s}	Calculada
Entalpía	h_{15s}	Interpolada en las tablas de aire
Punto 16: Salida del aftercooler del BAC (Salida de aire a alta presión)		
Presión	P_{16}	PT 594
Temperatura	T_{16}	TE 598
Humedad absoluta	w_{16}	Calculada
Humedad relativa	HR_{16}	Calculada
Entalpía	h_{16}	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_{16}	Interpolada en las tablas de aire
Punto 17: Desvío de aire hacia el PHX (Salida de aire a baja presión)		
Presión	P_{17}	PT 580
Temperatura	T_{17}	TE 581
Humedad absoluta	w_{17}	Calculada
Humedad relativa	HR_{17}	Calculada
Entalpía	h_{17}	Interpolada en las tablas de aire
Entropía	s_{17}	Interpolada en las tablas de aire

Tabla 5.5. – Procedimiento de cálculo de los puntos del proceso (puntos del 15 al 17)

5.3.- Caudales del proceso

Otro punto a tener en cuenta a la hora de analizar el sistema será la cantidad de fluido que circula por cada equipo, ya que no pasa lo mismo por todos ellos. Para conocer esta cantidad de fluido que pasa por cada uno de ellos se recurrirá a los balances de materia que sean necesarios hasta que el sistema quede completamente definido.

Es importante resaltar que para realizar los balances de materia habrá que calcular los flujos másicos de materia en cada punto, ya que es la masa la que tiene que mantenerse constante y no el caudal volumétrico. En otras palabras, en un volumen de control como por ejemplo en un equipo, si por un lado entran 100 kg/s de aire por el otro extremo saldrán otros 100 kg/s de aire. En cambio si entran 100 m³/s de aire, sólo saldrían 100 m³/s



de aire en el caso de que las condiciones de presión y temperatura se mantuviesen constantes, lo cual no ocurrirá casi nunca en estas máquinas, por lo que el flujo másico se mantendrá constante entre la entrada y la salida, pero el caudal volumétrico variará.

De esta forma se procederá a realizar dos conjuntos de balances de materia, ya que al tratarse de aire húmedo, por la instalación circulan dos fluidos de manera simultánea, el aire seco y el agua, pero ambos deberán cumplir los balances de materia individualmente.

5.3.1.- Balance de materia del aire seco

Como ya se comentó, el balance se va a realizar en base a los flujos másicos de materia, por lo que lo primero que habrá que hacer será obtener éstos a partir de las mediciones de los sensores de la planta. Estos sensores miden el caudal volumétrico en forma de Nm^3/h , compensando el volumen que tiene el gas en realidad con los sensores de presión y temperatura que tiene asociados (ver P&ID en los planos) para mostrar el volumen que tendría en condiciones normales.

Aunque habitualmente las condiciones normales suelen ser 101325 Pa de presión (1 atm) y 20 °C de temperatura, en algunos tipos de instalaciones industriales pueden ser diferentes. Así, según pone el manual de planta de Gijón III (Praxair España S.L.U., 1998), ésta está considerada como una planta química por lo que considera como condiciones normales 101325 Pa de presión y 0 °C de temperatura. Por tanto, el sensor de caudal mostrará el caudal volumétrico que tendría el aire en base seca y en condiciones de 101325 Pa y 0 °C. De esta forma, calculando la densidad del aire en sus condiciones normales y multiplicando ésta por el caudal volumétrico, se obtendrá el caudal másico que pasa por ese punto.

Dado que hay determinados caudalímetros que sólo se utilizan para la fase de arranque de la planta y no en funcionamiento continuo, en algunas zonas aparecen dos sensores superpuestos para un mismo flujo. Además, debido a la diferente precisión de los sensores utilizados y de los diferentes niveles de ruido generado en sus mediciones, se podría decir que unos sensores son mejores que otros. Así los sensores de caudal de tipo venturi son mejores que los de tipo pitot, ya que muestran una medida más precisa y su nivel de ruido es menor provocando menores variaciones en su medición.

De esta forma se prescindirá de las mediciones de los sensores FT 510 y FT 595 que son de tipo pitot, ya que por esos puntos pasará el mismo flujo másico que lo hará por los sensores FT 580 y FT 598A respectivamente, que son de tipo venturi y generarán una medida más precisa. Hay que tener en cuenta que esta suposición sólo sirve para el funcionamiento en continuo de la planta. En el arranque no serviría porque la válvula del venteo de aire posterior al BLAC estaría abierta, provocando que el flujo másico de aire fuese diferente entre el sensor FT 510 y el FT 580. Asimismo, la válvula de recirculación



de aire para evitar el oleaje en el BAC se abre en el arranque con lo que el flujo másico del sensor FT 595 no es el mismo que el del FT 598A.

Resumiendo, los flujos másicos de aire seco por el sistema de compresión y purificación de aire de la planta serán sólo tres. El primero, es el flujo másico de aire seco que entra a la planta desde el ambiente y va desde la entrada al filtro de aspiración del BLAC hasta el desvío de aire a baja presión. Este primer flujo vendrá determinado por la medición del sensor FT 580. En ese punto, la corriente se divide en dos, una se dirige hacia el filtro de aspiración del BAC y terminará en la salida de aire a alta presión. Esta corriente de aire a alta presión vendrá determinada por la medición del sensor FT 598A. Por último, la otra corriente que sale de la división de la corriente de entrada, será la de aire a baja presión, la cual se calculará como la diferencia de las dos anteriores.

En la Figura 5.3 se puede apreciar la distribución de estas corrientes, así como la ubicación de los sensores de caudal mencionados.

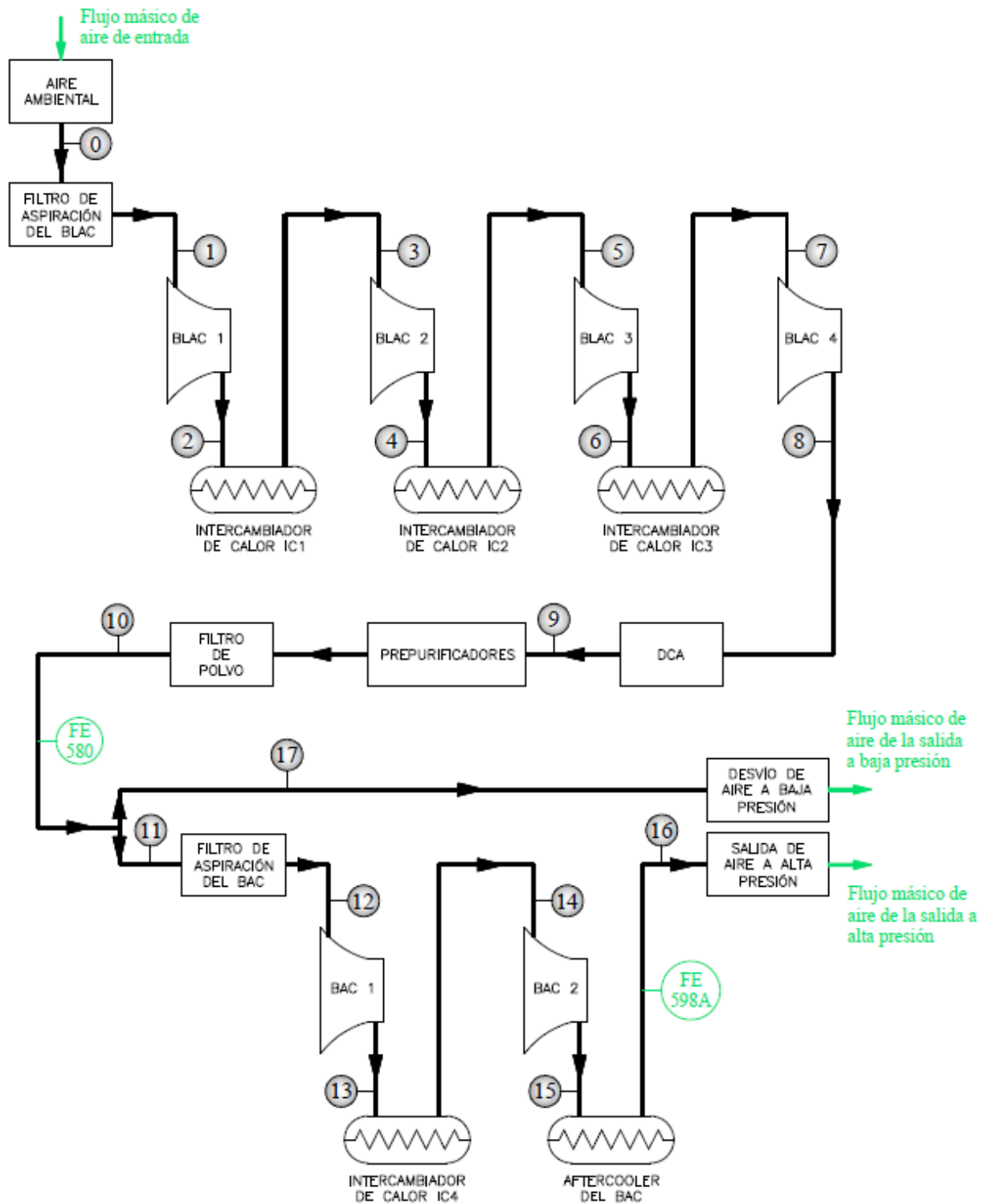


Figura 5.3. – Distribución de las corrientes de aire seco por el proceso



5.3.2.- Balance de materia del agua

La corriente de agua que lleva el aire tendrá un poco más de complicación, ya que variará muchas más veces que la anterior.

El máximo flujo másico de agua será el que entre al filtro de aspiración del BLAC desde el ambiente acompañando al aire, el cual viene en forma de aire húmedo. A partir de ese momento, esta cantidad de agua podrá mantenerse constante o disminuir al pasar por cada uno de los equipos, hasta llegar a los prepurificadores donde se extrae toda la humedad del aire y sale de ellos como aire y, por tanto, a partir de este punto el flujo másico de agua será cero.

En realidad, como ya se explicó anteriormente, sólo en ciertos equipos puede disminuir la humedad entre la entrada y la salida y son los intercambiadores de calor, tanto los de tipo carcasa y tubos como el de contacto directo (DCA).

Como se puede apreciar en la Figura 5.4 , todo el agua que entra al sistema de compresión lo hace por el filtro de aspiración del BLAC ya que lo hace acompañando al aire que entra al sistema. A partir de ese momento, el agua que circula por el proceso va disminuyendo según pasa por los diferentes intercambiadores de calor, donde parte de este agua puede salir del sistema por el drenaje de estos si se alcanza el punto de saturación. Por último en los prepurificadores se elimina del sistema todo el agua restante gracias a un proceso de adsorción.

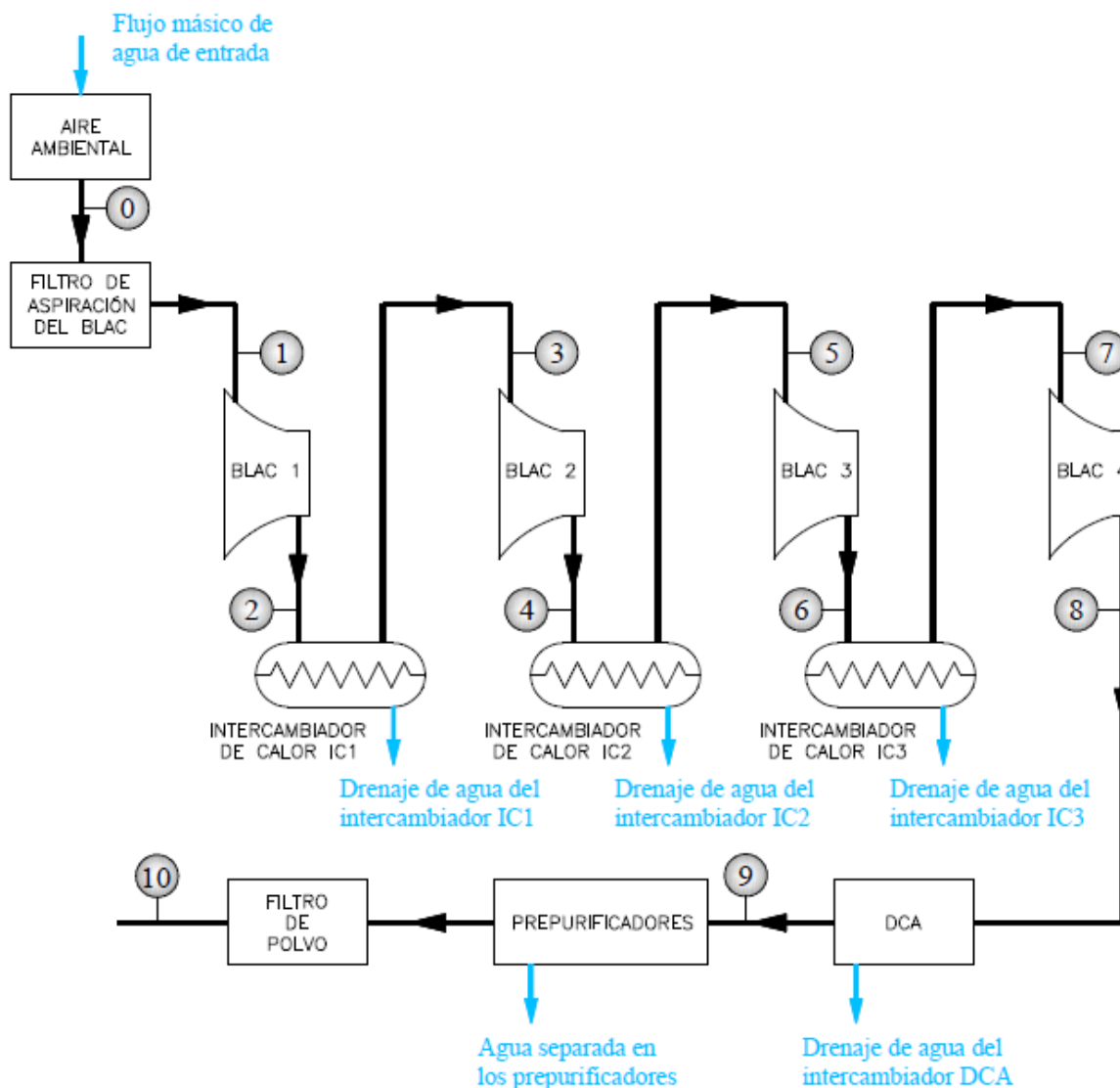


Figura 5.4. – Flujos de entrada y salida de agua del sistema en el lado de aire húmedo

Este drenaje de agua de los intercambiadores se debe a que la humedad de saturación a la salida es menor que la que trae el aire húmedo, a causa de su disminución de temperatura, lo que provoca que parte del vapor de agua del aire se condense y se vaya por los drenajes, separándose de la corriente de aire. Según se avanza en el proceso, este fenómeno se hace más notorio, siendo casi imperceptible en el intercambiador IC1 y muy acusado en el DCA.

De esta manera, con el flujo másico de aire seco y la humedad absoluta en cada punto del proceso se calcula el flujo másico de agua para todos los puntos del proceso.

$$y_i = x_i * w_i \tag{ec. 5.6}$$

Posteriormente, haciendo el balance de materia del agua a cada equipo individualmente se podría obtener el flujo másico de agua que sale por los drenajes. En la



Figura 5.5 se puede ver cómo sería el balance de materia de un intercambiador de calor. Para empezar señalar que el lado de carcasa por el que circula el aire húmedo y el lado de tubos por el que circula el agua de refrigeración no están en contacto, por lo el flujo másico de agua de refrigeración que entra por la derecha es el mismo que el que sale por la izquierda. Asimismo, por el drenaje no puede salir aire, por lo que el mismo flujo másico de aire seco (flechas verdes en la Figura 5.5) que entra al intercambiador es el que sale. En cambio, se puede apreciar como el agua tiene una entrada y dos salidas (la que sale con el aire y la que sale por el drenaje). Esto implica que haya que realizar un balance de materia al agua en cada intercambiador para conocer el flujo másico de agua que se pierde por los drenajes.

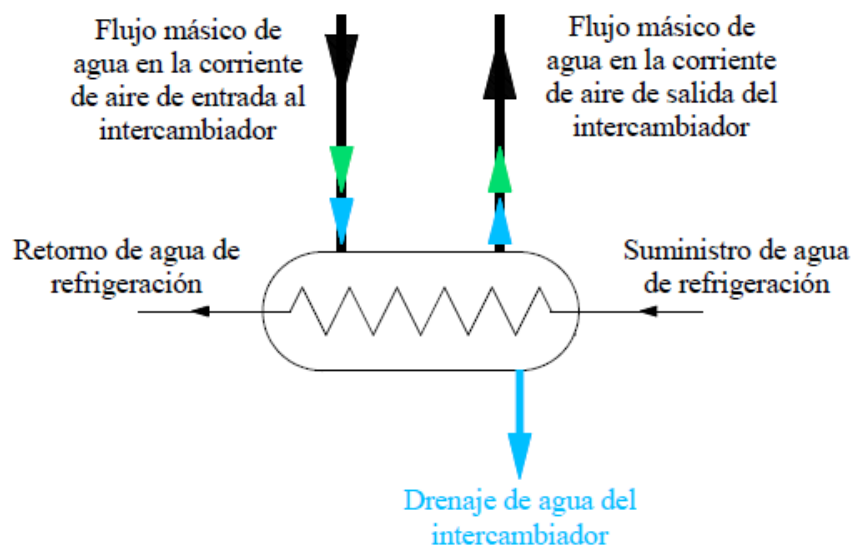


Figura 5.5. - Balance de materia a un intercambiador de calor

En este caso se tomará como criterio de signos positivo para los flujos entrantes y negativos para los salientes.

$$\sum \dot{y} = 0 \rightarrow \dot{y}_{entrada} - \dot{y}_{salida} - \dot{y}_{drenaje} = 0 \quad (\text{ec. 5.7})$$

$$\dot{y}_{drenaje} = \dot{y}_{entrada} - \dot{y}_{salida} \quad (\text{ec. 5.8})$$

Aunque aquí sólo se haya hecho para el caso de un intercambiador de calor, se aplicará el mismo procedimiento para calcular los drenajes tanto en todos los intercambiadores de calor del sistema por los que circule aire húmedo, como en el DCA y en los prepurificadores.



5.4.- Análisis de los compresores

5.4.1.- Rendimiento isentrópico de los compresores

Como parte fundamental de este proyecto, se encuentra el análisis de la eficiencia energética del sistema de compresión, por lo que no podía faltar calcular el rendimiento de las diferentes etapas de compresión que componen este sistema. Con este objetivo se calculará el rendimiento isentrópico de las mismas, el cual ya se explicó anteriormente en esta memoria en el apartado “5.2.2 Puntos ideales del proceso”.

Simplemente recordar que este rendimiento relaciona el salto entálpico que sufre el fluido de trabajo ($h_{salida} - h_{entrada}$) respecto al que podría sufrir en caso de que ese fluido no se calentase más de lo necesario que para mantener su entropía constante ($h_{salida_{isentrópica}} - h_{entrada}$). De esta forma la ecuación genérica del rendimiento isentrópico de un compresor quedaría de la siguiente forma.

$$\eta_{compresor} = \frac{h_{salida_{isentrópica}} - h_{entrada}}{h_{salida} - h_{entrada}} \quad (\text{ec. 5.9})$$

Teniendo en cuenta que este rendimiento está representado en tanto por uno. Si se quiere representar el mismo como un valor porcentual, simplemente será necesario multiplicar por 100 el resultado obtenido.

Asimismo, las ecuaciones concretas que se corresponderían a cada una de las 6 etapas de compresión del sistema (las 4 etapas del BLAC y las 2 etapas del BAC) serían las siguientes:

$$\eta_{BLAC1} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (\text{ec. 5.10})$$

$$\eta_{BLAC2} = \frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3} \quad (\text{ec. 5.11})$$

$$\eta_{BLAC3} = \frac{h_{6s} - h_5}{h_6 - h_5} \quad (\text{ec. 5.12})$$

$$\eta_{BLAC4} = \frac{h_{8s} - h_7}{h_8 - h_7} \quad (\text{ec. 5.13})$$

$$\eta_{BAC1} = \frac{h_{13s} - h_{12}}{h_{13} - h_{12}} \quad (\text{ec. 5.14})$$

$$\eta_{BAC2} = \frac{h_{15s} - h_{14}}{h_{15} - h_{14}} \quad (\text{ec. 5.15})$$



Dado que todas las etapas de compresión se encuentran colocadas en serie en el sistema, se puede calcular el rendimiento isentrópico conjunto de todas las etapas de compresión (las 4 del BLAC y las 2 del BAC) como el producto de los rendimientos de cada una de ellas.

$$\eta_{conjunto\ compresión} = \eta_{BLAC1} * \eta_{BLAC2} * \eta_{BLAC3} * \eta_{BLAC4} * \eta_{BAC1} * \eta_{BAC2} \quad (\text{ec. 5.16})$$

5.4.2.- Incremento de presión en los compresores

Una forma sencilla de analizar el funcionamiento de cualquier compresor es ver cuál es el incremento de presión que ha aportado al fluido de trabajo, es decir, la diferencia entre la presión de salida del compresor y la de entrada al mismo.

$$\Delta P = P_{salida} - P_{entrada} \quad (\text{ec. 5.17})$$

No obstante, esta medida no es muy significativa dado que es una medida absoluta que no tiene en cuenta la presión con la que ya llega el fluido. No es lo mismo, un aumento de 1 bar en una corriente de aire que entra a 2 bar que una que entra a 20 bar. Para relativizar estas mediciones se recurre a la relación de presiones.

5.4.3.- Relación de presiones en los compresores

Asimismo otra variable importante a la hora de analizar un compresor suele ser la relación de presiones que existe entre la entrada y la salida del mismo. A diferencia del incremento de presiones mencionado anteriormente, el cual es una comparación absoluta entre la entrada y la salida, la relación de presiones permite una comparación relativa de las mismas. Para calcular esta relación de presiones en los compresores se utilizará la siguiente ecuación.

$$R_{P\ compresor} = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \quad (\text{ec. 5.18})$$

5.5.- Balance de energía en cada equipo

Dado que el proceso de separación de aire es un proceso continuo y no estático, se trabajará con balances de potencias en lugar de balances de energía como se hace habitualmente. Realmente, no hay mucha diferencia, ya que hacer un balance de energía equivale a hacer un balance de potencia con un tiempo de análisis de 1 segundo, ya que 1 watio equivale a 1 julio por cada segundo.

$$\text{Potencia [W]} = \frac{\text{Energía [J]}}{\text{Tiempo [s]}} \rightarrow \quad (\text{ec. 5.19})$$



$$\text{Energía [J]} = \text{Potencia [W]} * \text{Tiempo [s]}$$

Por lo tanto, como los sensores de los que dispone la planta miden potencias y no energías, se harán los balances en base de potencias y no de energías.

De esta forma se podrá calcular en cada equipo la variación de potencia que sufre el aire en un instante preciso. Esta variación de potencia se calculará haciendo un balance de potencia individual al equipo que se esté analizando. Al final, se deduce que simplemente queda como la diferencia entre la potencia del aire que entra menos la del aire que sale, siendo la potencia el producto del flujo másico de aire seco por la entalpía del aire.

$$\sum Pot = 0 \rightarrow Pot_{entrada} + \Delta Pot - Pot_{salida} = 0 \quad (\text{ec. 5.20})$$

$$\Delta Pot = Pot_{salida} - Pot_{entrada} = \dot{x}_{salida} * h_{salida} - \dot{x}_{entrada} * h_{entrada} \quad (\text{ec. 5.21})$$

Cabe destacar que el flujo másico tiene que ser el de aire seco \dot{x} y no el total \dot{m} (suma del de aire seco y el de agua), aunque sea un equipo del lado de aire húmedo del sistema. Esto ocurre porque la humedad ya se tiene en cuenta al calcular la entalpía con las tablas del aire húmedo, por lo que la entalpía obtenida siempre está referida a J / kg de aire seco, pese a tener una porción de agua, lo cual llevaría a un resultado erróneo si se multiplicase por el flujo másico total, en lugar del de aire seco.

Calculando la variación de potencia en cada uno de los equipos con la ecuación 5.21, ésta podrá salir con signo positivo o negativo. Según el criterio de signos utilizado en esta ecuación, en caso de salir con signo positivo significará que el equipo aporta energía al fluido de trabajo, lo cual ocurre en los compresores y en los prepurificadores, ya que en estos últimos se lleva a cabo una reacción exotérmica que aporta energía al aire. En cambio, en aquellos equipos en los que la variación de energía tenga signo negativo significará que el equipo le quita energía al fluido de trabajo, ya sea por el intercambio de energía con otro fluido (intercambiadores de calor) o por el simple rozamiento dentro del equipo (filtros).

En la Figura 5.6 se recogen todos los flujos de potencia que entran y salen del sistema de compresión y purificación de aire. En color azul se representan la potencia que entra o sale del sistema en la corriente de aire, que como se puede ver entra por el filtro de aspiración del BLAC y sale por el desvío de aire a baja presión y por la salida de aire a alta presión. En cuanto a las potencias aportadas o disipadas en cada equipo se aprecian dos grupos de equipos. Por un lado se encuentran aquellos equipos que aportan energía al sistema (todas las etapas de compresión y los prepurificadores), mientras que por el otro están los equipos que sacan energía del sistema (todos los intercambiadores de calor y los filtros).

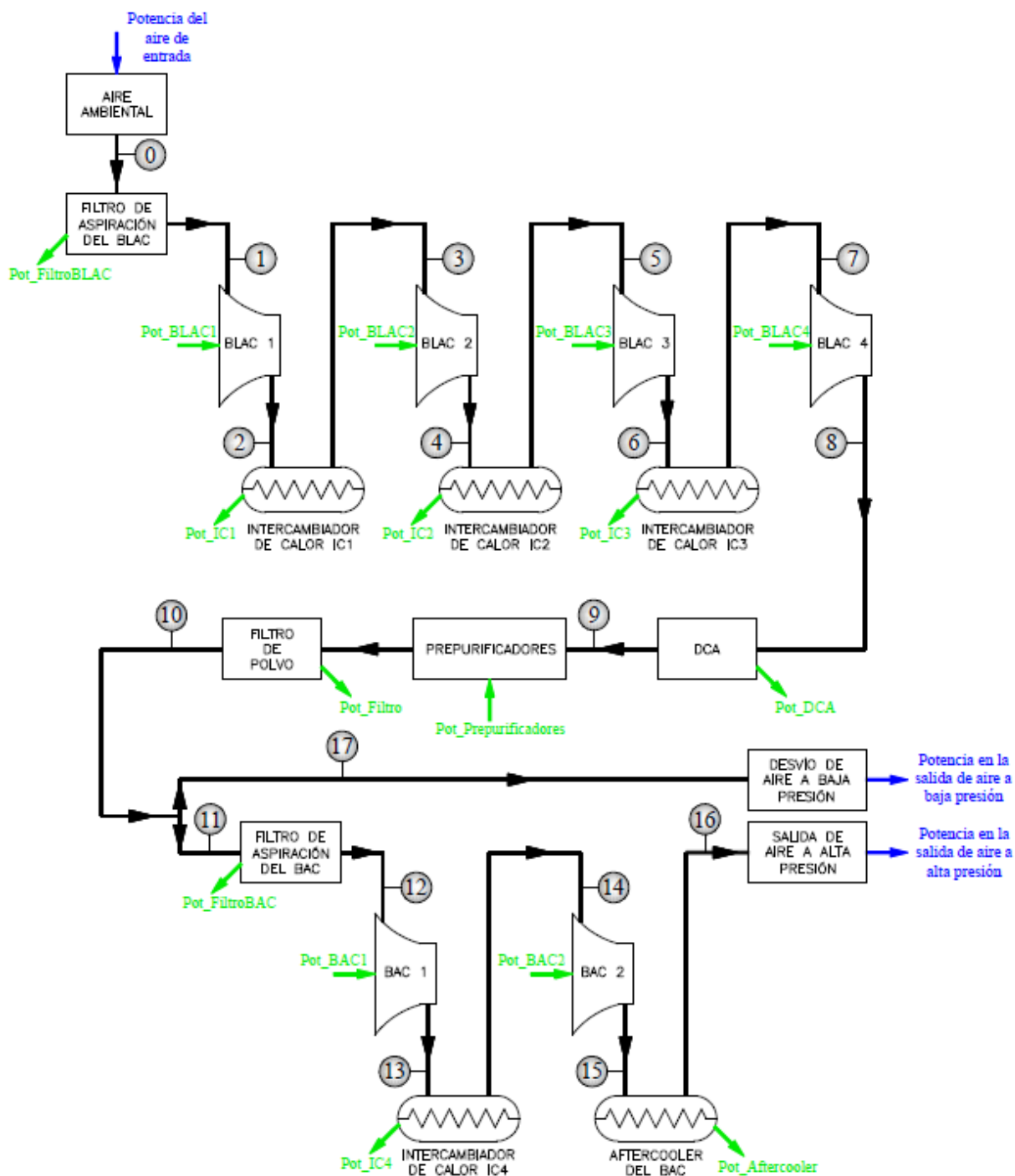


Figura 5.6. – Balance de potencia del sistema de compresión y purificación de aire

Como ya se comentó en el apartado “5.1 Esquema del sistema de compresión y purificación de aire”, los prepurificadores y el filtro de polvo se tendrán que analizar como un conjunto, lo que implicará que no pueda conocerse la variación de la potencia en cada uno de los equipos de manera individual.



A causa de esta razón no se calculará la variación de la potencia en ambos equipos como se indica en la Figura 5.6, sino que se sustituirá por la variación de la potencia en el bloque formado por ambos prepurificadores y el filtro de polvo. Así, el balance de potencias entre los puntos 9 y 10 será el mostrado en la Figura 5.7. Se supone como potencia aportada al sistema porque, aunque en el filtro se disipe energía, la energía que se aporta en los prepurificadores es mucho mayor que la pérdida en el filtro, por lo que la suma de ambas siempre saldrá positiva, es decir, potencia entrante al sistema.



Figura 5.7. – Simplificación del balance de potencias en los prepurificadores y el filtro de polvo

Estas variaciones de potencia en cada equipo no sólo sirven para ver cuánta potencia se gana o pierde en cada elemento y localizar los puntos de mayores pérdidas, sino que serán necesarias para el balance global de energía que se haga al sistema al final del programa para comprobar su error.

5.6.- Aprovechamiento de la potencia del motor del sistema de compresión

El sistema de compresión de aire cuenta con un motor eléctrico de 19,4 MW, el cual se encarga de mover las 6 etapas de compresión del sistema (las 4 etapas del BLAC y las 2 etapas del BAC). Este motor posee en su toma de corriente un sensor capaz de medir la potencia consumida por el mismo desde la red eléctrica. Gracias a esta medida se podrá conocer cuál es el grado de aprovechamiento de la potencia consumida por el motor y qué porcentaje de ésta llega realmente a provecharse en los compresores.

Toda la potencia consumida por el motor de la red eléctrica podrá seguir tres caminos. El primero será que se pierda en el propio motor en forma de pérdidas eléctricas (rondará entre el 0 y el 5% de la potencia consumida por el motor). El segundo camino será que se pierda a lo largo de los sistemas de transmisión entre el motor y los diferentes compresores, lo cual se englobará como pérdidas mecánicas (también estará entre el 0 y 5%). El resto será la potencia que se transmita a los compresores, la cual estará en torno al 90% de la potencia consumida por el motor.



A su vez esta potencia que llega a los compresores puede seguir dos caminos diferentes. El primero será que se transmita al fluido de trabajo como potencia útil, es decir, la empleada para aumentar la presión del aire (será función del rendimiento isentrópico de cada compresor y estará en torno al 80% de la potencia que le llega al compresor). El resto serán las pérdidas térmicas del compresor, es decir, la potencia empleada en calentar el fluido de trabajo (será inversamente proporcional al rendimiento isentrópico del compresor y estará en torno al 20% de la potencia del compresor). No obstante, ambas dos compondrán la potencia suministrada al fluido, ya sea útil o no, porque se está considerando que las pérdidas al ambiente son nulas.

A la hora de calcular estas potencias se hará en orden inverso al que lleva la energía, es decir se empezará por los compresores y se irá hacia atrás.

Para empezar, ya se conoce la potencia aportada por cada compresor al fluido, la cual se calculó anteriormente como la variación de potencia que sufría el fluido en cada equipo. Esta potencia aportada al fluido será la suma de la potencia útil del compresor y sus pérdidas térmicas. Para hallar éstas por separado simplemente habrá que aplicar el rendimiento isentrópico de cada compresor.

$$Pot_{\text{útil}} = \eta_{\text{compresor}} * \Delta P_{\text{compresor}} \quad (\text{ec. 5.22})$$

$$Pot_{\text{pérdidas térmicas}} = (1 - \eta_{\text{compresor}}) * \Delta P_{\text{compresor}} \quad (\text{ec. 5.23})$$

Dado que no cuenta con los sensores necesarios para conocer las pérdidas mecánicas y eléctricas por separado, éstas se calcularán como un conjunto a partir de la potencia consumida por el motor y la potencia que llega a los compresores.

$$Pot_{\text{pérdidas mecánicas y eléctricas}} = Pot_{\text{consumida}} - (\Delta P_{BLAC1} + \Delta P_{BLAC2} + \Delta P_{BLAC3} + \Delta P_{BLAC4} + \Delta P_{BAC1} + \Delta P_{BAC2}) \quad (\text{ec. 5.24})$$

Asimismo podría calcularse el rendimiento del conjunto formado por el motor eléctrico y la transmisión, es decir, el rendimiento electromecánico del sistema de compresión y que será el siguiente.

$$\eta_{\text{electromecánico}} = \frac{\Delta P_{BLAC1} + \Delta P_{BLAC2} + \Delta P_{BLAC3} + \Delta P_{BLAC4} + \Delta P_{BAC1} + \Delta P_{BAC2}}{Pot_{\text{consumida}}} \quad (\text{ec. 5.25})$$

Por último, podría representarse el aprovechamiento de la potencia consumida por el motor eléctrico, como la relación entre la suma de todas las potencias útiles de las 6 etapas de compresión y la potencia consumida por el motor, lo cual vendría a representar el rendimiento global del sistema de compresión.



$$\eta_{\text{sistema de compresión}} = \frac{\sum Pot_{\text{útil}}}{Pot_{\text{consumida}}} \quad (\text{ec. 5.26})$$

$$\begin{aligned} \sum Pot_{\text{útil}} = & Pot_{\text{útil}_{BLAC1}} + Pot_{\text{útil}_{BLAC2}} + Pot_{\text{útil}_{BLAC3}} + Pot_{\text{útil}_{BLAC4}} \\ & + Pot_{\text{útil}_{BAC1}} + Pot_{\text{útil}_{BAC2}} \end{aligned} \quad (\text{ec. 5.27})$$



6.- PASOS PREVIOS AL DISEÑO DEL PROGRAMA INFORMÁTICO

Una vez que se conoce el funcionamiento del sistema y se ha completado el análisis teórico del mismo, se obtiene el procedimiento a seguir para analizar el sistema de compresión y purificación de aire. A continuación ya se puede plasmar todo lo recogido en los apartados anteriores de esta memoria dentro de un programa informático, con el que poder analizar este sistema.

6.1.- Elección del software a utilizar

Uno de los principales requisitos que impuso la empresa a la hora de realizar esta herramienta es que estuviera escrita en un lenguaje que pudiera ser ejecutado por alguno de los programas que la empresa ya tiene instalados. De esta forma, se cumplían simultáneamente dos aspectos importantes para ellos. El primero sería el simple ahorro de dinero, ya que no habría que comprar ninguna licencia de otro software diferente a los que ya tienen. El segundo sería la comodidad para trabajar con ella, ya que al utilizar algún programa de los que ya tienen instalados, sus usuarios no tendrían que gastar parte de su tiempo en aprender nuevos programas y tampoco tendrían que adaptarse a trabajar con nuevas interfaces de usuario a los que no están acostumbrados.

Tras analizar todos los programas con los que contaba la empresa, se comprobó que estos no cumplían lo esperado para el proyecto. Ninguno de ellos era un programa específicamente de ingeniería, por lo que no podrían aportar unos datos imprescindibles para este estudio, como son las propiedades del aire en diferentes condiciones de presión y temperatura.

Pese a ello, finalmente se utilizó uno de estos programas. Se optó por usar el software Microsoft Excel, el cual parecía el más apropiado entre los programas de los que disponía la empresa. Excel es un software extremadamente potente y versátil dentro de la sencillez que le caracteriza, el cual es capaz de llevar a cabo múltiples cálculos de manera casi inmediata y mostrarlos con su valor numérico o utilizando una gran variedad de gráficas y demás elementos visuales. Además esta sencillez, lo hace sumamente apropiado, ya que es un entorno al que el usuario está acostumbrado, evitando así navegar por complicados menús e interfaces de usuario.

Incluso en caso de alcanzar una programación avanzada, el programa podrá realizar todos los cálculos por sí solo y de manera completamente autónoma, con lo que el usuario no necesitará hacer ningún cálculo. Esto posee dos ventajas principalmente. La primera y más evidente, la comodidad para el usuario, ya que simplemente con ejecutar el programa



ya dispondrá de todos los resultados. La segunda y no menos importante, es la eliminación de posibles errores del usuario en caso de que tuviera que interactuar con el programa para calcular alguna parte del mismo.

El único inconveniente es la incapacidad de obtener los valores de las propiedades del aire del mismo programa. En su lugar, se calcularán y copiarán a la herramienta todas las tablas de las propiedades termodinámicas del aire necesarias y se implementará una función dentro del propio programa que le permita a éste calcular estos valores de forma autónoma.

6.2.- Estructura del libro de Excel

Dado que la herramienta diseñada estará escrita en Excel, lo primero que se hará será explicar la estructura de este libro de Excel, cuáles son sus diferentes hojas de cálculo y para qué sirve cada una de ellas. En los sucesivos apartados de esta memoria se desgranarán cada una de las hojas de cálculo para explicar detalladamente el funcionamiento de las mismas, así como los cálculos llevados a cabo en ellas.

A continuación se enumeran todas las hojas con las que cuenta el libro, así como una breve explicación general de la misma, lo cual otorgue al lector una visión general del programa.

Índice del libro de Excel:

- Hoja “Índice de hojas”: en ella se muestra un índice de las principales hojas del libro, así como los hipervínculos para ir a ellas.

Hojas referentes a las tablas con las propiedades termodinámicas del aire:

- Hoja “Entalpía Aire Húmedo”: en ella se recogen las 11 tablas con los valores de la entalpía del aire húmedo en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa.
- Hoja “Entropía Aire Húmedo”: en ella se recogen las 11 tablas con los valores de la entropía del aire húmedo en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa.
- Hoja “Temperatura Aire Húmedo”: en ella se recogen las 13 tablas con los valores de la temperatura del aire húmedo en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta.
- Hoja “Entalpía Aire Seco”: en ella se recoge la tabla con los valores de la entalpía del aire seco en función de la presión y la temperatura.



- Hoja “Entropía Aire Seco”: en ella se recoge la tabla con los valores de la entropía del aire seco en función de la presión y la temperatura.
- Hoja “Temperatura Aire Seco”: en ella se recoge la tabla con los valores de la temperatura del aire seco en función de la presión y la entropía.
- Hoja “Tablas auxiliares”: en ella se recogen unas tablas creadas para calcular las interpolaciones de las propiedades del aire.

Hojas referentes al estado de funcionamiento del sistema en cada momento:

- Hoja “Estado actual”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento actual del sistema.
- Hoja “Estado hace 1 semana”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace una semana.
- Hoja “Estado hace 2 semanas”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace dos semanas.
- Hoja “Estado hace 3 semanas”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace tres semanas.
- Hoja “Estado hace 4 semanas”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace cuatro semanas.
- Hoja “Estado hace 5 semanas”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace cinco semanas.
- Hoja “Estado hace 6 semanas”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace seis semanas.
- Hoja “Estado hace 7 semanas”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace siete semanas.
- Hoja “Estado hace 8 semanas”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace ocho semanas.
- Hoja “Estado hace 9 semanas”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace nueve semanas.
- Hoja “Estado hace 10 semanas”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace diez semanas.
- Hoja “Estado hace 11 semanas”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace once semanas.
- Hoja “Estado hace 12 semanas”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema hace doce semanas.
- Hoja “Estado personalizado”: recoge todos los cálculos necesarios y los resultados del funcionamiento del sistema en el momento que escoja el usuario.



Histórico del último trimestre:

- Hoja “Histórico del trimestre”: aglutina todos los resultados de las hojas referentes al estado de funcionamiento del sistema representándolos en forma de gráficos. También calcula los promedios tanto del último mes como de todo el trimestre, generando alarmas en los valores puntuales que se desvíen de estos promedios.



7.- ÍNDICE DE HOJAS

La primera hoja del libro de Excel será la pantalla de inicio del programa. En la Figura 7.1 se puede apreciar una captura de pantalla de la misma. En su encabezado aparecerá el título del programa, donde se recoge cuál es la parte analizada por el programa y en qué planta se encuentra.



Figura 7.1. – Índice de hojas del libro de Excel

A continuación, se ha programado un índice interactivo formado por una serie de botones donde se recogen las principales hojas de usuario del programa. Se habla de hojas de usuario porque en el índice sólo aparecen aquellas hojas que se considera que el usuario necesitará acceder a ellas en algún momento.

De esta forma no se recogen en este índice las hojas referentes a las tablas de las propiedades termodinámicas del aire. Estas hojas quedan excluidas del índice porque se



consideran parte de la programación y el usuario no tendría por qué necesitar acceder a ellas, a diferencia de las otras, donde por ejemplo ante un valor anómalo en el rendimiento de un equipo el usuario irá a la hoja correspondiente a esa semana para ver cuáles eran todas las variables concretas de ese equipo (presión, temperatura, flujo másico, etc) para averiguar dónde estaba el problema.

Para programar este índice interactivo se creó una red de hipervínculos que conectasen las diferentes hojas del libro de Excel. Con esto se consiguió que simplemente pulsando sobre el botón de la hoja buscada, el programa lleve al usuario a la misma, sin necesidad de que éste tenga que buscarla manualmente entre todas las hojas que posee el libro, aportando fluidez a su uso, tanto por rapidez como por facilidad.



8.- OBTENCIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL AIRE

El primer obstáculo a superar fue conseguir que el programa calculase por sí solo las propiedades termodinámicas del aire (entalpía, entropía, etc).

Para ello, se recurrirá a utilizar unas tablas de propiedades termodinámicas del aire al igual que las que se usan en papel pero copiadas dentro del libro de Excel. Hay que tener en cuenta que se utilizaron valores tabulados y no se recurrió a la ecuación que relaciona la entalpía como el producto de la temperatura y el calor específico, porque esta fórmula sólo sería válida cuando se tratase de gases ideales, cosa que no ocurre en el proceso estudiado, ya que en la parte final el aire está cercano a su licuación (alta presión y baja temperatura), lo que hace más apropiado suponer condiciones de gas real. De esta forma, los valores tabulados serán los de las propiedades del aire como gas real y no las de gas ideal.

De esta forma se procedió a generar las tablas. El primer paso fue conocer qué tipo de tablas se necesitaban y las variables a incluir, ya que al hacerlas personalmente, se daba la posibilidad de hacerlas como mejor se adaptasen al programa. Estas tablas tendrían que tener dos versiones, una de aire seco y otra de aire húmedo, ya que ambos fluidos aparecen a lo largo del proceso.

Un primer grupo de tablas tendrá que relacionar la entalpía con la temperatura y la presión del aire, estando esta presión medida en valores absolutos. Un segundo grupo de tablas hará lo mismo pero con la entropía en lugar de la entalpía. Por último, fue necesario hacer un tercer grupo de tablas que relacionasen la temperatura con la entropía y la presión. Este grupo fue necesario para calcular la temperatura de los puntos de salida isentrópica de los compresores, ya que intentando hacerlo con las anteriores a base de programarlo en Excel con diferentes funciones, como “buscar objetivo” se observó que ralentizaba en exceso el cálculo, e incluso en algunos casos la solución convergía a valores incoherentes.

Asimismo estos tres grupos de tablas se compondrán por una tabla de aire seco y once de aire húmedo, donde estas once de aire húmedo serán para diferentes humedades relativas del aire. Así se calcularán las tablas para intervalos del 10% de humedad relativa. Al igual que se hizo con la humedad relativa se podría haber hecho con la humedad absoluta, pero se eligió la relativa porque, aparte de ser más visual, la gente está más familiarizado con su uso.

El siguiente paso consistirá en delimitar el rango de los puntos del proceso, ya que serán éstos los que determinen el rango de las tablas elaboradas. De esta forma se buscó en los manuales de los diferentes equipos para ver cuál era su rango de diseño tanto de temperaturas como de presiones.



De entre los valores de los diferentes equipos se optó siempre por el caso más desfavorable, ya que así la medida siempre quedaría dentro del rango de la tabla y el programa no dejaría de funcionar por culpa de que la variable a calcular se saliera del rango.

Por ejemplo para el caso de la temperatura máxima, se tomará el valor máximo entre las temperaturas máximas de todos los equipos implicados. Así la temperatura máxima vendrá determinada por la temperatura máxima de diseño de los intercambiadores de calor del BLAC (IC1, IC2 e IC3), la cual es de 150 °C y la temperatura mínima por la temperatura mínima de diseño de los mismos que es de -10 °C o en un caso puntual podría ser la temperatura ambiental si disminuyera por debajo de -10 °C, lo cual en Gijón resulta muy improbable. Con estos valores el rango de temperaturas podría ser [-10 °C, 150 °C]. No obstante, con el objetivo de evitar problemas, sabiendo que para poder interpolar siempre se necesitarán valores tabulados por encima y debajo del medido y con vista al posible error que puedan tener asociado los sensores de la planta se dejará un margen de seguridad. Por tanto el rango de temperaturas utilizado será [-20 °C, 160 °C].

Asimismo se procedió de la misma manera para conocer el rango de presiones. Sin embargo, en el caso de las presiones aparece una peculiaridad y es que de antemano ya se sabe que en el lado de aire húmedo se alcanzarán presiones mucho menores que en lado de aire seco. Esto se debe a que a la salida de los prepurificadores el aire siempre estará exento de humedad, por lo que el aire que pasa a través del BAC siempre será seco. De esta forma la máxima presión que alcance el aire seco siempre será la de salida la última etapa de compresión del BLAC (BLAC 4), ya que en los siguientes equipos irá perdiendo presión (DCA y prepurificadores). En cambio el aire seco tendrá su máxima presión en la salida de la última etapa del BAC, por lo que será notablemente superior a la del aire húmedo. Debido a esta razón, el rango de presiones será diferente en las tablas de aire húmedo que en la de aire seco.

Así en el lado de aire húmedo tendrá su mínimo en la salida del filtro de aspiración del BLAC, la cual estará un poco por debajo de la atmosférica, y alcanzará su máxima en la salida del compresor de cuarta etapa del BLAC, que según el manual del compresor será de 10 barG (11 barA aproximadamente). Sabiendo que para trabajar con las tablas de propiedades del aire se requieren presiones absolutas el rango de las mismas para el aire húmedo será [50000 Pa, 1250000 Pa], que equivaldría a [0,5 barA, 12,5 barA]. Como se puede observar se han dejado unos márgenes de seguridad por ambos lados al igual que se hizo anteriormente para la temperatura.

En cambio el aire seco tendrá su valor mínimo a la entrada de la primera etapa de compresión del BAC (BAC 1) y alcanzará su valor máximo a la salida de la segunda etapa del mismo (BAC 2). Con ello el rango de presiones de aire seco será [50000 Pa, 2300000 Pa] que equivale a [0,5 barA, 23 barA].



El rango de la humedad relativa no tendrá mucha complicación. Simplemente se escogerá todo el rango posible entre 0% y 100% con intervalos del 10%, que permitan obtener unos buenos resultados de las interpolaciones, pero sin excesivas tablas, ya que como se verá más adelante cada intervalo de una humedad relativa concreta supondrá tener una nueva tabla. Por ejemplo, si en lugar de utilizar intervalos del 10%, lo cual implica tener 11 tablas, se utilizasen intervalos del 1%, los resultados serían mucho más precisos obviamente, pero no lo suficiente como para compensar la necesidad de tener 101 tablas diferentes que implicaría esta mayor precisión.

A diferencia de las tres variables anteriores, la entropía, la cual se necesita para la tabla de temperatura en función de la entropía, la presión y la humedad relativa, no se conocían sus valores de antemano ni se podían buscar en los manuales. Por ello fue necesario esperar a tener una parte del programa operativa para calcular las entropías en los puntos reales, que serían las que habría que buscar en las tablas para obtener las temperaturas de los puntos de salida isentrópica de los compresores. Pese a que se realizó una observación de puntos importante y en diferentes instantes y condiciones, se dejó un margen de seguridad aún mayor que en los casos anteriores, ya que no se podía conocer con exactitud el valor que alcanzaría la entropía para los casos máximos de funcionamiento, los cuales no se alcanzan habitualmente y no se pudieron observar. Así para el aire húmedo se determinó un rango de [4700 J/(kg*K), 7000 J/(kg*K)] y para el aire seco de [5800 J/(kg*K), 7500 J/(kg*K)].

Asimismo en estas tablas de temperatura en función de la entropía, la presión y la humedad absoluta será necesario determinar un rango de operación de esta humedad absoluta. Sabiendo que la humedad absoluta mínima del aire húmedo aparecerá en la salida de los prepurificadores ($w = 0$ kg agua / kg aire seco) y la máxima aparecerá en la entrada del sistema y será la humedad absoluta del aire ambiente se puede obtener un rango de operación de [0 kg agua / kg aire seco, 0,06 kg agua / kg aire seco]. El valor máximo se ha obtenido considerando el caso más desfavorable que se podría dar en las condiciones ambientales, que serían para una presión de 980 mbar, una temperatura de 40 °C y una humedad relativa del 100%. Con estas condiciones la humedad absoluta ambiental sería de 0,051 kg agua / kg aire seco, con lo que redondeando al valor superior salió el valor de 0,06 utilizado como máximo. Además para que los resultados de las interpolaciones salieran cercanos al real se dispusieron intervalos de 0,005 kg agua / kg aire seco en el rango escogido, con lo que habrá 13 tablas de este tipo para el aire húmedo y una más para el aire seco.

A continuación, se muestran todas las tablas de propiedades termodinámicas del aire elaboradas por el autor para esta herramienta (Tabla 8.1, Tabla 8.2, Tabla 8.3, Tabla 8.4, Tabla 8.5 y Tabla 8.6). En ellas se recogen el nombre que se les dará a cada una con el administrador de nombres de Excel, sus variables de entrada y salida y los rangos de las mismas.



Nombre de la tabla en Excel	Variable de salida	Variables de entrada	Valor mínimo de entrada	Valor máximo de entrada	Intervalo de valores
Entalpía_AHum_HR0	Entalpía	Presión	50000 Pa	2300000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	0%	0%	-
Entalpía_AHum_HR10	Entalpía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	10%	10%	-
Entalpía_AHum_HR20	Entalpía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	20%	20%	-
Entalpía_AHum_HR30	Entalpía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	30%	30%	-
Entalpía_AHum_HR40	Entalpía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	40%	40%	-
Entalpía_AHum_HR50	Entalpía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	50%	50%	-
Entalpía_AHum_HR60	Entalpía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	60%	60%	-
Entalpía_AHum_HR70	Entalpía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	70%	70%	-
Entalpía_AHum_HR80	Entalpía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	80%	80%	-
Entalpía_AHum_HR90	Entalpía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	90%	90%	-
Entalpía_AHum_HR100	Entalpía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	100%	100%	-

Tabla 8.1. – Tablas de la entalpía en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (Aire húmedo)



Nombre de la tabla en Excel	Variable de salida	Variables de entrada	Valor mínimo de entrada	Valor máximo de entrada	Intervalo de valores
Entropía_AHum_HR0	Entropía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	0%	0%	-
Entropía_AHum_HR10	Entropía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	10%	10%	-
Entropía_AHum_HR20	Entropía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	20%	20%	-
Entropía_AHum_HR30	Entropía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	30%	30%	-
Entropía_AHum_HR40	Entropía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	40%	40%	-
Entropía_AHum_HR50	Entropía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	50%	50%	-
Entropía_AHum_HR60	Entropía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	60%	60%	-
Entropía_AHum_HR70	Entropía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	70%	70%	-
Entropía_AHum_HR80	Entropía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	80%	80%	-
Entropía_AHum_HR90	Entropía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	90%	90%	-
Entropía_AHum_HR100	Entropía	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C
		Humedad relativa	100%	100%	-

Tabla 8.2. – Tablas de la entropía en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (Aire húmedo)



Nombre de la tabla en Excel	Variable de salida	Variables de entrada	Valor mínimo de entrada	Valor máximo de entrada	Intervalo de valores
Temperatura_AHum_w0	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0 kg a/kg as	0 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w5	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,005 kg a/kg as	0,005 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w10	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,010 kg a/kg as	0,010 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w15	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,015 kg a/kg as	0,015 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w20	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,020 kg a/kg as	0,020 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w25	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,025 kg a/kg as	0,025 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w30	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,030 kg a/kg as	0,030 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w35	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,035 kg a/kg as	0,035 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w40	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,040 kg a/kg as	0,040 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w45	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,045 kg a/kg as	0,045 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w50	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,050 kg a/kg as	0,050 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w55	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,055 kg a/kg as	0,055 kg a/kg as	-
Temperatura_AHum_w60	Temperatura	Presión	50000 Pa	1250000 Pa	50000 Pa
		Entropía	4700 J/(Kg*K)	7000 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)
		Humedad absoluta	0,060 kg a/kg as	0,060 kg a/kg as	-

Tabla 8.3. – Tablas de la temperatura en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (Aire húmedo)

Nombre de la tabla en Excel	Variable de salida	Variables de entrada	Valor mínimo de entrada	Valor máximo de entrada	Intervalo de valores
Entalpía_Aseco	Entalpía	Presión	50000 Pa	2300000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C

Tabla 8.4. – Tabla de la entalpía en función de presión y la temperatura (Aire seco)



Nombre de la tabla en Excel	Variable de salida	Variables de entrada	Valor mínimo de entrada	Valor máximo de entrada	Intervalo de valores
Entropía_ASeco	Entropía	Presión	50000 Pa	2300000 Pa	50000 Pa
		Temperatura	-10 °C	160 °C	10 °C

Tabla 8.5. – Tabla de la entropía en función de la presión y la temperatura (Aire seco)

Nombre de la tabla en Excel	Variable de salida	Variables de entrada	Valor mínimo de entrada	Valor máximo de entrada	Intervalo de valores
Temperatura_ASeco	Temperatura	Presión	50000 Pa	2300000 Pa	50000 Pa
		Entropía	5800 J/(Kg*K)	7500 J/(Kg*K)	100 J/(Kg*K)

Tabla 8.6. – Tabla de la temperatura en función de la presión y la entropía (Aire seco)

Con todas estas premisas se calcularon todos los valores necesarios para las tablas de propiedades termodinámicas del aire. Para esta labor se recurrió a utilizar el programa EES, el cual cuenta con una base de datos de las propiedades de muchos fluidos entre los que se encuentra el aire. Con él se fueron calculando los distintos valores variando las condiciones de entrada. Por ejemplo, para el caso de la tabla de entropía de aire húmedo, se empezaba con un valor de la humedad relativa del 0% y se iban variando los valores de la presión y la temperatura, con lo que se generaban distintos valores de la entropía, los cuales se copiaban en la tabla recogida en la hoja de Excel. En el Anexo I se pueden ver todas las tablas de propiedades termodinámicas del aire seco y del aire húmedo generadas para este proyecto.

Por último cabe aclarar un par de cosas referentes a las tablas. Lo primero que puede resultar llamativo es la nula variación que aparece en la tabla de la entalpía cuando aumenta su presión para el caso del aire húmedo cuando éste posee el 0% de humedad relativa. La explicación aparece en el manual del EES y se debe a la diferencia de puntos críticos del aire y el vapor de agua. Al ser el punto crítico del aire muy inferior al del agua, el primero se supone como gas ideal, lo que provoca que su entalpía sólo sea función de la temperatura y no de la presión. Este fenómeno se aplica a todas las tablas de entalpía de aire húmedo, sin embargo sólo se aprecia en la de humedad relativa nula porque en las siguientes al aparecer un porcentaje de vapor de agua, el cual no se toma como gas ideal sí varía la entalpía global con la presión además de con la temperatura.

Esta aproximación a gas ideal resta un poco de precisión al valor real de la entalpía en la última parte del proceso donde aparece el aire húmedo (entrada de los prepurificadores). No obstante, tampoco es una aproximación descabellada, ya que la presión está en torno a 10 barG y la temperatura es aproximadamente la ambiental, por lo que estaría lejos de su punto de licuación y además este valor de la entalpía siempre va a estar muy influenciado por la fracción de agua lo que enmascara aún más la diferencia de suponer el aire como gas ideal en lugar de cómo gas real.

La segunda aclaración corresponde a la diferencia entre los valores de la entalpía en base húmeda con humedad relativa del 0% y los valores en base seca cuando las condiciones de presión y temperatura son iguales. Esta diferencia se debe a que el EES



toma como temperatura de referencia la del punto de fusión del agua ($0\text{ }^{\circ}\text{C} = 273,15\text{ K}$) cuando las propiedades están influenciadas por el agua como es el caso del aire húmedo. Sin embargo, cuando se trata de gases, como es el aire en sus propiedades como gas real toma 0 K como temperatura de referencia. De ahí esta diferencia de valores que aparecen en las tablas. No obstante, esto no supone ningún error en el cálculo. Lo único será que habrá que tomar la precaución de no restar valores medidos a dos puntos de referencia distintos porque se obtendría un resultado erróneo. Así por ejemplo, en los prepurificadores donde la corriente de aire entra como aire húmedo y sale como aire seco, no se podrán mezclar entalpías de dos tablas con puntos de referencia distintos para calcular la potencia del equipo, sino que habrá que tomar aire húmedo tanto a la entrada como a la salida, siendo este último aire húmedo al 0% de humedad relativa.

8.1.- Importación en Excel de las tablas de las propiedades termodinámicas del aire

Estas hojas recogerán todas las tablas con las propiedades termodinámicas del aire elaboradas previamente por el autor. Estas tablas se agruparán en las diferentes hojas del libro en función del fluido analizado (aire húmedo o aire seco) y de cuál sea su variable de salida (entalpía, entropía o temperatura).

Asimismo, con el objetivo de facilitar posteriormente la programación de la herramienta y sabiendo que estas tablas serán referenciadas en numerosas ocasiones dentro del programa se les asignó un nombre a cada una de ellas con la función de Excel “Administrador de nombres”. Al nombrarlas con el “Administrador de nombres”, estas tablas podrán ser escritas en las funciones con el nombre que se les dé, por ejemplo “Entalpía_ASeco”, en lugar de utilizar la referencia directa a celdas de la forma $\$A\$1:\$F\100 , lo cual facilita su programación así como la búsqueda de errores cuando algo falla. Los nombres de cada una de las tablas del aire se pueden ver en las tablas desde la 8.1 a la 8.6 de esta memoria.

Como se explicará más adelante, cuando se programen las interpolaciones de datos, el programa necesita saber en qué posición se encuentra cada valor del encabezado ya sea su fila o columna. Para ello se crearon unas tablas, las cuales se colocaron en la hoja “Tablas auxiliares” y que recogen la fila o columna de cada valor de los encabezados de las tablas de propiedades del aire.



	A	B	C	D	E	F	G
1	Tablas auxiliares de aire húmedo					Tablas auxiliares de aire seco	
2							
3	Tabla para saber en qué fila está cada temperatura					Tabla para saber en qué fila está cada temperatura	
4	T [°C]	Fila				T [°C]	Fila
5	-20	2				-20	2
6	-10	3				-10	3
7	0	4				0	4
8	10	5				10	5
9	20	6				20	6
10	30	7				30	7
11	40	8				40	8
12	50	9				50	9
13	60	10				60	10
14	70	11				70	11
15	80	12				80	12
16	90	13				90	13
17	100	14				100	14
18	110	15				110	15
19	120	16				120	16
20	130	17				130	17
21	140	18				140	18
22	150	19				150	19
23	160	20				160	20
24							
25							
26	Tabla para saber en qué columna está cada presión					Tabla para saber en qué columna está cada presión	
27	P [Pa]	Columna				P [Pa]	Columna
28	50000	2				50000	2
29	100000	3				100000	3
30	150000	4				150000	4
31	200000	5				200000	5

Figura 8.1. – Extracto de la hoja “Tablas auxiliares”

Como se puede apreciar en la Figura 8.1, en la que se muestra un extracto de estas tablas auxiliares, todas empiezan a contar en 2 y no en 1. Esto se debe a que el primer valor siempre será el encabezado que se encuentra perpendicular y muestra la otra variable.

En la Figura 8.2, que muestra un extracto de la tabla “Entalpía_ASeco”, se puede apreciar que para el caso de las temperaturas el primer valor es -20 °C y se ubica en la segunda fila de la tabla (fila 6 de la hoja Excel) ya que la primera fila (fila 5 de la hoja) es donde se encuentra el encabezado con los valores de la presión. En esta imagen el rectángulo de color amarillo superpuesto representaría las celdas de la tabla llamada “Entalpía_ASeco” con el administrador de nombres de Excel.



		50000	100000	150000	200000	250000	300000
Temperatura [°C]	-20	253308	253118	252929	252740	252550	252361
	-10	263353	263175	262996	262818	262639	262460
	0	273401	273232	273063	272895	272726	272557
	10	283451	283291	283131	282972	282812	282652
	20	293504	293352	293201	293049	292898	292747
	30	303561	303417	303273	303129	302986	302842
	40	313622	313485	313349	313212	313075	312939
	50	323689	323559	323428	323298	323168	323039
	60	333762	333637	333513	333389	333266	333142
	70	343841	343723	343604	343486	343368	343250
	80	353928	353815	353702	353589	353477	353364
	90	364024	363916	363808	363700	363592	363485
	100	374129	374025	373922	373819	373716	373613
	110	384244	384145	384046	383947	383848	383750

Figura 8.2. – Extracto de la tabla “Entalpía_ASeco” en Excel

8.2.- Procedimiento de interpolación en el programa diseñado

Como ya se explicó en el capítulo “5. Análisis teórico del problema planteado”, toda interpolación entre dos variables x e y , las cuales se encuentran tabuladas para unos valores de $y_1 = f(x_1)$ e $y_2 = f(x_2)$ y se quiere conocer el valor que tendrá y para un valor de x , donde $x_1 < x < x_2$, se interpola con la siguiente ecuación.

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} * (x - x_1) \quad (\text{ec. 8.1})$$

No obstante, el caso aquí estudiado es más complicado, ya que en el mejor de los casos aparecerán tres variables (presión, temperatura y entalpía o entropía), e incluso para el aire húmedo habrá que añadir una cuarta variable (la humedad relativa o la absoluta). Esto provoca que no sea posible realizar una interpolación con un simple cálculo como ocurriría para el caso de dos variables.

Por el contrario, para realizar interpolaciones con más de dos variables se utilizará también esta ecuación pero será necesario aplicarla $2^{n-1} - 1$ veces donde n será el número total de variables implicadas. Por ejemplo en los casos aquí calculados hay dos posibilidades: el aire seco que influyen tres variables ($n = 3$) y por tanto habrá que aplicar 3 veces la fórmula de la interpolación ($2^{3-1} - 1 = 3$) y el aire húmedo donde influyen 4 variables ($n = 4$) y por tanto habrá que aplicar 7 veces la fórmula de la interpolación ($2^{4-1} - 1 = 7$). Asimismo se comprueba como para dos variables ($n = 2$) sólo se necesita aplicar 1 vez la fórmula ($2^{2-1} - 1 = 1$), como ocurriría en el ejemplo de la interpolación entre dos variables x e y .



Dada la complicación del subprograma creado para realizar las interpolaciones, se va a explicar con un ejemplo real de la propia hoja de cálculo. Lo único a explicar antes será el procedimiento general que se basará en los siguientes pasos, los cuales serían los que se siguiesen para realizar el cálculo manualmente.

- 1) Extraer los datos de las tablas en el rango deseado.
- 2) Interpolarse en base a una de las variables de entrada.
- 3) Interpolarse en base a otra de las variables de entrada.
- 4) Seguir interpolando sucesivamente hasta que se haya hecho en base a todas las variables de entrada.

Una vez que se conoce el procedimiento de cálculo, se pondrá un ejemplo real extraído del programa diseñado para explicar paso por paso cómo se realiza la interpolación. Se explicará una del caso de aire húmedo, ya que es la más complicada y la del aire seco al tener menos variables, sería igual pero saltándose un paso de los del aire húmedo.

Concretamente se tomarán los datos del punto 1 del proceso, es decir, de la entrada al compresor BLAC 1. En la Figura 8.3 se muestran las condiciones de ese punto en un instante preciso que serían los valores que la hoja de Excel toma de los sensores de la planta (la entalpía y la entropía son las que se interpolarán, no salen de las medidas de los sensores como las otras variables).

	A	B	C	D	E	F
639						
640		P_1	100615,98	Pa		
641		T_1	15,38	°C		
642		T_1 [K]	288,53	K		
643		P_w,sat_1	1745,63	Pa		
644		w_sat_1	0,01098	kg agua / kg aire seco		
645		w_1	0,00896	kg agua / kg aire seco		
646		HR_1	0,818	tanto por uno		
647		h_1	39314,30	J / kg aire seco		
648		s_1	5752,39	J / (K * kg aire seco)		
649						

Figura 8.3. – Condiciones del punto 1 del proceso

A continuación se explicará el procedimiento para calcular la entalpía de este punto con el subprograma creado para esta herramienta. En la Figura 8.4 se puede apreciar una visión general del mismo.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
651		Interpolación para obtener la entalpía													
652		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido													
653		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido													
654		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido													
655		HR_inf = 0,8													
656			100000	150000											
657		10	25611,0	20394,0											
658		20	50227,0	40068,0											
659		HR_sup = 0,9													
660			100000	150000											
661		10	27576,0	21695,0											
662		20	54070,0	42595,0											
663		Interpolación por temperatura				Interpolación por presión				Interpolación por humedad relativa					
664		HR_inf =	0,8		HR_inf =	0,8		HR =	0,818						
665		P_inf =	100000,0		P =	100615,98		P =	100615,98						
666		T =	15,4	h =	38865,8		T =	15,4	h =	38768,7		T =	15,4	h =	39314,3
667		HR_inf =	0,8												
668		P_inf =	150000,0												
669		T =	15,4	h =	30987,7										
670		HR_sup =	0,9												
671		P_inf =	100000,0												
672		T =	15,4	h =	41842,0										
673		HR_sup =	0,9												
674		P_inf =	150000,0												
675		T =	15,4	h =	32948,8										

Figura 8.4. – Visión general del subprograma de interpolación de variables diseñado

A continuación se detallarán cada uno de los cálculos utilizados en los cuatro pasos del procedimiento que se acaban de enumerar.

8.2.1.- Primer paso: extraer los datos de las tablas en el rango deseado.

Para empezar se extraen los datos de las correspondientes tablas de entalpía de aire húmedo. Dado que estas tablas están separadas por su humedad relativa, habrá que hacer dos grupos de extracciones, una para la humedad relativa que se encuentra inmediatamente inferior a las condiciones buscadas y otra para la inmediatamente superior.

Como en este caso la humedad relativa era de 0,818 (81,8%), se extraerán datos de la tabla de humedad relativa del 0,8 (80%) y del 0,9 (90%). Ya que las dos tablas de color naranja que aparecen en la Figura 8.4 se calculan igual pero con diferentes humedades relativas, se explicará sólo una de ellas, en este caso la de del valor inferior de humedad relativa (0,8) que se muestra en la Figura 8.5.

	A	B	C	D
654				
655		HR_inf = 0,8		
656			100000	150000
657		10	25611,0	20394,0
658		20	50227,0	40068,0

Figura 8.5. – Extracción de los valores de las entalpías para el valor mínimo de humedad relativa



Para calcular estos valores inferiores (celda C655) y superiores (celda C661) de la humedad relativa se utilizan las siguientes fórmulas en Excel, las cuales redondean el valor de la humedad relativa del punto 1 del proceso (celda C646) a su primer decimal:

- Celda B655: “=REDONDEAR.MENOS(C646;1)”
- Celda B661: “=REDONDEAR.MAS(C646;1)”

A continuación se calculan los valores de la presión inmediatamente inferior (celda C657) y superior (celda D657) de los disponibles en las tablas de propiedades del aire.

- Celda C657: “=BUSCARV(C640;TablaAux_AHum_P;1;1)”
- Celda D657: “=BUSCARV(C640+50000;TablaAux_AHum_P;1;1)”

La función escrita buscará el valor de la presión (celda C640) en la 1ª columna de la tabla auxiliar de presión del aire húmedo (TablaAux_AHum_P). El último “1” que aparece en la función hace que el programa recorra la tabla buscando el valor deseado hasta que lo encuentre o lo supere. Como ocurre en la mayoría de los casos, éste no coincide con ningún valor, por lo que toma el inmediatamente inferior, de 100615 Pa que hay, toma el inferior que sería 100000 Pa. Para el cálculo de la presión inmediatamente superior simplemente hay que pedirle que busque un valor de la presión igual al valor de la presión en el punto buscado más el intervalo de avance de los valores en la tabla (para la tabla de la presión, estos avances son de 50000 Pa por lo que se suman 50000 Pa al valor buscado). Así el programa busca el valor de 150615 Pa, y al pasarse se queda con su valor anterior que sería 150000 Pa.

Hay que decir que en caso de que el valor de la presión coincida justo con la tabla (por ejemplo que sea de 100000 Pa) no habría problema, ya que simplemente tomaría el valor del inferior. En esta tabla representaría los valores de la presión inferior y superior como 100000 Pa y 150000 Pa respectivamente, pero a la hora de interpolar, como el valor real y el valor inferior serían iguales, la entalpía interpolada tendría el mismo valor que la de la presión inferior.

De la misma forma que para calcular los valores de la presión se calculan los valores de la temperatura inmediatamente inferior (celda B658) y superior (celda B659). Las diferencias es que ahora tendrá que buscar el valor de la temperatura (celda C641) en la tabla auxiliar de temperatura del aire húmedo (TablaAux_AHum_T) y en este caso el intervalo de avance entre los valores de la tabla será de 10 °C, en lugar de los 50000 que había en la de presión. Por tanto las fórmulas de estas dos celdas son las siguientes:

- Celda B658: “=BUSCARV(C641;TablaAux_AHum_T;1;1)”
- Celda B659: “=BUSCARV(C641+10;TablaAux_AHum_T;1;1)”

Una vez se tienen los encabezados de la tabla (celdas con el fondo en color naranja), hay que rellenar las cuatro celdas interiores con los datos que se extraerán de la tabla con la humedad relativa correspondiente a la que marca la celda C655 para cada combinación de



presión y temperatura. Para ello se utilizará la función “ÍNDICE” la cual tiene la forma “=ÍNDICE(matriz; fila; columna)” y sirve para buscar valores dentro de una matriz a partir del valor de la fila y la columna especificada. Por ejemplo para la celda C658 sería la siguiente fórmula:

- Celda C658: “=ÍNDICE(
SI(C655=0;Entalpía_AHum_HR0;SI(C655=0,1;Entalpía_AHum_HR10;SI(
C655=0,2;Entalpía_AHum_HR20;SI(C655=0,3;Entalpía_AHum_HR30;SI(
C655=0,4;Entalpía_AHum_HR40;SI(C655=0,5;Entalpía_AHum_HR50;SI(
C655=0,6;Entalpía_AHum_HR60;SI(C655=0,7;Entalpía_AHum_HR70;SI(
C655=0,8;Entalpía_AHum_HR80;SI(C655=0,9;Entalpía_AHum_HR90;SI(
C655=1;Entalpía_AHum_HR100;"Error"))))))))));
BUSCARV(B658;TablaAux_AHum_T;2;0);
BUSCARV(C657;TablaAux_AHum_P;2;0))”

Lo primero que hace esta fórmula es escoger la matriz de la que tiene que extraer los datos. Para ello cuenta con un conjunto de funciones “SI” anidadas de tal forma que va probando con los diferentes valores de la celda C655 que marca la humedad relativa hasta que encuentra el correspondiente y con ello sabe a qué tabla tiene que ir a coger los datos. En este caso como el valor de la celda C655 es de 0,8, todas las funciones “SI” serán falsas hasta que llegue a la novena, la cual será verdadera y le dirá que tiene que buscar los datos en la tabla con el nombre “Entalpía_AHum_HR80”.

Lo siguiente es conocer el número de la fila en la que tiene que coger el dato. Para ello busca el valor de la temperatura (celda B658) en la tabla auxiliar de la temperatura “TablaAux_AHum_T” y coge el valor de la segunda columna, en la que están los números de fila de cada uno de los valores de la temperatura (Figura 8.1). En este caso el último número de la función “BUSCARV” es un 0 porque siempre habrá coincidencia exacta. Por último, obtiene el número de la columna de la matriz donde deberá tomar el dato, para lo cual procede igual que para obtener el de la fila, excepto que ahora buscará el valor de la presión (celda C657) en la tabla auxiliar de la presión “TablaAux_AHum_P”.

De la misma forma se extraen los otros tres valores utilizando las diferentes combinaciones de presión y temperatura dependiendo de la fila y la columna donde se encuentre la celda. Así, las otras extracciones se calculan con las siguientes fórmulas:

- Celda D658: “=ÍNDICE(
SI(C655=0;Entalpía_AHum_HR0;SI(C655=0,1;Entalpía_AHum_HR10;SI(
C655=0,2;Entalpía_AHum_HR20;SI(C655=0,3;Entalpía_AHum_HR30;SI(
C655=0,4;Entalpía_AHum_HR40;SI(C655=0,5;Entalpía_AHum_HR50;SI(
C655=0,6;Entalpía_AHum_HR60;SI(C655=0,7;Entalpía_AHum_HR70;SI(
C655=0,8;Entalpía_AHum_HR80;SI(C655=0,9;Entalpía_AHum_HR90;SI(
C655=1;Entalpía_AHum_HR100;"Error"))))))))));



- BUSCARV(B658;TablaAux_AHum_T;2;0);
 BUSCARV(D657;TablaAux_AHum_P;2;0))”
- Celda C659: “=INDICE(
 SI(C655=0;Entalpía_AHum_HR0;SI(C655=0,1;Entalpía_AHum_HR10;SI(
 C655=0,2;Entalpía_AHum_HR20;SI(C655=0,3;Entalpía_AHum_HR30;SI(
 C655=0,4;Entalpía_AHum_HR40;SI(C655=0,5;Entalpía_AHum_HR50;SI(
 C655=0,6;Entalpía_AHum_HR60;SI(C655=0,7;Entalpía_AHum_HR70;SI(
 C655=0,8;Entalpía_AHum_HR80;SI(C655=0,9;Entalpía_AHum_HR90;SI(
 C655=1;Entalpía_AHum_HR100;"Error"))))))))));
 BUSCARV(B659;TablaAux_AHum_T;2;0);
 BUSCARV(C657;TablaAux_AHum_P;2;0))”
 - Celda D659: “=INDICE(
 SI(C655=0;Entalpía_AHum_HR0;SI(C655=0,1;Entalpía_AHum_HR10;SI(
 C655=0,2;Entalpía_AHum_HR20;SI(C655=0,3;Entalpía_AHum_HR30;SI(
 C655=0,4;Entalpía_AHum_HR40;SI(C655=0,5;Entalpía_AHum_HR50;SI(
 C655=0,6;Entalpía_AHum_HR60;SI(C655=0,7;Entalpía_AHum_HR70;SI(
 C655=0,8;Entalpía_AHum_HR80;SI(C655=0,9;Entalpía_AHum_HR90;SI(
 C655=1;Entalpía_AHum_HR100;"Error"))))))))));
 BUSCARV(B659;TablaAux_AHum_T;2;0);
 BUSCARV(D657;TablaAux_AHum_P;2;0))”

8.2.2.- Segundo paso: interpolación en función de la temperatura.

Una vez se tienen rellenas las dos tablas de color naranja significa que ya se tienen todos los datos necesarios para la interpolación. Ahora se empieza interpolando todos los datos extraídos en función de una de las variables de entrada de la tabla. En este caso se empieza interpolando en base a la temperatura del aire. En la Figura 8.6 se puede ver como es la tabla generada en este paso.



	A	B	C	D	E	F
667		Interpolación por temperatura				
668						
669		HR_inf =	0,8			
670		P_inf =	100000,0			
671		T =	15,4	h =	38865,8	
672						
673		HR_inf =	0,8			
674		P_sup =	150000,0			
675		T =	15,4	h =	30987,7	
676						
677		HR_sup =	0,9			
678		P_inf =	100000,0			
679		T =	15,4	h =	41842,0	
680						
681		HR_sup =	0,9			
682		P_sup =	150000,0			
683		T =	15,4	h =	32948,8	

Figura 8.6. – Valores de las entalpías interpoladas por temperatura

En este paso, se pasa de 8 valores de entalpía que se tenían de las tablas naranjas para cada una de las humedades relativas a la mitad, 4 valores. Esto se debe a que para cada pareja de valores con una misma humedad relativa (la inferior, HR_inf, o la superior, HR_sup) y la misma presión (la inferior, P_inf, o la superior, P_sup) había dos valores de entalpía distintos, los correspondientes a cada una de las temperaturas de las tablas del paso anterior. Por tanto en este paso se lleva a cabo la interpolación de estas parejas de valores que tienen igual humedad relativa e igual presión, pero diferente temperatura. En la Figura 8.7 siguiente se pueden ver recuadradas en color azul cuáles serían estas parejas de valores a interpolar.



HR_inf = 0,8			
		100000	150000
10	25611,0		20394,0
20	50227,0		40068,0

HR_sup = 0,9			
		100000	150000
10	27576,0		21695,0
20	54070,0		42595,0

Figura 8.7. – Parejas de valores de la entalpía a interpolar por temperatura

Lo primero que hay que hacer para rellenar la tabla de interpolación por temperatura mostrada en la Figura 8.6 será rellenar las casillas de la columna C. Éstas no tienen complicación, ya que lo único que hacen es copiar los valores de la humedad relativa y la presión tanto en sus valores inferiores como superiores recogidos en las tablas de color naranja. La excepción es la variable a interpolar, en este caso la temperatura, ya que ésta copiará el valor real de esta variable recogida en las condiciones del aire en ese punto del proceso y mostradas anteriormente en la Figura 8.3. Así estas celdas tienen las siguientes fórmulas:

- Celda C669: “=C655”
- Celda C670: “=C657”
- Celda C671: “=C641”
- Celda C673: “=C655”
- Celda C674: “=D657”
- Celda C675: “=C641”
- Celda C677: “=C661”
- Celda C678: “=C663”
- Celda C679: “=C641”
- Celda C681: “=C661”
- Celda C682: “=D663”
- Celda C683: “=C641”



Lo siguiente es aplicar la ecuación de la interpolación (ecuación 8.1) a cada grupo de variables de entrada (HR, P y T) para obtener la entalpía (h) que tendría el aire en esas condiciones concretas.

- Celda E671:
“=SI(B659-B658=0;C658;C658+(C659-C658)/(B659-B658)*(C671-B658))”
- Celda E675:
“=SI(B659-B658=0;D658;D658+(D659-D658)/(B659-B658)*(C675-B658))”
- Celda E679:
“=SI(B665-B664=0;C664;C664+(C665-C664)/(B665-B664)*(C679-B664))”
- Celda E683:
“=SI(B665-B664=0;D664;D664+(D665-D664)/(B665-B664)*(C683-B664))”

Como se puede ver, la ecuación de la interpolación está dentro de una función “SI”. El objetivo de esta función “SI” es evitar errores cuando los dos extremos de la variable de entrada a interpolar son iguales lo que provocaría que hubiera un cero en el denominadores de la ecuación. Así, si los dos extremos de la variable de entrada a interpolar son iguales (en el primer caso por ejemplo, las celdas B659 y B658, que representan los extremos de la temperatura) la condición del “SI” será cierta y esta casilla mostrará el valor de la celda C658 (también podría mostrar el de la celda C659, ya que si las temperaturas son iguales ambas celdas tendrán el mismo valor).

Dada la forma en que está programada la hoja Excel, para las interpolaciones por temperatura o presión esto es casi imposible que ocurra ya que sólo aparecería en el límite de la tabla de propiedades termodinámicas del aire, y debido a que se dejó un margen de seguridad, lo normal es que nunca alcanzase esos valores. En cambio en el caso de la humedad relativa, es más frecuente que ocurra, ya que si aparece una humedad relativa con sólo la primera cifra decimal distinta de cero, su redondeo tanto superior como inferior será el mismo valor, lo que provocaría el error del programa de no haber sido por esta función “SI”.

Para que quede más claro, se resolverá manualmente la primera interpolación por temperatura recogida en la Figura 8.6.

Variables de entrada:

$$HR_{inf} = 0,8 \quad (\text{ec. 8.2})$$

$$P_{inf} = 100000 \text{ Pa} \quad (\text{ec. 8.3})$$

$$T = 15,4 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{ec. 8.4})$$



Valores de temperatura y entalpía en los extremos de la interpolación:

$$T_{inf} = 10 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{ec. 8.5})$$

$$T_{sup} = 20 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{ec. 8.6})$$

$$h_{inf} = 25611 \frac{\text{J}}{\text{kg aire seco}} \quad (\text{ec. 8.7})$$

$$h_{sup} = 50227 \frac{\text{J}}{\text{kg aire seco}} \quad (\text{ec. 8.8})$$

¿Se cumple la función "SI", $T_{sup} - T_{inf} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$?

$$T_{sup} - T_{inf} = 20 - 10 = 10 \text{ } ^\circ\text{C} \neq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow \text{No se cumple la función "SI"}$$

Como no se cumple la función "SI", hay que resolver la ecuación de la interpolación:

$$\begin{aligned} h &= h_{inf} + \frac{h_{sup} - h_{inf}}{T_{sup} - T_{inf}} * (T - T_{inf}) = 25611 + \frac{50227 - 25611}{20 - 10} * (15,4 - 10) \\ &= 38865,8 \frac{\text{J}}{\text{kg aire seco}} \end{aligned} \quad (\text{ec. 8.9})$$

Por tanto para el caso de las condiciones de las variables de entrada, la entalpía valdría 38865,8 J/(kg aire seco).

8.2.3.- Tercer paso: interpolación en función de la presión.

En este paso se seguirá el mismo procedimiento que en el paso anterior, solamente que ahora la variable a interpolar será la presión en lugar de la temperatura. Además ahora se vuelven a reducir los valores de las entalpías a la mitad, de 4 se pasa a 2 valores, agrupando por parejas para interpolar aquellas que tengan la misma humedad relativa (Figura 8.8).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
667		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión				
668											
669		HR_inf =	0,8				HR_inf =	0,8			
670		P_inf =	100000,0				P =	100615,98			
671		T =	15,4		h =	38865,8	T =	15,4		h =	38768,7
672											
673		HR_inf =	0,8								
674		P_sup =	150000,0								
675		T =	15,4		h =	30987,7					
676											
677		HR_sup =	0,9				HR_sup =	0,9			
678		P_inf =	100000,0				P =	100615,98			
679		T =	15,4		h =	41842,0	T =	15,4		h =	41732,4
680											
681		HR_sup =	0,9								
682		P_sup =	150000,0								
683		T =	15,4		h =	32948,8					

Figura 8.8. – Interpolación por presión

Así, los valores de la columna H son las variables de entrada para cada una de las entalpías que se muestran a su derecha, es decir, las condiciones que posee el aire para obtener ese valor concreto de la entalpía.

En el caso de la humedad relativa es la de la tabla extracciones del primer paso. La temperatura es la de las condiciones del aire en ese punto del proceso, ya que ya se ha interpolado en base a esa variable en el paso anterior. Por último, la presión también será la de las condiciones concretas del aire en ese punto, ya que es sobre la que se va a interpolar ahora. A continuación, se recogen las fórmulas de Excel utilizadas en cada una de estas casillas:

- Celda H669: “=C655”
- Celda H670: “=C640”
- Celda H671: “=C641”
- Celda H677: “=C661”
- Celda H678: “=C640”
- Celda H679: “=C641”

Asimismo las fórmulas para interpolar cada una de las entalpías en función de la presión serán las siguientes:

- Celda J671:
“=SI(C674-C670=0;E671;E671+(E675-E671)/(C674-C670)*(H670-C670))”
- Celda J679:
“=SI(C682-C678=0;E679;E679+(E683-E679)/(C682-C678)*(H678-C678))”

A igual que en el paso anterior, se resolverá una de ellas manualmente para ver cuáles serían los cálculos que hace internamente el programa.



Variables de entrada:

$$HR_{inf} = 0,8 \quad (\text{ec. 8.10})$$

$$P = 100615,98 \text{ Pa} \quad (\text{ec. 8.11})$$

$$T = 15,4 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{ec. 8.12})$$

Valores de presión y entalpía en los extremos de la interpolación:

$$P_{inf} = 100000 \text{ Pa} \quad (\text{ec. 8.13})$$

$$P_{sup} = 150000 \text{ Pa} \quad (\text{ec. 8.14})$$

$$h_{inf} = 38865,8 \frac{\text{J}}{\text{kg aire seco}} \quad (\text{ec. 8.15})$$

$$h_{sup} = 30987,7 \frac{\text{J}}{\text{kg aire seco}} \quad (\text{ec. 8.16})$$

¿Se cumple la función "SI", $P_{sup} - P_{inf} = 0 \text{ Pa}$?

$$P_{sup} - P_{inf} = 150000 - 100000 = 50000 \text{ Pa} \neq 0 \text{ Pa}$$

→ No se cumple la función "SI"

Como no se cumple la función "SI", hay que resolver la ecuación de la interpolación:

$$\begin{aligned} h &= h_{inf} + \frac{h_{sup} - h_{inf}}{P_{sup} - P_{inf}} * (P - P_{inf}) \\ &= 38865,8 + \frac{30987,7 - 38865,8}{150000 - 100000} * (100615,98 - 100000) \quad (\text{ec. 8.17}) \\ &= 38768,7 \frac{\text{J}}{\text{kg aire seco}} \end{aligned}$$

Por tanto para el caso de las condiciones de las variables de entrada, la entalpía valdría 38768,7 J/(kg aire seco).

8.2.4.- Cuarto paso: interpolación en función de la humedad relativa

Este es el último paso, con lo que ya sólo queda interpolar en base a la otra variable de entrada, la humedad relativa. Para ello se procederá de igual forma que en los pasos anteriores, reduciendo los valores de entalpía a la mitad, con lo que se pasa de 2 valores que quedaban de la interpolación por presión a solamente 1.



	G	H	I	J	K	L	M	N	O
667	Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa			
668									
669	HR_inf =	0,8				HR =	0,818		
670	P =	100615,98				P =	100615,98		
671	T =	15,4	h =	38768,7		T =	15,4	h =	39314,3
672									
673									
674									
675									
676									
677	HR_sup =	0,9							
678	P =	100615,98							
679	T =	15,4	h =	41732,4					

Figura 8.9. – Interpolación por humedad relativa

Como se puede apreciar en la Figura 8.9, los valores de las variables de entrada (columna M) coinciden con las condiciones del aire en ese punto de proceso (Figura 8.3), lo que significa que la interpolación ya se ha completado para todas las variables de entrada. A continuación se muestran las fórmulas usadas en estas celdas:

- Celda M669: “=C646”
- Celda M670: “=C640”
- Celda M671: “=C641”

La celda de la última interpolación de la entalpía se calculará con la siguiente fórmula:

- Celda O671:
“=SI(H677-H669=0;J671;J671+(J679-J671)/(H677-H669)*(M669-H669))”

Para concluir se recogen cuáles serían los cálculos ejecutados internamente por el programa en este paso.

Variables de entrada:

$$HR = 0,818 \quad (\text{ec. 8.18})$$

$$P = 100615,98 \text{ Pa} \quad (\text{ec. 8.19})$$

$$T = 15,4 \text{ °C} \quad (\text{ec. 8.20})$$

Valores de humedad relativa y entalpía en los extremos de la interpolación:

$$HR_{inf} = 0,8 \quad (\text{ec. 8.21})$$

$$HR_{sup} = 0,9 \quad (\text{ec. 8.22})$$

$$h_{inf} = 38768,7 \frac{J}{\text{kg aire seco}} \quad (\text{ec. 8.23})$$



$$h_{sup} = 41732,4 \frac{J}{kg \text{ aire seco}} \quad (\text{ec. 8.24})$$

¿Se cumple la función "SI", $HR_{sup} - HR_{inf} = 0$?

$$HR_{sup} - HR_{inf} = 0,9 - 0,8 = 0,1 \neq 0 \rightarrow \text{No se cumple la función "SI"}$$

Como no se cumple la función "SI", hay que resolver la ecuación de la interpolación:

$$\begin{aligned} h &= h_{inf} + \frac{h_{sup} - h_{inf}}{P_{sup} - P_{inf}} * (P - P_{inf}) \\ &= 38768,7 + \frac{41732,4 - 38768,7}{0,9 - 0,8} * (0,818 - 0,8) \\ &= 39314,3 \frac{J}{kg \text{ aire seco}} \end{aligned} \quad (\text{ec. 8.25})$$

Por tanto para el caso de las condiciones de las variables de entrada, la entalpía valdría 39314,3 J/(kg aire seco).

Como ahora ya se ha interpolado en función de todas las variables de entrada (temperatura, presión y humedad relativa), esta entalpía es la variable de salida a todo el proceso de interpolación, es decir, la entalpía que tiene el aire en las condiciones de ese punto del proceso (las recogidas en la Figura 8.3)

Éste es el subprograma que se implementó para que la herramienta pudiese interpolar por sí sola y obtener los valores de las propiedades termodinámicas del aire. Aunque aquí solamente se explicó para el caso de la entalpía en el punto 1 del proceso (entrada del BLAC 1), el proceso es completamente igual para las demás variables y puntos del proceso, modificando obviamente las celdas de referencia y la tabla en función de la propiedad buscada.

Para el caso del aire seco el procedimiento a seguir será el mismo. La diferencia es que al contar con una variable de entrada menos (no hay humedad relativa ya que sería siempre cero), se extraerán 4 valores de entalpías de la tabla de aire seco correspondiente a la propiedad buscada, en lugar de 8 como ocurría en el aire húmedo, lo que provoca que con sólo 2 pasos de interpolación ya se obtenga la entalpía solución como variable de salida. En el caso mostrado en la Figura 8.10 habría dos pasos de interpolación, uno por temperatura y otro por presión.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1906										
1907		P ₁₂	1088646,3	Pa						
1908		T ₁₂	9,65	°C						
1909		T ₁₂ [K]	282,80	K						
1910		h ₁₂	279781,48	J / kg						
1911		s ₁₂	6115,65	J / (K * kg)						
1912										
1913										
1914		Interpolación para obtener la entalpía								
1915										
1916		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión y temperatura requerido								
1917										
1918			1050000	1100000						
1919		0	270033,0	269865,0						
1920		10	280267,0	280108,0						
1921										
1922		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión			
1923										
1924		P _{inf} =	1050000,0				P =	1088646,3		
1925		T =	9,6		h =	279904,6	T =	9,6	h =	279781,5
1926										
1927		P _{sup} =	1100000,0							
1928		T =	9,6		h =	279745,3				

Figura 8.10. – Interpolación para los casos de aire húmedo



9.- HOJAS DE LOS ESTADOS DE FUNCIONAMIENTO DEL PROCESO

Estas hojas forman la mayor parte del programa implementado. En ellas se calculan todas las variables del proceso para un instante dado, ya sea el momento actual o un instante del pasado. Para ello hay 14 hojas prácticamente iguales, que sólo difieren en el momento de lectura de datos de los sensores de la planta. Cualquiera de estas hojas se puede dividir claramente en unos apartados bien diferenciadas a simple vista que son las siguientes. En el Anexo II se muestra cómo sería una de ellas a modo de ejemplo.

- Encabezado de la hoja.
- Pantalla de resultados.
- Lectura de los sensores.
- Cálculos:
 - Cálculos de los flujos másicos.
 - Cálculos de las propiedades del aire húmedo.
 - Cálculos de las propiedades del aire seco.
 - Cálculos de los caudales y potencias en los equipos.
 - Cálculo de las condiciones de entrada y salida de la corriente de aire.

El procedimiento de cálculo de todas ellas se puede resumir en los siguientes pasos:

- 1) Extraer los datos de los sensores de la planta en el instante deseado.
- 2) Calcular las propiedades termodinámicas del aire en cada uno de los puntos del proceso.
- 3) Realizar los balances de materia y energía individuales de cada equipo para obtener los valores de los drenajes de agua donde los haya y la potencia aportada o disipada en dicho equipo.
- 4) Calcular las condiciones del aire de entrada y salida del sistema.
- 5) Representar todos los resultados de manera útil y clara para el usuario.

9.1.- Encabezado de la hoja

En la Figura 9.1 se puede ver cómo es el encabezado de la hoja del estado de funcionamiento hace 12 semanas. Estos encabezados constan de tres partes. La primera es el título de la hoja que se está visualizando, la segunda muestra el instante de lectura de los sensores y la tercera es un conjunto de 4 botones que la conectan con las principales hojas del programa.

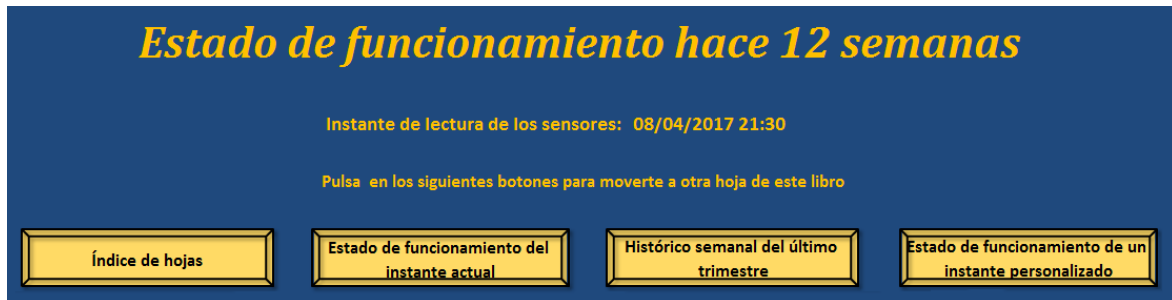


Figura 9.1. – Encabezado de las hojas de “estado de funcionamiento”

Estos cuatro botones se han implementado con un conjunto de hipervínculos, al igual que se explicó anteriormente para el índice de hojas del libro. No obstante a diferencia del índice, donde se podía ir a todas las hojas de usuario directamente, aquí sólo aparecen las principales (el índice de hojas, el estado de funcionamiento actual, el histórico semanal del último trimestre y el estado de un instante personalizado).

En caso de que el usuario quiera ir desde una de las hojas de un instante pasado a otro también del pasado deberá ir al índice de hojas. Esta reducción se ha hecho en busca de una mayor simplicidad de su uso y teniendo en cuenta que no será la operación más demandada. No se considera necesaria esta conexión entre hojas del pasado porque, en realidad, éstas sólo se visitarán cuando haya algún resultado anómalo en el histórico, recurriendo a ellas para ver que ocurrió.

Un caso especial es el encabezado de la hoja de estado de funcionamiento de un instante personalizado (Figura 9.2). Como su nombre indica, en esta hoja el instante de lectura de los sensores está sin determinar, de manera que sea el usuario el que escoja qué momento concreto quiere visualizar. Esto resulta de gran ayuda para ver cuál ha sido el funcionamiento de la instalación en un momento puntual que no ha quedado registrado en los valores semanales, por ejemplo ante una bajada de la producción de gas, un incremento brusco de la potencia eléctrica consumida por la planta o simplemente ver el momento previo a una avería para ver dónde pudo estar el fallo.

Por eso el encabezado de esta hoja cuenta con una casilla en blanco para que el usuario la rellene con el instante concreto que quiera analizar. Ésta es la única diferencia de esta hoja con las demás, ya que está programada de tal forma que una vez que el usuario introduzca la fecha y la hora en esa casilla, el programa ejecutará una serie de funciones con las que registrará los datos de los sensores en el instante elegido, recalculará toda la hoja y mostrará los resultados correspondientes.



Figura 9.2. – Encabezado de la hoja de “estado de funcionamiento personalizado”

9.2.- Pantalla de resultados

Aunque en la hoja de Excel es el primer apartado que se muestra, no es el primer paso del procedimiento de cálculo. Simplemente se muestra al principio de la hoja para facilitar el uso de la misma y que el usuario no tenga que pasar por cientos de filas de cálculos para poder llegar a ver los resultados, que es lo que realmente le interesa.

No obstante dado que es el último paso del procedimiento de cálculo de la hoja y además es suficientemente extenso, se explicará más adelante.

9.3.- Lectura de los sensores

En esta parte de la hoja es donde se registran todos los valores de los sensores de la planta utilizados tanto sus valores actuales como los del pasado. En la Figura 9.3 se puede ver un extracto de la parte de la hoja dedicada a la lectura de los sensores.

Lectura de los sensores									
Instante de lectura de los sensores: 30/06/2017 14:10									
Sensores del BLAC									
Sensores de presión						Sensores de temperatura			
TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad del sensor	Valor en unidades del SI	Unidad del SI	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad
PDT 500	GIJON3.PDI500.F_CV	72,4053726	mmca	709,02	Pa	TE 500	GIJON3.TI500.F_CV	15,385	°C
PT 502	GIJON3.PI502.F_CV	1,12673998	barg	213999,00	Pa	TE 502	GIJON3.TI502.F_CV	99,389	°C
PDT 502	GIJON3.PDI502.F_CV	0,01230769	bard	1230,77	Pa	TE 503	GIJON3.TI503.F_CV	24,542	°C
PT 504	GIJON3.PI504.F_CV	2,63125753	barg	364450,75	Pa	TE 504	GIJON3.TI504.F_CV	82,540	°C
PDT 504	GIJON3.PDI504.F_CV	0,03340659	bard	3340,66	Pa	TE 505	GIJON3.TI505.F_CV	24,664	°C
PT 506	GIJON3.PI506.F_CV	6,41758251	barg	743083,25	Pa	TE 506	GIJON3.TI506.F_CV	107,082	°C
PDT 506	GIJON3.PDI506.F_CV	0,03008547	bard	3008,55	Pa	TE 507	GIJON3.TI507.F_CV	27,961	°C
PT 510	GIJON3.PIC510.F_CV	10,3841267	barg	1199737,67	Pa	TE 510	GIJON3.TI510.F_CV	74,847	°C

Figura 9.3. – Lectura de los sensores

Lo primero que aparece en el apartado de lectura de sensores es el instante de lectura de estos, que indica en qué fecha y hora fueron medidos esos valores. Para lo cual se utiliza la siguiente función de Excel:



- Celda E433: “=AHORA()-7*n”

Donde n será el número de semanas hacia atrás del periodo que se quiere observar. Por ejemplo, en la hoja del estado hace 12 semanas n sería 12, en la de estado hace 1 semana n sería 1 y en la hoja del estado actual n sería 0.

En el caso de la hoja “Estado personalizado” es diferente, ya que en este caso no es un momento fijo, sino el que escoja el usuario en el encabezado de la hoja. Para que no tenga que escribir dos veces el momento de lectura, lo cual aparte de tedioso puede provocar errores, la hoja se ha programado de manera que sólo la tenga que escribir en el encabezado y automáticamente se copie en la casilla del apartado de lectura de los sensores.

- Celda E435 (en hoja “Estado personalizado”): “=J7”

Seguidamente, este apartado de la hoja muestra los registros de los sensores agrupados en 4 subapartados, correspondiéndose cada uno de ellos con una parte del proceso. Dentro de los planos se encuentran los diagramas de tuberías e instrumentación (P&ID) del sistema de compresión y purificación de aire. En ellos se puede ver la ubicación de los mismos dentro del proceso. Además, cada uno de estos subapartados se corresponden a unas hojas concretas de este P&ID, las cuales se muestran a continuación.

- Sensores del BLAC: Hoja 1 del plano 100.00
- Sensores del DCA y los prepurificadores: Hojas 2, 3 y 4 del plano 100.00
- Sensores del BAC: Hoja 5 del plano 100.00
- Sensores auxiliares: estos se han dejado en un subapartado diferente por diversos motivos que hacen especiales a cada uno de ellos y se explicarán más adelante.

Asimismo estos subapartados todavía tienen una clasificación más dentro de ellos y es por el tipo de sensor. De esta forma cada una de las tablas agrupa sensores según sea la variable que midan, las cuales pueden ser: presión, temperatura, caudal, humedad o potencia.

En la Figura 9.4 se puede ver, a modo de ejemplo, la tabla de los sensores de presión del BLAC, ya que la estructura es la misma para todos los tipos de sensores. En ella se muestran los sensores en las diferentes filas y cada uno de estos tiene unos registros para cada una de las columnas.

- Primera columna: muestra el TAG del sensor dentro del P&ID, es decir el código que posee el mismo dentro de los sensores que hay en la planta.
- Segunda columna: muestra el código que posee ese sensor en el programa Historian, que es el programa utilizado por la empresa para registrar los valores de los sensores y se explicará más adelante.



- Tercera columna: muestra el valor que está midiendo el sensor. No obstante, cabe señalar que la variable que aquí se recoge es la señal ya procesada que se genera en el PLC, la cual estará medida en alguna de las unidades medición de la presión (no se muestra la medida eléctrica que realiza el sensor directamente que en la mayoría de los casos es un señal eléctrica de 4-20 mA).
- Cuarta columna: muestra las unidades de la variable que representa la señal procesada por el PLC.
- Quinta columna: muestra el valor de la tercera columna, pero en unidades del Sistema Internacional.
- Sexta columna: muestra las unidades del Sistema Internacional de cada variable.

	A	B	C	D	E	F	G	H	
437									
438	Sensores de presión								
439		TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad del sensor	Valor en unidades del SI	Unidad del SI		
440		PDT 500	GIJON3.PDI500.F_CV	72,4053726	mmca	709,02	Pa		
441		PT 502	GIJON3.PI502.F_CV	1,12673998	barg	213999,00	Pa		
442		PDT 502	GIJON3.PDI502.F_CV	0,01230769	bard	1230,77	Pa		
443		PT 504	GIJON3.PI504.F_CV	2,63125753	barg	364450,75	Pa		
444		PDT 504	GIJON3.PDI504.F_CV	0,03340659	bard	3340,66	Pa		
445		PT 506	GIJON3.PI506.F_CV	6,41758251	barg	743083,25	Pa		
446		PDT 506	GIJON3.PDI506.F_CV	0,03008547	bard	3008,55	Pa		
447		PT 510	GIJON3.PIC510.F_CV	10,3841267	barg	1139737,67	Pa		

Figura 9.4. - Vista ampliada de la tabla generada con la lectura de los sensores de presión del BLAC

Antes de continuar, será mejor hacer algunas aclaraciones respecto a estas mediciones.

Hay dos tipos de sensores de presión los PT, que miden la presión en un punto concreto del proceso, y los PDT, que miden diferencia de presión entre dos puntos del proceso. Los primeros utilizan los barG como unidad de medida, ya que están midiendo presiones relativas o barométricas, por lo que a la hora de convertir éstos a Pa absolutos, aparte de multiplicar por 10^5 , habrá que sumarle el valor de la presión atmosférica, el cual se recoge como P_amb dentro de los sensores auxiliares. En cambio los PDT al medir diferencia de presión entre dos puntos no influye que lo haga como diferencia de presiones absolutas o relativas, ya que la diferencia entre ambas será la misma. Por tanto para convertir bard a Pa simplemente habrá que multiplicar por 10^5 , pero no habrá que sumarle la presión atmosférica.



La segunda aclaración está referida a los sensores de temperatura, ya que al medir ya en grados Celsius ($^{\circ}\text{C}$), éstos no cuentan con las dos últimas columnas para convertir las mediciones a unidades del SI.

La siguiente se refiere a las mediciones de caudal. Éstas miden miles de metros cúbicos en condiciones normales por cada hora (miles Nm^3/h). Es importante no confundir estos miles de metros cúbicos con kilómetros cúbicos, ya que no son medidas equivalentes.

Por último aclarar que para la medida de la humedad relativa se ha utilizado la unidad p.u. como unidad del S.I., la cual quiere decir que son valores por unidad o tanto por uno, a diferencia del tanto por ciento (%) en que mide el sensor.

9.3.1.- Sensores auxiliares

Como se comentó anteriormente hay un subapartado dentro de los sensores que se conoce como “Sensores auxiliares” y ahí se agrupan aquellos que tienen alguna peculiaridad. Por tanto, se explicarán los cuatro sensores que aparecen en esta parte de manera individualizada.

- Sensor “P_amb”

El primero es el sensor llamado “P_amb”. Éste es un sensor ficticio que indica la presión atmosférica del ambiente. Este valor es necesario por dos motivos. El primero es que indica la presión del punto 0 del proceso, ya que éste representa el aire ambiental. El segundo es que hace falta el valor de esta presión para convertir todos los valores del resto de sensores de presión que miden presiones relativas (barG) a presiones absolutas (barA) que son las utilizadas en las tablas de propiedades del aire. No obstante en la planta no existe ningún sensor que mida la presión absoluta del aire todos miden presiones relativas, por lo que se analizaron cuatro posibilidades diferentes para solventar este contratiempo.

- 1) Tomar un valor constante de la presión ambiental (por ejemplo 101325 Pa que es el valor que se suele tomar a nivel del mar).

Ventajas:

- Es gratuita.
- No requiere la instalación de un sensor nuevo.
- Es fácil de programarla dentro del Excel.

Desventajas:

- Posee una mala precisión cuando la presión ambiental se desvíe de este valor.



- 2) Comprar un sensor de presión absoluta que mida hasta 1,5 barA aproximadamente.

Ventajas:

- Buena precisión.
- Disminuye los errores relacionados a presiones relativas y humedades relativas.
- Es fácil de programar dentro del Excel.

Desventajas:

- Su coste (unos 200 € aproximadamente).
- Requiere instalar un nuevo sensor.

- 3) Sustituir el sensor de temperatura de bulbo húmedo que había antiguamente en la planta pero que ya no funciona.

Ventajas:

- No requiere instalación nueva, sería reemplazar el sensor averiado por uno nuevo.
- Permite calcular la presión ambiental a partir de su valor, junto con la temperatura y la humedad relativa.

Desventajas:

- Su coste.
- Su programación en Excel es más complicada que para los casos anteriores.
- El valor de la presión ambiental calculado no sería muy fiable (se calcula con ecuaciones empíricas que conllevan un gran error).
- El valor de la presión será muy sensible a pequeñas variaciones de este sensor, lo que puede provocar resultados incoherentes en periodos de tiempo cercanos.

- 4) Obtener el valor de la presión ambiental de alguna pagina web de previsión meteorológica.

Ventajas:

- Es gratuito.
- Fácil de programar para el momento actual.



Desventajas:

- Imposibilidad de que el programa disponga de los datos pasados en el instante preciso que se están tomando el resto de variables. Cabría la posibilidad de hacer un histórico manualmente con valores de las presiones ambientales, pero se desestimó viendo que no era factible, ya que ralentizaba en exceso el programa. Otra forma de evitar esto sería tomar el valor actual de internet y suponer un valor fijo como en la primera opción para el pasado, pero también se desestimó al ver que generaba diferentes valores y con ello errores de mirar una hoja en el momento actual o en el pasado.

Finalmente se optó por la opción 1, la de suponer un valor constante a la presión atmosférica que sería de 101325 Pa. Dado que la presión atmosférica en Gijón suele rondar esos valores entorno a 1010-1020 mbarA (101000-102000 Pa) no se desviará mucho del valor real. No obstante, se quiso comprobar cuál sería su error máximo en los casos más desfavorables. Así se buscaron los datos de la presión atmosférica máxima y mínima registrada en Gijón (Meteogijón, 2017) y se calcularon los errores que se producirían en estos casos.

Para esta comparación se tomaron el resto de datos del día 12/6/2017 a las 10:00 y se calcularon los rendimientos de los compresores tanto con la presión aproximada de 101325 Pa como con los valores máximos y mínimos.

	Presión mínima (991,1 mbar)	Presión aproximada (1013,25 mbar)	Error absoluto	Error relativo
BLAC 1	87,1	84,8	2,3	2,6
BLAC 2	89,8	89,3	0,5	0,6
BLAC 3	83,4	83,0	0,4	0,5
BLAC 4	85,2	85,0	0,2	0,2
BAC 1	81,8	81,7	0,1	0,1
BAC 2	80,7	80,6	0,1	0,1

Tabla 9.1. – Comparación de los valores de los rendimientos de los compresores calculados con la presión de 1013 mbar cuando se registra la presión mínima



	Presión máxima (1035,3 mbar)	Presión aproximada (1013,25 mbar)	Error absoluto	Error relativo
BLAC 1	84,0	84,8	0,8	1,0
BLAC 2	88,7	89,3	0,6	0,7
BLAC 3	82,7	83,0	0,3	0,4
BLAC 4	84,8	85,0	0,2	0,2
BAC 1	81,6	81,7	0,1	0,1
BAC 2	80,5	80,6	0,1	0,1

Tabla 9.2. - Comparación de los valores de los rendimientos de los compresores calculados con la presión de 1013 mbar cuando se registra la presión máxima

Como se puede apreciar en la Tabla 9.1 y en la Tabla 9.2, aún en los casos más extremos, no se producen grandes variaciones, teniendo todas las etapas un error relativo menor del 1 %, excepto la primera que ronda entre el 1 y el 3 % debido a que su presión de aspiración es la ambiental menos las pérdidas de carga en el filtro de aspiración del BLAC.

No obstante, en todas las pruebas que se realizaron en la empresa con datos reales de los sensores en momentos concretos y tomando el valor de la presión atmosférica que marcaba en ese momento la AEMET (Ministerio de agricultura, pesca alimentación y medio ambiente, 2017) se comprobó como en condiciones normales los errores de todas las etapas de compresión eran siempre menores del 1 %.

Esto corrobora la decisión de escoger la opción 1, ya que pese a que se habló con la empresa para debatir esto decidieron que no les merecía la pena gastar dinero y esfuerzo en comprar e instalar un nuevo sensor, para las pequeñas variaciones que se iban a dar en los resultados finales.

Aún así se dejó esta casilla como si fuera un sensor más, con el objetivo de tener la posibilidad en un futuro de sustituir fácilmente su valor de 101325 Pa, por la lectura de un sensor de presión absoluta, en caso de que la empresa decida adquirir uno.

- Sensor “PI 594”

El segundo es el sensor “PI 594”. Éste es un manómetro que muestra su medición en campo, pero que no posee un transmisor que genere una señal eléctrica para enviar al PLC, por lo que no se puede disponer de su valor medido. No obstante, debido a la posición que ocupa en el proceso (entrada del BAC 1) es imprescindible conocer su valor. Para ello se aproximó el valor de este punto como si allí hubiera un sensor ficticio que estuviera midiendo la presión en ese punto. Así, el valor del mismo vendrá determinado por la presión aguas abajo del aftercooler del BAC y el valor que esté midiendo el sensor de presión PDT 594, el cual indica la diferencia de presión entre la entrada del BAC 1 y la salida del BAC 2. Gracias a esta aproximación se puede conocer el valor de la presión en el punto donde está colocado el sensor PI 594 (entrada del BAC 1) en cualquier momento como si se enviase una señal al PLC.



Para ello, lo primero será conocer cuál es la evolución de la presión del aire desde el punto buscado a la entrada del BAC 1 hasta la salida del aftercooler del BAC. Dado que no podrían calcularse con exactitud y que además son equipos que están uno a continuación del otro, sin largos tramos de tuberías, por lo que éstas serán bajas, se han despreciado las pérdidas de carga en la tubería. Aunque en la realidad si existirán, éstas serán muy pequeñas.

$$P_{12} + \Delta P_{BAC} - \Delta P_{aftercoolerBAC} = P_{16} \quad (\text{ec. 9.1})$$

Donde P_{12} y P_{16} representan las presiones de los puntos del proceso 12 y 16 respectivamente, ΔP_{BAC} es la presión diferencial entre la entrada y la salida del BAC y $\Delta P_{aftercoolerBAC}$ es la caída de presión que aparece en el aftercooler del BAC (en valor absoluto, ya que ya se ha puesto el signo negativo en la ecuación).

Esta caída de presión del aftercooler del BAC no se puede conocer con precisión de antemano, ya que no es un valor constante, sino que depende de varios factores, siendo el principal de ellos el caudal de aire circulante por el equipo. Por tanto, se ha aproximado esta caída de presión, al dato de que da el fabricante del equipo en su manual, como pérdida de carga de diseño en el lado de la carcasa, que es por donde circula el aire. De esta manera, el fabricante da un valor de 510 mmca, por lo que habrá que convertir esta presión a bar que son las unidades en las que miden los demás sensores de la planta.

$$P = \rho * g * h_{mca} \quad (\text{ec. 9.2})$$

$$\Delta P_{aftercoolerBAC} = \rho_{agua} * g * h_{mca} = 998 * 9,81 * 0,51 = 4994 \text{ Pa} \approx 0,05 \text{ bar} \quad (\text{ec. 9.3})$$

Despejando en la ecuación se obtiene la presión en el punto 12 del proceso, es decir, en la posición donde está midiendo el sensor PI 594.

$$P_{12} = P_{16} - \Delta P_{BAC} + \Delta P_{aftercoolerBAC} \quad (\text{ec. 9.4})$$

Sabiendo que la presión del punto 12 es la medida por el sensor PI 594, la del punto 16 es la medida por el sensor PT 594 y la diferencia de presión entre la entrada y la salida del BAC es la medida por el sensor PDT 594, la ecuación anterior queda como se muestra a continuación.

$$P_{PI594} = P_{PT594} - \Delta P_{PDT594} + \Delta P_{aftercoolerBAC} = P_{PT594} - \Delta P_{PDT594} + 0,05 \quad (\text{ec. 9.5})$$

Con la ecuación anterior ya se puede programar en Excel el sensor PI 594 (celda E491), el cual se calculará automáticamente a partir de los valores medidos por los sensores PT 594 (celda E475) y PDT 594 (celda E476) en el instante visualizado.

– Celda E491: “=E475-E476+0,05”



- Sensores JT 500 y MI 501

Los otros dos sensores considerados como “auxiliares” no son dos sensores ficticios como los dos anteriores, sino que son dos sensores reales que generan una señal en el PLC. No obstante se han colocado dentro de este subapartado por no pertenecer a una parte concreta del sistema de compresión y purificación de aire (BLAC, DCA y prepurificadores o BAC).

El primero de estos dos es el sensor JT 500, el cual está conectado al motor eléctrico encargado de mover todas las etapas del sistema de compresión. Este sensor mide la potencia eléctrica consumida por el motor eléctrico, es decir, la que toma de la red eléctrica.

El segundo es el sensor MI 501, el cual es un sensor que mide el porcentaje de humedad relativa del aire ambiental.

9.3.2.- Importación de las medidas de los sensores con Historian

Todo este programa no sería posible sin la medición continua de las variables de funcionamiento del proceso. Para ello la planta cuenta con diversos sensores repartidos por diferentes puntos del proceso. Todos estos sensores envían una señal eléctrica analógica al PLC (normalmente 4-20 mA o 0-10 V), donde se procesan y se genera la correspondiente señal en las unidades de la variable buscada. No obstante, desde Excel no se pueden leer directamente los valores registrados en el PLC.

Para combatir esto, la empresa cuenta con un software llamado Historian, el cual es capaz de leer los valores de las mediciones de los sensores que tiene el PLC y transferir el correspondiente valor a Excel. Además este programa, una vez instalado, aparece como un complemento de Excel, lo cual facilita la interacción entre ambos.

Para obtener los datos de todos los sensores de la planta necesarios lo primero que hay que buscar es el código que posee el sensor dentro del Historian. En la mayoría de los casos se corresponderá con el nombre de la planta, en este caso “GIJON3” y el TAG correspondiente a la señal procesada en el PLC del sensor buscado. Hay que tener en cuenta que cualquier sensor, por ejemplo el sensor de presión PT 502 genera una señal eléctrica de 4-20 mA que manda al PLC, por lo que en el Historian habrá que buscar el código de la señal procesada por el PLC correspondiente al sensor buscado, por ejemplo para el PT 502, sería el PI 502. La diferencia es que el PT 502 genera una señal de 4 a 20 mA, mientras que el PI 502 genera una señal de 0 a 3 barG, por lo que la medida que interesa para el cálculo será la de la señal procesada por el PLC. Al igual ocurrirá con los demás tipos de sensores, por lo que para cada sensor, en función del tipo que sea, habrá



que buscar su correspondiente señal procesada por el PLC (TI, FI, etc) y no la señal eléctrica generada realmente por el sensor.

Para facilitar la búsqueda de los sensores, Historian cuenta con la función “Search Tags”, a la que se puede acceder a través del menú de Historian que aparece en la barra de complementos de Excel (Figura 9.5).

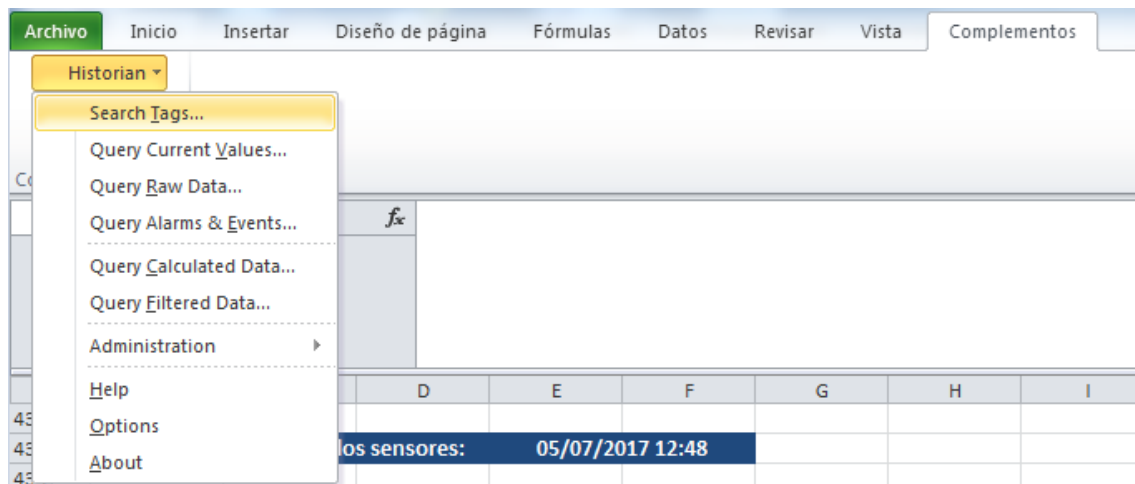


Figura 9.5. – Vista del menú del complemento del Historian en Excel

Pinchando en “Search Tags” se abre la ventana de la Figura 9.6. En ella se pueden ver todos los sensores de la planta y para cada uno de ellos mostrar diferentes características, variando la característica escogida en “Output Display”.

Para este estudio solamente fue necesarias utilizar el nombre del TAG, la descripción del sensor y las unidades de medida del sensor.

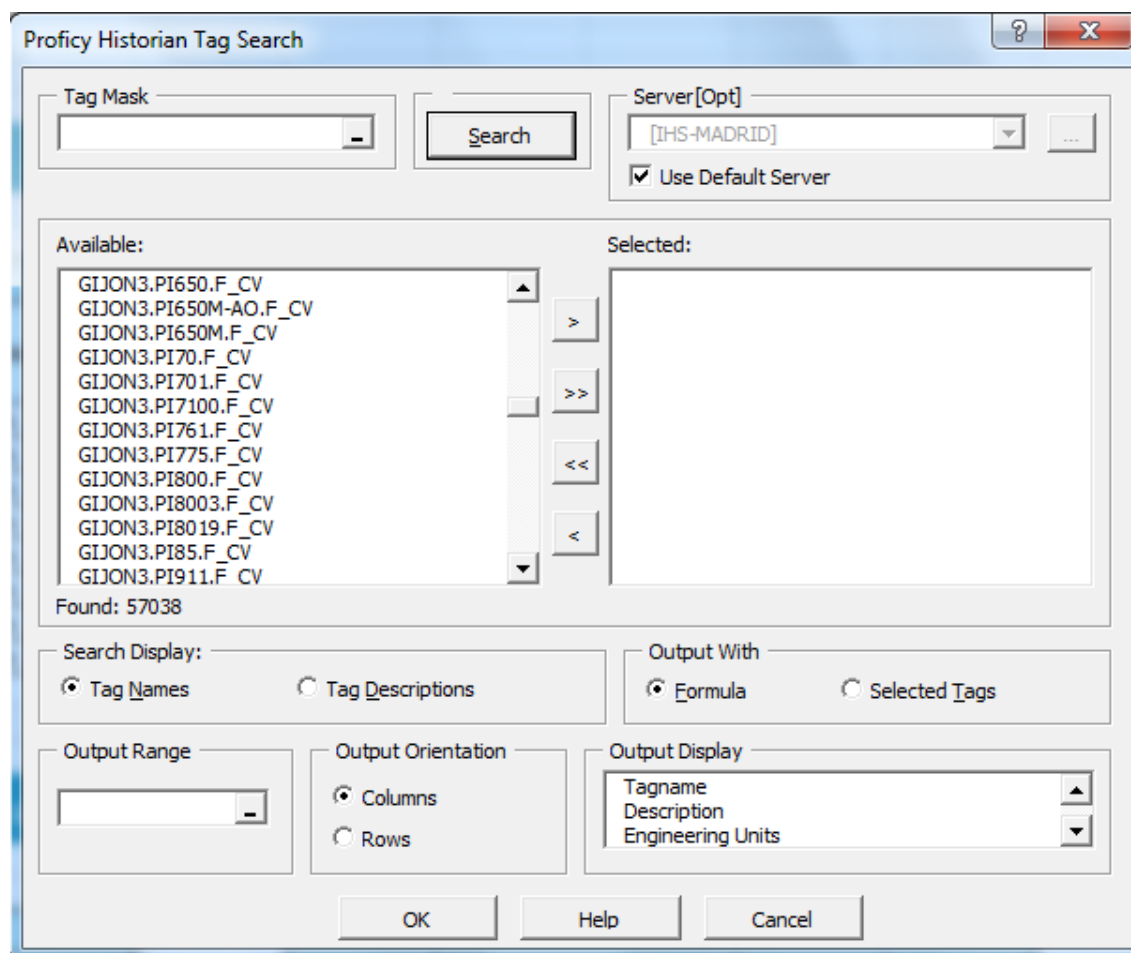


Figura 9.6. – Ventana de búsqueda de sensores en Historian

Con esto se obtiene la columna de “Código del TAG en el Historian” que se mostraba en la Figura 9.4 y que recogía una de las tablas de lectura de sensores en la hoja Excel.

El siguiente paso será obtener la lectura del sensor. El procedimiento a seguir dependerá de si se trata del valor actual (hoja del Excel “Estado actual”) o de un valor del pasado (para el resto de las hojas).

Para obtener el valor de lectura actual, lo primero será ir al menú de Historian (Figura 9.5) y pinchar en “Query current values” lo cual abre la siguiente ventana. En esta ventana será necesario rellenar tres casillas. El primero será el código del TAG buscado en el Historian, que por ejemplo para el caso del PDT 500 que se muestra en la Figura 9.7, serían las celdas C440 y D440 (en realidad funcionarían como una sola celda porque están combinadas). El segundo será escoger el valor de salida que buscamos que en este caso será el valor medido por el sensor por lo que habrá que marcar “Value”. Por último, se escoge la casilla donde se quiere mostrar el valor de salida, que en este caso será la celda E440. Realizando estos mismos pasos sucesivamente para cada uno de los sensores se rellenan todas las tablas de lecturas de los sensores. Al mostrar un valor actual, éstos se



irán actualizando automáticamente en la hoja de Excel según vaya variando el valor del sensor en la realidad.

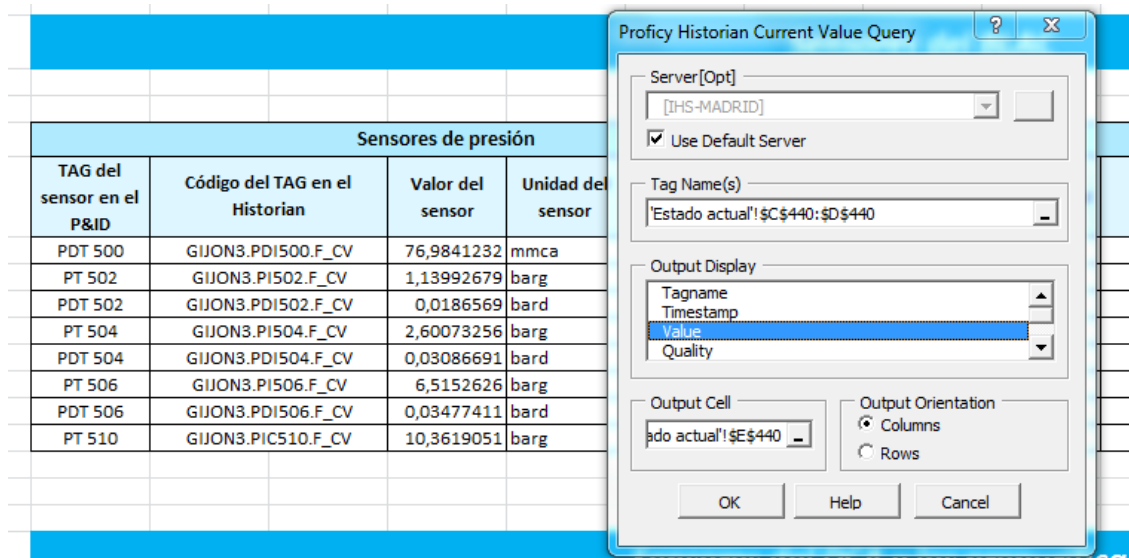


Figura 9.7. – Obtención de las mediciones de los sensores en tiempo real

Para obtener la lectura de un valor del pasado cambia ligeramente el procedimiento a seguir. Para empezar habrá que ir al menú de Historian y pinchar en “Query raw data”, con lo que sale la siguiente ventana (Figura 9.8).

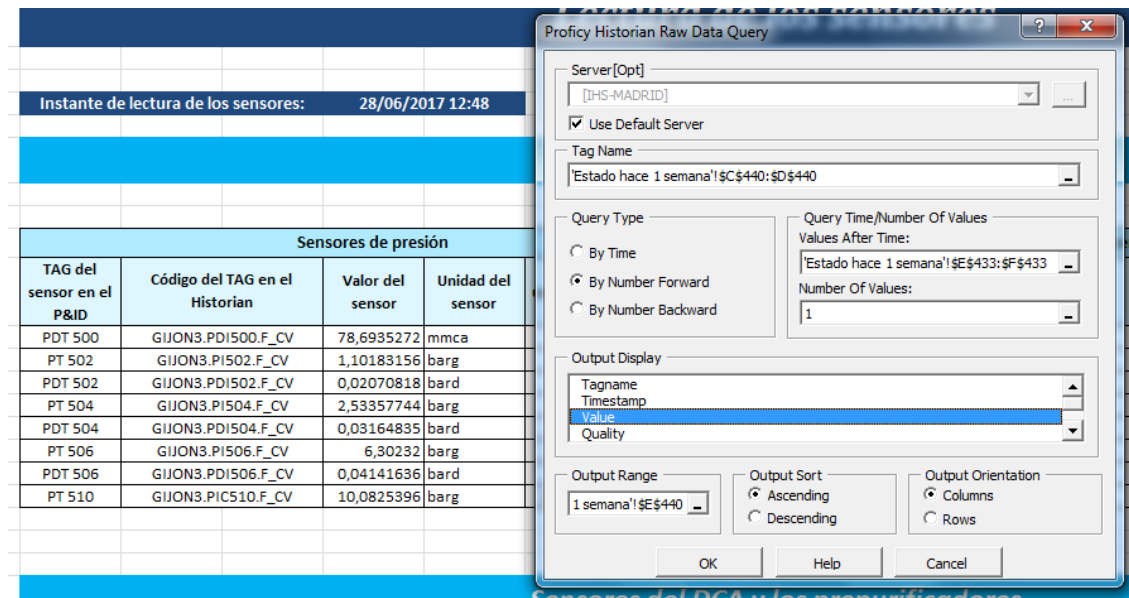


Figura 9.8. – Obtención de las medidas de los sensores en el pasado

Tanto la introducción del código del sensor buscado como la celda de salida y su valor se harán de la misma forma que se hacía para el valor actual. La diferencia reside en que ahora aparece un apartado más para indicar en qué momento se quieren leer los datos.



Para este proyecto se escogió el modo de lectura “By number forward” con un número de valores de 1. En este modo de lectura, el programa extrae tantos valores como se le haya indicado a partir del momento buscado. Dado que en este caso sólo se busca el dato de un momento concreto, ya que cada uno de los periodos semanales irá en hojas de cálculo diferentes, será suficiente con poner un valor de 1 e indicarle el momento de lectura de los sensores, que cómo se puede ver están en las celdas E433 y F433 (en realidad funcionan como una sola celda ya que están combinadas).

9.4.- Cálculos

9.4.1.- Cálculos de los flujos máxicos

Para empezar el apartado de cálculos, lo primero que hace el programa es calcular los flujos máxicos de aire seco que circulan por las dos zonas del proceso, desde la entrada de aire hasta el desvío de aire a baja presión y desde éste a la salida de aire a alta presión (ver capítulo “5. Análisis teórico del problema planteado”).

En la Figura 9.9 se muestra cómo sería este apartado del programa.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
520										
521		Cálculos de los flujos máxicos								
522										
523										
524		Condiciones normales								
525		P	101325	Pa						
526		T	0	°C						
527		ρ	1,294	kg/m ³						
528										
529										
530										
531		FE 580					Caudal saliente del BLAC			
532		P_580	1105769,4	Pa		w_8	0,00330	kg agua / kg aire seco		
533		T_580	9,89	°C		m_8	56,741	kg/s		
534		V_580	43,70506	m ³ /s		x_8	56,554	kg aire seco / s		
535		ρ_580	1,294	kg/m ³		y_8	0,187	kg agua / s		
536		m_580	56,554	kg/s						
537										
538										
539		FE 598A					Caudal saliente del BAC			
540		P_598A	1991634,7	Pa		w_15	0,00000	kg agua / kg aire seco		
541		T_598A	26,74	°C		m_15	14,117	kg/s		
542		V_598A	10,90965	m ³ /s		x_15	14,117	kg aire seco / s		
543		ρ_598A	1,294	kg/m ³		y_15	0,000	kg agua / s		
544		m_598A	14,117	kg/s						

Figura 9.9. – Cálculos de los flujos máxicos

La primer tabla que aparece es la de las condiciones normales de cálculo que toma Praxair en sus plantas, que son 101325 Pa de presión y 0 °C de temperatura, con los que se obtiene una densidad del aire seco de 1,294 kg/m³. Esta densidad será la que haya que



aplicar siempre para pasar de flujo volumétrico que es lo que mide el sensor a flujo másico, ya que el sensor mide en esas condiciones normales.

Así el flujo volumétrico \dot{V}_i donde i es el sensor de caudal, será el valor que este midiendo dicho sensor, el cual se encontrará en la correspondiente casilla del apartado de la hoja de Excel dedicado a la lectura de los sensores.

A partir de este valor y de la densidad del aire en condiciones normales se puede conocer el flujo másico de aire que circula por cada una de las dos partes del sistema.

$$\dot{x}_i = \dot{V}_i * \rho_{aireN} \quad (\text{ec. 9.6})$$

Con este valor del flujo másico de aire seco y la humedad absoluta de salida del BLAC se puede conocer también el flujo másico de agua que sale de éste.

$$\dot{y}_i = \dot{x}_i * w_i \quad (\text{ec. 9.7})$$

9.4.2.- Cálculo de las propiedades de aire húmedo

En este apartado de la hoja de cálculo, se representan todos los puntos del proceso estudiado en la parte de aire húmedo, es decir, desde la entrada del aire ambiental (punto 0) hasta la salida del conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo (punto10).

Aunque realmente el lado de aire húmedo terminaría antes de los prepurificadores (punto 9), ya que después de pasar por ellos sale siempre como aire seco, es necesario analizar también el punto 10 en base húmeda para poder hacer el balance de energía al bloque de los prepurificadores y el filtro de polvo. Por tanto este punto 10 aparecerá dos veces, una vez calculado en base húmeda y otra en base seca.

Cada uno de los puntos del proceso se define mediante todas sus variables termodinámicas, las cuales están recogidas en la Tabla 9.3 y donde el subíndice i denota el punto concreto del proceso:



Variable	Descripción	Unidades
P _i	Presión	Pa
T _i	Temperatura (medida en °C)	°C
T _i [K]	Temperatura (medida en K)	K
P _{w,sat_i}	Presión de saturación del vapor	Pa
w _{sat_i}	Humedad absoluta de saturación	kg agua / kg aire seco
w _i	Humedad absoluta	kg agua / kg aire seco
HR _i	Humedad relativa	tanto por uno
h _i	Entalpía (en base húmeda)	J / kg aire seco
s _i	Entropía (en base húmeda)	J / (K * kg aire seco)

Tabla 9.3. – Variables de las propiedades definidas en los puntos del proceso de la parte de aire húmedo

Como ya se explicó en el análisis teórico del proceso, el procedimiento de cálculo de estas variables dependerá si es un punto real del proceso (los puntos numerados del 0 al 10) o un punto ideal (los puntos terminados en s).

En la Tabla 9.4 se recoge cómo sería el procedimiento de cálculo para cada uno de los puntos reales del proceso en el lado de aire húmedo.

Variable	Método de cálculo en Excel
P _i	Medición del sensor correspondiente
T _i	Medición del sensor correspondiente
T _i [K]	Calculado a partir de T _i
P _{w,sat_i}	Calculado a partir de T _i y T _i [K]
w _{sat_i}	Calculado a partir de P _i y P _{w,sat_i}
w _i	Calculado a partir de w _{sat_i} y w _(i-1)
HR _i	Calculado a partir de w _i , P _i y P _{w,sat_i}
h _i	Interpolando en las tablas "Entalpía_AHum" con P _i , T _i y HR _i
s _i	Interpolando en las tablas "Entropía_AHum" con P _i , T _i y HR _i

Tabla 9.4. – Procedimiento de cálculo de las variables que definen un punto del proceso para los puntos reales de la parte de aire húmedo

Donde las variables calculadas utilizan las ecuaciones que ya se comentaron en el apartado del análisis teórico. No obstante, se muestran a continuación para mayor claridad.

$$T_i[K] = T_i + 273,15 \quad (\text{ec. 9.8})$$

$$P_{w,sat_i} = 610,5 * e^{\frac{21,875 * T_i}{265,5 + T_i}} \quad \text{si } T_i < 0^\circ\text{C} \quad (\text{ec. 9.9})$$

$$P_{w,sat_i} = e^{77,3449 - \frac{7235,4246}{T_i[K]} - 8,2 * \ln(T_i[K]) + 5,7113 * 10^{-3} * T_i[K]} \quad \text{si } T_i \geq 0^\circ\text{C} \quad (\text{ec. 9.10})$$



$$w_{sat_i} = 0,622 * \frac{P_{w,sat_i}}{\frac{P_i}{1} - P_{w,sat_i}} \quad (\text{ec. 9.11})$$

$$w_i = \min[w_{i-1}, w_{sat_i}] \quad (\text{ec. 9.12})$$

$$HR_i = \frac{w_i}{w_i + 0,622} * \frac{P_i}{P_{w,sat_i}} \quad (\text{ec. 9.13})$$

Como la mayoría de estas operaciones son operaciones sencillas entre diferentes celdas (sumas, restas, multiplicaciones, etc), no se escribirán aquí todas las fórmulas utilizadas en Excel ya que haría demasiado densa la explicación. Simplemente resaltar dos de ellas que si tienen algo más de complicación. La primera es respecto a la presión de saturación del vapor donde habrá que usar una función “SI” de manera que si la celda de T_i es mayor o igual que cero escoja una ecuación, y en caso de ser falsa esta condición, escoja la otra. La segunda es respecto a la humedad absoluta, la cual utilizará la función de Excel “MIN” para escoger el mínimo entre la humedad absoluta de saturación de ese punto w_{sat_i} y la humedad absoluta del aire en el punto anterior del proceso w_{i-1} .

Existe una excepción en el método de cálculo de los puntos reales del proceso, el punto 0, el cual marca las condiciones ambientales. En él no se calcula la humedad relativa, ya que es la humedad ambiental que mide el sensor MI 501. No obstante, sí hay que calcular la humedad absoluta a partir de la relativa. Asimismo en este punto no se calcula la humedad absoluta de saturación, ya que nunca la llegará a superar. En la Tabla 9.5 se muestra el procedimiento de cálculo de este punto.

Variable	Método de cálculo en Excel
P_i	Medición del sensor correspondiente
T_i	Medición del sensor correspondiente
T_i [K]	Calculado a partir de T_i
HR_i	Medición del sensor correspondiente
P_w,sat_i	Calculado a partir de P_i y P_w,sat_i
w_i	Calculado a partir de P_i, HR_i y P_w,sat_i
h_i	Interpolando en las tablas "Entalpía_AHum" con P_i, T_i y HR_i
s_i	Interpolando en las tablas "Entropía_AHum" con P_i, T_i y HR_i

Tabla 9.5. - Procedimiento de cálculo de las variables que definen el punto 0 del proceso

Para lo que la única ecuación diferente a las de los demás puntos será la utilizada para calcular la humedad absoluta.



$$w_i = 0,622 * \frac{P_{w,sat_i}}{\frac{P_i}{HR_i} - P_{w,sat_i}} \quad (\text{ec. 9.14})$$

Por otro lado están los puntos ideales del proceso que son los de salida isentrópica de los compresores (2s, 4s, 6s, 8s, 13s y 15s). Estos puntos tienen un procedimiento de cálculo (Tabla 9.6) ligeramente distinto a los puntos reales, principalmente porque cambian las variables que son conocidas y las que son incógnitas. No obstante las ecuaciones para calcular T_{is} [K], $P_{w,sat_{is}}$, $w_{sat_{is}}$ y HR_{is} son las mismas que las utilizadas para los puntos reales, excepto que ahora referidas a los puntos isentrópicos.

Variable	Método de cálculo en Excel
P_is	La presión de salida del compresor (P_i)
T_is	Interpolando en las tablas "Temperatura_AHum" con P_is, s_is y w_is
T_is [K]	Calculado a partir de T_is
P_w,sat_is	Calculado a partir de T_is y T_is[K]
w_sat_is	Calculado a partir de P_is y P_w,sat_is
w_is	La humedad absoluta de entrada al compresor (w_(i-1))
HR_is	Calculado a partir de w_is, P_is y P_w,sat_is
h_is	Interpolando en las tablas "Entalpía_AHum" con P_is, T_is y HR_is
s_is	La entropía de entrada al compresor (s_(i-1))

Tabla 9.6. - Procedimiento de cálculo de las variables que definen un punto del proceso para los puntos ideales de la parte de aire húmedo

Por último, se puede ver en la captura de pantalla de la Figura 9.10 cómo sería la hoja de cálculo en uno de estos puntos. La distribución que sigue es siempre igual, mostrando primero las condiciones del aire en ese punto (tabla con fondo de color azul claro), con todas las interpolaciones necesarias a continuación (en el caso de la imagen dos, la entalpía y la entropía), donde las tablas naranjas son las extracciones de datos de las tablas de propiedades del aire y las tablas de color verde las de los cálculos de la interpolación.

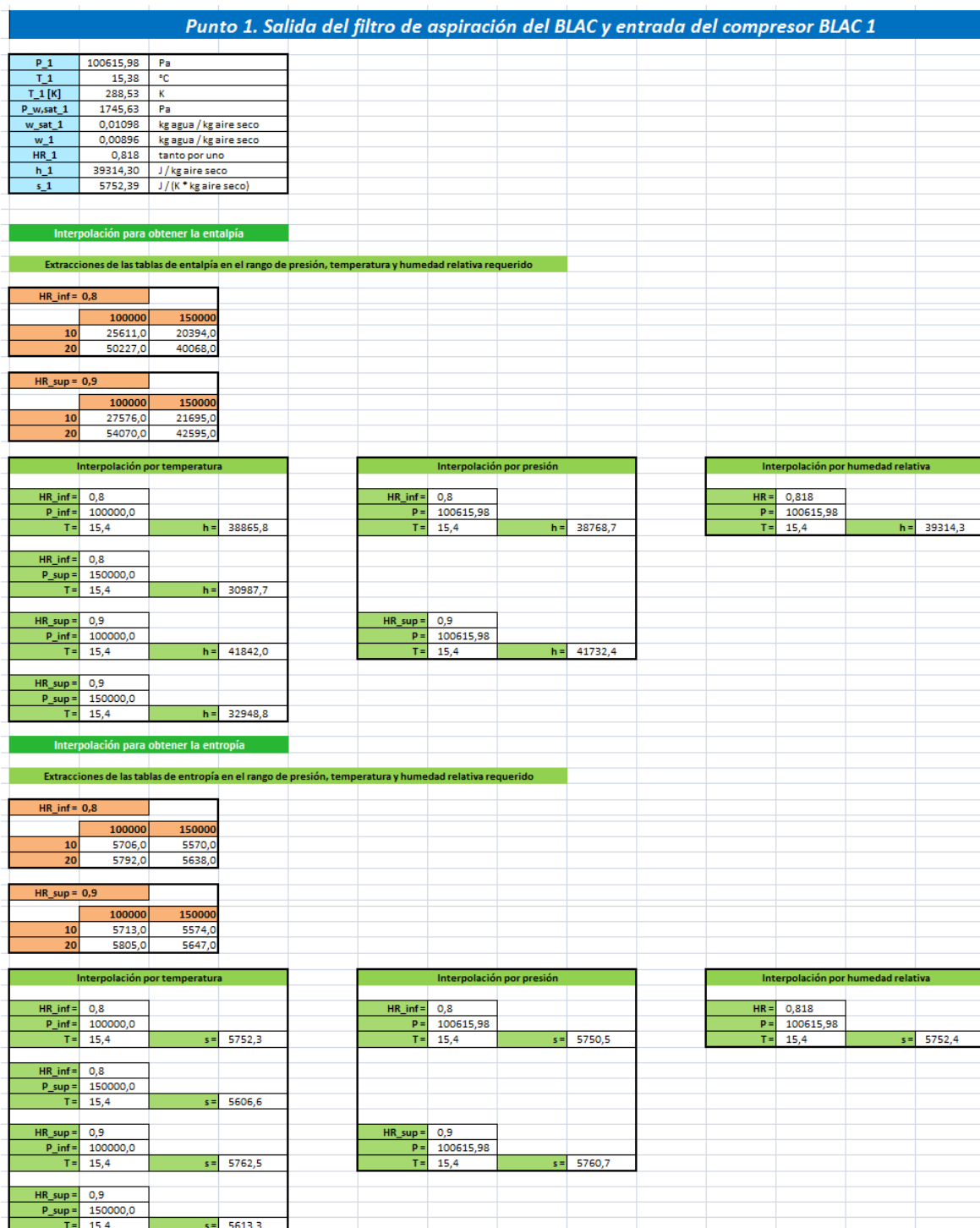


Figura 9.10. – Vista de uno de los puntos del proceso del lado de aire húmedo en el programa diseñado

9.4.3.- Cálculo de las propiedades del aire seco

En este apartado de la hoja de cálculo, se representan todos los puntos del proceso estudiado en la parte de aire seco, es decir, desde la salida del bloque de los



prepurificadores y el filtro de polvo (punto 10) hasta la salida del aftercooler del BAC (punto 16) que representa la salida de aire a alta presión, así como el punto 17 que representa la salida de aire a baja presión.

Estos puntos se definen mediante todas sus variables termodinámicas, las cuales son las recogidas en la Tabla 9.7 y donde el subíndice i denota el punto concreto del proceso.

Variable	Descripción	Unidades
P_i	Presión	Pa
T_i	Temperatura (medida en °C)	°C
T_i [K]	Temperatura (medida en K)	K
h_i	Entalpía (en base seca)	J / kg
s_i	Entropía (en base seca)	J / (K * kg)

Tabla 9.7. - Variables de las propiedades definidas en los puntos del proceso de la parte de aire seco

El procedimiento para calcular las variables en cada uno de los puntos será el mismo que el explicado anteriormente para los puntos del lado de aire húmedo, excepto que ahora no habrá que calcular P_{w,sat_i} , w_{sat_i} , w_i y HR_i , ya que al ser aire seco su humedad será nula.

De esta forma los puntos reales del proceso (puntos numerados del 10 al 17) tendrán el siguiente procedimiento de cálculo (Tabla 9.8).

Variable	Método de cálculo en Excel
P_i	Medición del sensor correspondiente
T_i	Medición del sensor correspondiente
T_i [K]	Calculado a partir de T_i
h_i	Interpolando en las tablas "Entalpía_ASeco" con P_i y T_i
s_i	Interpolando en las tablas "Entropía_ASeco" con P_i y T_i

Tabla 9.8. - Procedimiento de cálculo de las variables que definen un punto del proceso para los puntos reales de la parte de aire seco

Por su parte los puntos ideales del lado de aire seco que son los puntos de salida isentrópica de los compresores del BAC (13s y 15s) tendrán el siguiente procedimiento de cálculo (Tabla 9.9).



Variable	Método de cálculo en Excel
P _{is}	La presión de salida del compresor (P _i)
T _{is}	Interpolando en las tablas "Temperatura_ASeco" con P _{is} y s _{is}
T _{is} [K]	Calculado a partir de T _{is}
h _{is}	Interpolando en las tablas "Entalpía_ASeco" con P _{is} y T _{is}
s _{is}	La entropía de entrada al compresor (s _(i-1))

Tabla 9.9. - Procedimiento de cálculo de las variables que definen un punto del proceso para los puntos ideales de la parte de aire seco

En la Figura 9.11 se muestra una captura de pantalla del programa, donde se puede apreciar uno de los puntos del lado de aire seco. Comparándolo con los puntos de aire húmedo, destaca el menor número de variables termodinámicas que hacen falta aquí para definir el punto, así como el menor número de pasos de interpolación, 2 en vez de 3, ya que ahora no hace falta interpolar en función de la humedad relativa.



Figura 9.11. - Vista de uno de los puntos del proceso del lado de aire seco en el programa diseñado



9.4.4.- Cálculos de los caudales y potencias en los equipos

Este subapartado de la hoja de Excel sirve para calcular los balances individuales de cada equipo, tanto de materia como de potencia, los cuales ya se explicaron en el capítulo dedicado al análisis teórico del sistema.

En la Figura 9.12 se recogen las tablas generadas para uno de los equipos de la instalación, concretamente el compresor de la primera etapa del BLAC. No obstante, tanto la estructura del programa como su programación es la misma para todos los equipos, por lo que ésta sirve para hacerse una idea general del mismo. A continuación se abordará cada una de estas tablas de manera pormenorizada.

BLAC 1					
Entrada			Salida		Potencia aportada en el BLAC 1
P_1	100616,0	Pa	P_2	215229,8	Pa
T_1	15,38	°C	T_2	99,39	°C
w_1	0,00896	kg agua / kg aire seco	w_2	0,00896	kg agua / kg aire seco
HR_1	0,818	tanto por uno	HR_2	0,031	tanto por uno
h_1	39314,3	J / kg aire seco	h_2	125277,3	J / kg aire seco
m_1	56,0204	kg/s	m_2	56,0204	kg/s
x_1	55,5230	kg aire seco / s	x_2	55,5230	kg aire seco / s
y_1	0,4974	kg agua / s	y_2	0,4974	kg agua / s
Pot_1	2182848	W	Pot_2	6955775	W
			Pot_BLAC1	4772,93	kW

Figura 9.12. – Vista del compresor BLAC 1 en el apartado de cálculos de caudales y potencias de los equipos

Para empezar, aparecen las tablas de entrada y salida de la máquina, las cuales siguen el mismo procedimiento de cálculo, sin importar que equipo sea. La diferencia reside en que será una pareja de puntos del proceso diferente, siendo la entrada el punto i y la salida el punto $i+1$. Por tanto, sólo se explicará cómo se calcula el de entrada, que en este caso es el punto 1.

	A	B	C	D	E
2245					
2246		Entrada			
2247		P_1	100616,0	Pa	
2248		T_1	15,38	°C	
2249		w_1	0,00896	kg agua / kg aire seco	
2250		HR_1	0,818	tanto por uno	
2251		h_1	39314,3	J / kg aire seco	
2252		m_1	56,0204	kg/s	
2253		x_1	55,5230	kg aire seco / s	
2254		y_1	0,4974	kg agua / s	
2255		Pot_1	2182848	W	
2256					

Figura 9.13. – Condiciones de entrada al BLAC 1



En la Figura 9.13 se puede ver la tabla que genera el Excel para las condiciones de entrada del BLAC 1. En ella, los primeros 5 valores (celdas desde la C2247 a la C2251), son las variables termodinámicas del correspondiente punto del proceso, por lo que no hace falta volver a calcularlas. Simplemente copiará los valores del apartado de la hoja “Cálculo de las propiedades del aire húmedo” o “Cálculo de las propiedades del aire seco” según en qué parte se localice el equipo analizado.

El siguiente paso será calcular el caudal másico de aire seco \dot{x}_i , el cual dependerá de la ubicación del equipo dentro del proceso, como ya se explicó en el apartado de la memoria “5.3. Caudales del proceso”. Este flujo másico ya se calculó al principio de la hoja de Excel (apartado “Cálculo de flujos másicos”) a partir del caudal volumétrico del sensor FT 580 o el del sensor FT 598A, dependiendo de si el equipo analizado está antes o después del desvío de aire a baja presión. Por tanto sólo habrá dos flujos másicos de aire seco posibles, el calculado a partir del sensor FT 580 (celda H534) y que será el que tengan los puntos del proceso desde el 0 hasta 10, o el calculado a partir del sensor FT 598A (celda H542) y que será el que tengan los puntos desde el 11 al 16. Obviamente, aunque el desvío de aire a baja presión no aparece en estos balances individuales porque no hay ningún equipo en él, el flujo másico de aire que circula por él sería la diferencia de los dos anteriores.

Una vez se conoce el flujo másico de aire seco \dot{x}_i , se puede calcular el flujo másico de agua \dot{y}_i , el cual será el producto del flujo másico de aire seco por la humedad absoluta del aire en ese punto. Por ejemplo, para el caso de la Figura 9.13 se calculará con la siguiente función:

- Celda C2254: “=C2253*C2249”

El flujo másico total \dot{m}_i simplemente será la suma del de aire seco más el de agua. Por ejemplo, para la Figura anterior sería:

- Celda C2252: “=C2253+C2254”

Por su parte, la última casilla muestra la potencia que lleva la corriente de aire, ya sea en base seca o húmeda, en función de la zona del proceso. No obstante, siempre tendrá que estar medida en la misma base tanto a la entrada como a la salida para poder compararlas. Esta potencia será el producto del flujo másico de aire seco \dot{x}_i por la entalpía del aire h_i . En el ejemplo de la Figura 9.13, la fórmula utilizada en Excel quedaría:

- Celda C2255: “=C2253*C2251”

Una vez completadas las dos tablas con todos los valores necesarios, tanto en la entrada como en la salida, lo siguiente será hacer el balance de potencias. El fundamento teórico de este balance de potencias ya se explicó en el apartado “5.5 Balance de energía en cada equipo” por lo que aquí, sólo se abordará el método de cálculo en Excel.

A la hora de calcular estos balances de potencia, pueden aparecer dos casos:



- El equipo aporta energía al aire: compresores y prepurificadores.

En este caso la potencia se pondrá como potencia aportada para que se muestre con signo positivo y se calculará como:

$$Pot_{aportada} = Pot_{salida} - Pot_{entrada} \quad (\text{ec. 9.15})$$

- El equipo quita energía al aire: intercambiadores de calor y filtros.

En este caso la potencia se pondrá como potencia disipada para que aparezca con signo positivo y se calculará como:

$$Pot_{disipada} = Pot_{entrada} - Pot_{salida} \quad (\text{ec. 9.16})$$

En la Figura 9.14 se puede ver la tabla generada en Excel con la potencia aportada al aire en el compresor BLAC 1. La función de Excel que la calcula es la siguiente (se multiplica por 0,001 para convertir sus unidades de vatios a kilovatios):

- Celda M2247: “=(H2255-C2255)*0,001”

	K	L	M	N	O
2245					
2246		Potencia aportada en el BLAC 1			
2247		Pot_BLAC1	4772,93	kW	
2248					

Figura 9.14. – Potencia aportada en el BLAC 1

Como se puede ver, al ser el BLAC 1 un equipo que aporta energía al aire se resta la potencia a la salida menos la potencia a la entrada. En cambio, para el intercambiador de calor IC1, el cual quita energía al aire (esta energía se va con el agua de refrigeración), la potencia disipada sería la diferencia de la potencia a la entrada menos la potencia a la salida (Figura 9.15).

	K	L	M	N	O
2260					
2261		Potencia disipada en el intercambiador			
2262		Pot_IC1	4248,16	kW	
2263					

Figura 9.15. – Potencia disipada en el intercambiador de calor IC 1

- Celda M2262: “=(C2270-H2270)*0,001”

En este apartado de la hoja de Excel, además de calcular los balances de potencia, se calculan los balances de materia al agua. Gracias a ello permite conocer cuál será el flujo másico de agua que se salga del sistema por los drenajes de cada uno de los intercambiadores de calor del lado de aire húmedo (IC1, IC2, IC3 y DCA) y en el bloque de los prepurificadores y el filtro de polvo (en realidad el agua se drena todo en los prepurificadores y al filtro de polvo ya llega aire seco). El fundamento teórico de estos



balances ya se ha visto en el apartado “5.3 Caudales de proceso”. Ahora la explicación se centrará sólo en el programa.

De esta manera en los equipos que poseen drenaje de agua cuentan con una tabla más en su espacio de análisis, la cual se muestra en la Figura 9.16, donde se muestra como ejemplo el caso del intercambiador de calor IC2. Este flujo másico de drenaje $\dot{y}_{dren_{IC2}}$ se calcula como la diferencia entre el flujo másico de agua a la entrada menos el que queda en la corriente de salida. Para el caso del intercambiador IC2, la fórmula en Excel sería la siguiente, donde las celdas C2299 y H2299 son los flujos másicos de agua a la entrada y a la salida del intercambiador IC2 respectivamente.

- Celda M2296: “=C2299-H2299”

	K	L	M	N	O
2294					
2295	Drenaje				
2296	y_dren_IC2		0,2010	kg agua / s	

Figura 9.16. – Drenaje de agua en el intercambiador de calor IC 2

Tanto la estructura de las tablas para los equipos del lado de aire seco como su procedimiento de cálculo se mantiene igual a como eran en lo de aire húmedo. La única diferencia es que estos últimos no representan las variables referentes a la humedad (w_i y HR_i) por ser éstas nulas y respecto a los flujos másicos sólo se representa el total \dot{m}_i , ya que al ser nulo el flujo másico de agua, el total será igual al de aire seco. En la Figura 9.17 se puede ver como ejemplo el caso del compresor BAC 1. Además en la Figura 9.18 se pueden ver ampliadas las tablas de los valores en la entrada y la salida del mismo.

BAC 1								
Entrada			Salida			Potencia aportada en el BAC 1		
P_12	1088646,3	Pa	P_13	1482716,9	Pa	Pot_BAC1	448,88	kw
T_12	9,65	°C	T_13	42,25	°C			
h_12	279781,5	J / kg	h_13	312048,8	J / kg			
m_12	13,9113	kg/s	m_13	13,9113	kg/s			
Pot_12	3892112	W	Pot_13	4340991	W			

Figura 9.17. – Vista del BAC 1 en el apartado de cálculo de caudales y potencias en el programa

Entrada			Salida		
P_12	1088646,3	Pa	P_13	1482716,9	Pa
T_12	9,65	°C	T_13	42,25	°C
h_12	279781,5	J / kg	h_13	312048,8	J / kg
m_12	13,9113	kg/s	m_13	13,9113	kg/s
Pot_12	3892112	W	Pot_13	4340991	W

Figura 9.18. Vista ampliada de las condiciones de entrada y salida del BAC 1



9.4.5.- Cálculo de las condiciones del aire en la entrada y la salida del sistema

Para terminar el apartado de cálculos, se obtendrán las condiciones del aire tanto a la entrada como a la salida del sistema de compresión y prepurificación. Pese a su sencillez, esta parte de la hoja es de vital importancia, ya que es la que permite hacer los balances globales del proceso, los cuales entre otras cosas otorgan una aproximación del grado de error que se está teniendo en el estudio realizado.

9.4.5.1.- Condiciones en base húmeda

Aunque realmente sólo la entrada al sistema es aire húmedo, habrá que calcular también la salida en base húmeda (con humedad relativa del 0%). Esto se debe a la necesidad de tener ambos lados del sistema con la misma base de cálculo para poder restar sus potencias.

Así, se empezará por las condiciones de la corriente de aire de entrada, es decir, la del punto 0. Como este punto ya fue calculado anteriormente en el apartado de la hoja de Excel “Cálculo de las condiciones del aire húmedo” y sus flujos másicos en el apartado “Cálculo de caudales y potencias en los equipos”, simplemente habrá que relacionar estas casillas a las celdas correspondientes donde se encuentran los valores buscados. Una vez se tengan todos los valores, la potencia de la corriente de aire de entrada al sistema será al siguiente.

$$Pot_{aire\ entrada} = \dot{x}_0 * h_0 \quad (\text{ec. 9.17})$$

En Excel, se calcularía con las siguientes fórmulas, primero en watios y luego en kilowatios.

- Celda H2442: “=C2451*C2448”
- Celda H2443: “=H2442/1000”

A continuación se puede apreciar cómo sería el aspecto de las tablas que genera el programa para las condiciones del aire de entrada al sistema (Figura 9.19).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
2440											
2441		Condiciones del aire de entrada al sistema					Potencia que entra al sistema en la corriente de aire				
2442		P_amb	101325,0	Pa		Pot_entrada	2185942	W			
2443		T_amb	15,38	°C		Pot_entrada	2185,9	kW			
2444		T_amb [K]	288,53	K							
2445		HR_amb	0,824	tanto por uno							
2446		P_w,sat_amb	1745,63	Pa							
2447		w_amb	0,00896	kg agua / kg aire seco							
2448		h_0	39370,0	J / kg aire seco							
2449		s_0	5750,9	J / (K * kg aire seco)							
2450		m_0	56,0204	kg/s							
2451		x_0	55,5230	kg aire seco / s							
2452		y_0	0,4974	kg agua / s							

Figura 9.19. – Condiciones del aire de entrada al sistema

Con las condiciones del aire de salida del sistema no ocurre lo mismo, ya que la entalpía de éstas todavía no está calculada, debido a que estos puntos fueron calculados en base seca por situarse en esa parte del proceso.

A continuación se puede ver cómo quedarían todas las propiedades de una de las salidas del sistema, concretamente la de alta presión. La mayoría de los valores de las condiciones del aire (tabla de la izquierda en la Figura 9.20) ya están calculadas (presión, temperaturas y flujos másicos) por lo que simplemente se referenciarán estas casillas a la celda con el valor correspondiente, al igual que se hizo para la entrada de aire. Además aparecen dos casillas para los valores de la humedad, ya que ahora hay que calcular la entalpía en base húmeda. No obstante estos dos valores serán nulos, es decir, las celdas C2460 y C2461 siempre serán iguales a cero.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
2455											
2456		Condiciones del aire de la salida del sistema a alta presión					Potencia que sale del sistema en la corriente de aire a alta presión				
2457		P_16	1970825,7	Pa		Pot_salidaAP	362445	W			
2458		T_16	25,89	°C		Pot_salidaAP	362,4	kW			
2459		T_16 [K]	299,04	K							
2460		HR_16	0,000	tanto por uno							
2461		w_16	0,000	kg agua / kg aire seco							
2462		h_16	26054,1	J / kg aire seco							
2463		m_16	13,9113	kg/s							
2464		x_16	13,9113	kg aire seco / s							
2465		y_16	0,0000	kg agua / s							

Figura 9.20. – Condiciones del aire de la salida de alta presión del sistema

Dado que la entalpía calculada en el apartado de la hoja Excel “Cálculo de las propiedades del aire seco” estaba en base seca y no se puede comparar con la de la entrada, habrá que calcular ésta nuevamente pero con base húmeda. Para ello se vuelve a interpolar, con las condiciones de punto 16 que se muestran en la Figura 9.20. Cabe recordar que se quiere obtener la entalpía en base húmeda, por lo que habrá que interpolar en la tabla “Entalpía_AHum_HR0”.



En la Figura 9.21 se puede ver la interpolación realizada por el programa para calcular la entalpía de la salida de aire a alta presión en base húmeda. Como se puede apreciar este punto posee una presión en torno a los 20 barA. Esta es la razón por la que la tabla de entalpía del aire húmedo para una humedad relativa del 0% (“Entalpía_AHum_HR0”) posee un rango mayor de presiones que para el resto de valores de la humedad. No obstante al ser siempre aire seco, esto sólo es necesario en esta tabla y no en las que tienen un porcentaje de humedad relativa mayor que cero.

Interpolación para obtener la entalpía		
Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido		
HR_inf = 0,0		
	1950000	2000000
20	20130,0	20130,0
30	30196,0	30196,0
HR_sup = 0,0		
	1950000	2000000
20	20130,0	20130,0
30	30196,0	30196,0
Interpolación por temperatura		
HR_inf =	0,0	
P_inf =	1950000,0	
T =	25,9	h = 26054,1
HR_inf =	0,0	
P_sup =	2000000,0	
T =	25,9	h = 26054,1
HR_sup =	0,0	
P_inf =	1950000,0	
T =	25,9	h = 26054,1
HR_sup =	0,0	
P_sup =	2000000,0	
T =	25,9	h = 26054,1
Interpolación por presión		
HR_inf =	0,0	
P =	1970825,7	
T =	25,9	h = 26054,1
HR_sup =	0,0	
P =	1970825,7	
T =	25,9	h = 26054,1
Interpolación por humedad relativa		
HR =	0,000	
P =	1970825,7	
T =	25,9	h = 26054,1

Figura 9.21. – Interpolación de la entalpía en base húmeda de la salida de aire a alta presión

Por último, al igual que para la corriente de entrada, con el producto del flujo másico de aire que pasa por ese punto y la entalpía del mismo se obtiene la potencia de la corriente de aire en la salida de alta presión.

$$Pot_{aire salidaAP} = \dot{x}_{16} * h_{16} \tag{ec. 9.18}$$

Con el mismo procedimiento que para la salida de alta presión, se calcula la salida de baja presión, la cual está representada por las condiciones del aire en el punto 17 del proceso. Así la potencia en la salida de baja presión será la siguiente.

$$Pot_{aire salidaBP} = \dot{x}_{17} * h_{17} \tag{ec. 9.19}$$

9.4.5.2.- Condiciones en base seca

Por último se representan estas mismas condiciones de salida en base seca (Figura 9.22) ya que se utilizarán en algunos de los indicadores del funcionamiento del sistema que se mostrarán más adelante. No obstante, las propiedades de estos puntos ya estaban



calculadas en base seca, por lo que simplemente habrá que referenciarlas a la celda correspondiente de la hoja.

Condiciones en base seca				
Condiciones del aire de la salida del sistema a alta presión			Potencia que sale del sistema en la corriente de aire a alta presión	
P_16	1970825,7	Pa	Pot_salidaAP	4087698 W
T_16	25,89	°C	Pot_salidaAP	4087,7 kW
T_16 [K]	299,04	K		
h_16	293841,1	J / kg		
m_16	13,9113	kg/s		
Condiciones del aire de salida del desvío de aire a baja presión			Potencia que sale del sistema en el desvío de aire a baja presión	
P_17	1107039,3	Pa	Pot_salidaBP	11639767 W
T_17	9,65	°C	Pot_salidaBP	11639,8 kW
T_17 [K]	282,80	K		
h_17	279723,0	J / kg		
m_17	41,6118	kg/s		

Figura 9.22. – Condiciones de salida del aire en base seca



10.- REPRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Todos los cálculos realizados por el programa no tendrían ningún sentido si no se mostrasen de una forma clara y útil. Por esta razón se aglutinaron todos los resultados del estudio en la primera parte de las hojas de “Estado de funcionamiento”, justo a continuación del encabezado. De esta forma, cualquier usuario con unas ciertas nociones de ingeniería puede ver el funcionamiento del sistema estudiado de un simple vistazo, sin necesidad de rebuscar entre todas las casillas de los múltiples cálculos realizados.

Esta pantalla de resultados es igual para cada una de las hojas de “Estados de funcionamiento” y se encuentra estructurada de la siguiente forma.

- Análisis individual de cada uno de los equipos.
Muestran las condiciones de presión y temperatura del aire a la entrada y salida del mismo, así como diversas propiedades relacionadas con su funcionamiento que dependerán del tipo de equipo que sea (rendimiento isentrópico, relación de presiones, potencia aportada o disipada, incremento de temperatura, etc). Se muestran agrupados por tipos de equipos:
 - Etapas de compresión del BLAC: incluye BLAC 1, BLAC 2, BLAC 3 y BLAC 4.
 - Etapas de compresión del BAC: incluye BAC 1 y BAC 2.
 - Intercambiadores de calor: incluye IC1, IC2, IC3, DCA, IC4 y el aftercooler del BAC.
 - Otros elementos: incluye el filtro de aspiración del BLAC, los prepurificadores, el filtro de polvo y el filtro de aspiración del BAC.
- Indicadores del funcionamiento del sistema de compresión.
Muestran cómo está siendo el funcionamiento global del sistema de compresión y purificación de aire, por ejemplo, con la evolución de la presión y la temperatura a lo largo del mismo, el reparto de la potencia consumida por el motor eléctrico que alimenta al sistema entre los diferentes equipos, el rendimiento global de todos los compresores o la relación entre la potencia del aire a la entrada y a la salida del sistema.
- Balance global del sistema de compresión.
Muestran las potencias aportadas o disipadas en cada uno de los equipos, así como la del aire en cada punto del proceso, permitiendo hacer un balance global al mismo lo que indique el grado de error del programa.



Este capítulo de la memoria no se detendrá en explicar el procedimiento de cálculo en Excel, ya que en la mayoría de los casos simplemente se trata de copiar celdas calculadas anteriormente en el apartado de “Cálculos” de la hoja o aplicar alguna ecuación sencilla de las explicadas en el apartado del análisis teórico de esta memoria, como el rendimiento isentrópico o la relación de presiones de un compresor. Excepcionalmente, se explicarán cuando la celda contenga alguna función de Excel que no sea un simple operador matemático (sumas, restas, multiplicaciones, etc) como por ejemplo una función “SI”.

10.1.- Análisis individual de cada uno de los equipos

10.1.1.- Etapas de compresión del BLAC

En esta parte se muestran los resultados del análisis individualizado del funcionamiento de cada uno de los compresores que componen las cuatro etapas de compresión del BLAC. En la Figura 10.1 se puede apreciar cómo sería la visualización de los resultados del BLAC.

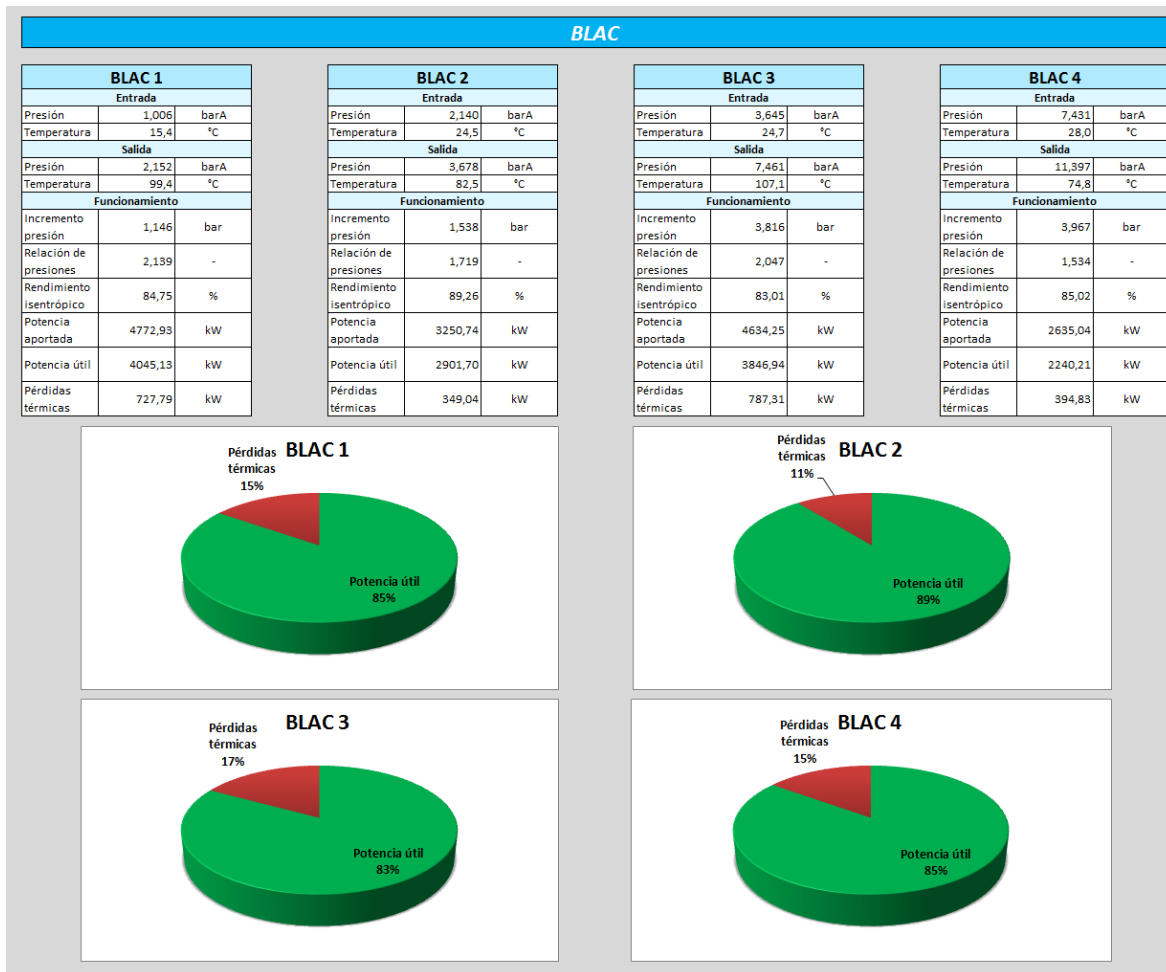


Figura 10.1. – Resultados del BLAC mostrados por el programa

A continuación se recoge en la Tabla 10.1 una ampliación de la tabla generada por el programa con los resultados del BLAC 1, ya que en la imagen no se aprecian con claridad sus valores.

La primera parte de la tabla es común a todos los equipos del sistema y recoge las condiciones de presión y temperatura del aire, tanto a la entrada del equipo como a la salida. A continuación aparece la parte de funcionamiento del equipo, la cual será específica del equipo y recogerá unas variables u otras en función del tipo de máquina que se trate. Debido a que en este caso se trata de un compresor se recogerá el incremento de presión entre la entrada y la salida, la relación de presiones, el rendimiento isentrópico del mismo, la potencia aportada al fluido (suma de la útil y no aprovechable), la potencia útil y las pérdidas térmicas.



BLAC 1		
Entrada		
Presión	1,006	barA
Temperatura	15,4	°C
Salida		
Presión	2,152	barA
Temperatura	99,4	°C
Funcionamiento		
Incremento presión	1,146	bar
Relación de presiones	2,139	-
Rendimiento isentrópico	84,75	%
Potencia aportada	4772,93	kW
Potencia útil	4045,13	kW
Pérdidas térmicas	727,79	kW

Tabla 10.1. - Resultados del BLAC 1 generados por el programa

Asimismo, dada la importancia que tiene para la empresa conocer el rendimiento de cada uno de los compresores se representa el mismo en forma de diagrama circular a partir de la potencia útil y las pérdidas térmicas. En la Figura 10.2 se puede ver el gráfico correspondiente a los datos del BLAC 1 recogidos en la tabla anterior.

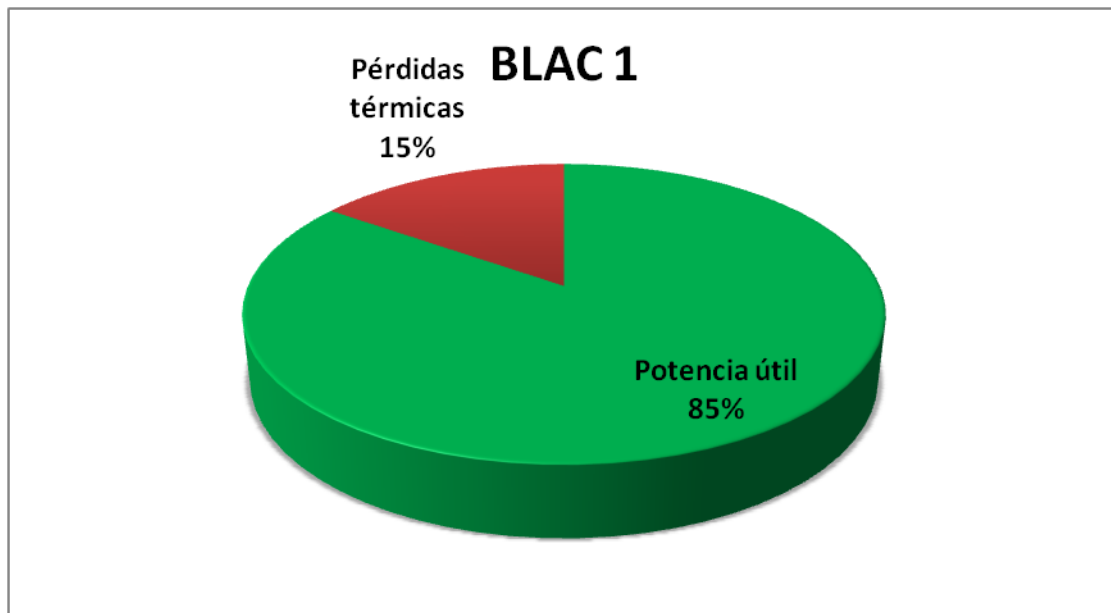


Figura 10.2. – Gráfico del rendimiento isentrópico del BLAC 1 mostrado por el programa

Analizando los resultados de las cuatro etapas del BLAC, se puede corroborar lo esperado. El fluido de trabajo, en este caso aire húmedo, sufre un incremento de su presión causada por el aporte de energía por parte del compresor en forma de potencia útil. No obstante, este mismo fluido sufre un notable incremento de su temperatura (desde 15,4 °C a 99,4 °C), lo cual no es deseable, ya que representa una parte de la energía aportada por el compresor que no se aprovechó en incrementar la presión del fluido como se buscaba. Esta energía desaprovechada en calentar el fluido es lo que se conoce como pérdidas térmicas.

Relacionando estos conceptos aparece el rendimiento isentrópico de la máquina, el cual muestra el grado de aprovechamiento de la energía transferida al fluido. Así, un compresor ideal, sería aquel que toda la energía que aportase al fluido fuese empleada en aumentar su presión, sin aumentar su temperatura más de lo necesario (al aumentar la presión y mantener constante la entropía, la temperatura aumentaría ligeramente). No obstante, es imposible tener máquinas ideales, por lo que hay que conformarse con que posean un rendimiento isentrópico lo mayor posible. Para los compresores de tipo centrífugo como estos, el rendimiento suele estar en torno al 80-85%. Teniendo en cuenta esto, se puede apreciar como los cuatro compresores del BLAC se encuentran dentro del rendimiento habitual de funcionamiento de estas máquinas con valores de 85, 89, 83 y 85% respectivamente para las cuatro etapas. Incluso se puede ver cómo el BLAC 2 se encuentra cerca del 90%, lo cual es una señal de su buen nivel de funcionamiento.

Respecto a estos rendimientos isentrópicos se puede apreciar una segunda característica resaltable y es la diferente tendencia entre los compresores de las etapas impares (BLAC 1 y BLAC 3) y los de las etapas pares (BLAC 2 y BLAC 4). Aunque no ocurre de manera continua, la tendencia suele marcar un rendimiento ligeramente superior en las etapas pares que en las impares. Analizando detenidamente el sistema y estudiando



la documentación del equipo, se llegó a la conclusión de que no se debía a ningún problema de alguno de los compresores. Esta diferencia probablemente se deba a que en la entrada de las etapas impares es donde se encuentran los álabes móviles que regulan el flujo de aire a través del compresor, los cuales probablemente entorpecerán el desarrollo del flujo, provocando esta ligera caída de rendimiento respecto a las etapas pares.

10.1.2.- Etapas de compresión del BAC

Como se puede apreciar en la Figura 10.3, el apartado de la hoja donde se muestran los resultados del análisis individualizado de los compresores del BAC sigue la misma estructura que los del BLAC explicados anteriormente. La única diferencia es que estos compresores sólo cuentan con dos etapas, en lugar de las cuatro que posee el BLAC.

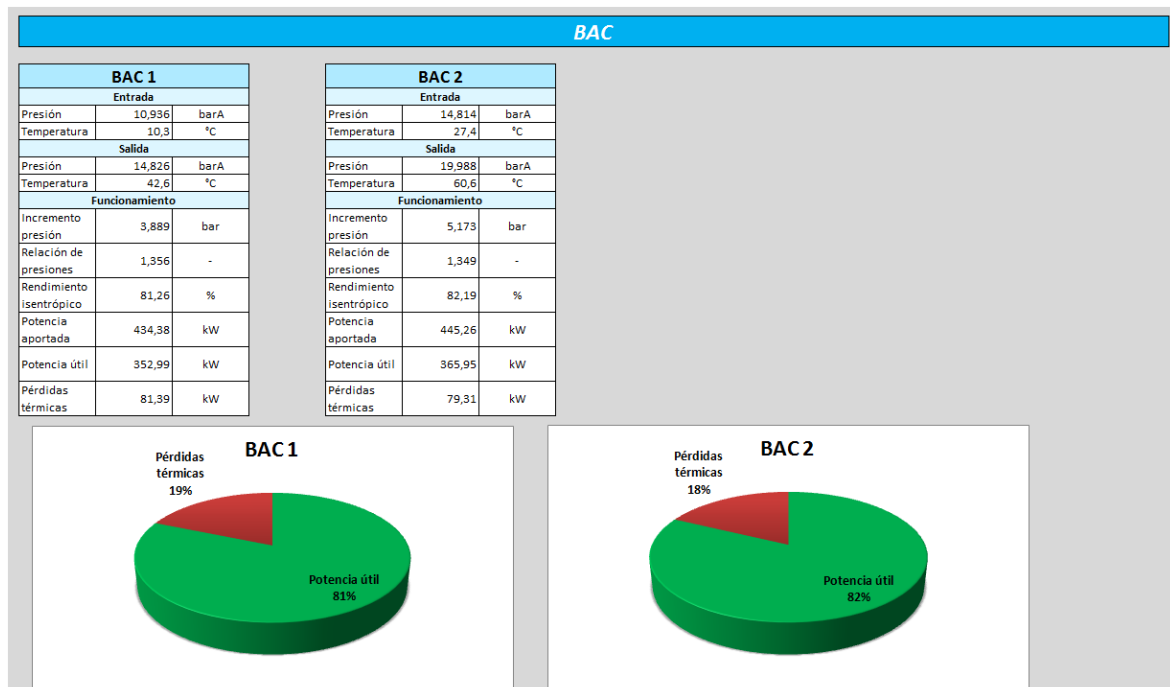


Figura 10.3. – Resultados de las etapas de compresión del BAC

En la Tabla 10.2 se pueden ver ampliados los resultados obtenidos para la primera etapa del BAC.



BAC 1		
Entrada		
Presión	10,936	barA
Temperatura	10,3	°C
Salida		
Presión	14,826	barA
Temperatura	42,6	°C
Funcionamiento		
Incremento presión	3,889	bar
Relación de presiones	1,356	-
Rendimiento isentrópico	81,26	%
Potencia aportada	434,38	kW
Potencia útil	352,99	kW
Pérdidas térmicas	81,39	kW

Tabla 10.2. - Resultados del BAC 1 mostrados por el programa

Como se puede apreciar estos dos compresores siguen un funcionamiento muy similar a los del BLAC, excepto por una presión de trabajo mayor. No obstante, la relación de presiones es bastante similar aunque ligeramente menor para el BAC, siendo en torno a 1,7-2 para los compresores del BLAC y en torno a 1,3 para los del BAC. Sus rendimientos isentrópicos también se encuentran en torno al 80-85%. Sin embargo el fenómeno comentado anteriormente acerca del mayor rendimiento en los compresores de etapas pares, aunque suele ser mayor el de la segunda etapa suelen encontrarse próximos, siendo incluso el primero mayor en algunas ocasiones.

Quizá el dato que más llame la atención de todos los representados, son los referentes a las potencias, tanto la útil como las pérdidas. Mientras que en los compresores del BLAC la potencia aportada total (suma de la útil más las pérdidas térmicas) en cada compresor iba desde 2500 kW a 4500 kW, en los compresores del BAC se reduce casi a una décima parte situándose en torno a 400 kW. La explicación de esta disminución de la potencia se debe principalmente a dos factores. El primero y más evidente es la disminución del flujo másico de aire que atraviesa el equipo respecto al que lo hacía en el BLAC, dado que un parte considerable de ese flujo se desvía después del filtro de polvo hacia el PHX como aire a baja presión, por lo que no pasa por el BAC. La segunda razón, aunque quizás no tan evidente, es igual de importante que la anterior y está relacionada con la cantidad de vapor de agua que lleva el aire. Hay que tener en cuenta que el BLAC se encuentra en la zona del



proceso de aire húmedo, siendo además importante su nivel de humedad que en muchos casos alcanza la saturación (HR 100%) a la entrada de los compresores. Este vapor de agua dificulta mucho la compresión ya que es necesaria una cantidad de energía mucho mayor para comprimir un kilogramo de agua que uno de aire. De esta forma, los compresores del BAC que se encuentran en la zona de aire seco necesitan una menor potencia para comprimir el aire.

10.1.3.- Intercambiadores de calor

En este apartado se recogen los resultados del análisis individualizado de todos los intercambiadores de calor del sistema de compresión y purificación de aire, incluyendo tanto los intercambiadores entre las etapas de compresión como los postenfriadores. En la Figura 10.4 se puede apreciar cómo sería una visión general de los resultados mostrados en este apartado de la hoja.

Intercambiadores de calor							
IC 1		IC 2		IC 3		DCA	
Entrada		Entrada		Entrada		Entrada	
Presión	2,144 barA	Presión	3,680 barA	Presión	7,412 barA	Presión	11,394 barA
Temperatura	97,9 °C	Temperatura	84,0 °C	Temperatura	107,8 °C	Temperatura	75,7 °C
Salida		Salida		Salida		Salida	
Presión	2,131 barA	Presión	3,651 barA	Presión	7,384 barA	Presión	11,293 barA
Temperatura	25,5 °C	Temperatura	25,4 °C	Temperatura	28,2 °C	Temperatura	7,0 °C
Funcionamiento		Funcionamiento		Funcionamiento		Funcionamiento	
Incremento temperatura	-72,4 °C	Incremento temperatura	-58,6 °C	Incremento temperatura	-79,6 °C	Incremento temperatura	-68,7 °C
Pérdida de presión	0,013 bar	Pérdida de presión	0,029 bar	Pérdida de presión	0,029 bar	Pérdida de presión	0,102 bar
Potencia disipada	4039,11 kW	Potencia disipada	3776,77 kW	Potencia disipada	4667,81 kW	Potencia disipada	4101,74 kW
Drenaje	0,021 kg agua / s	Drenaje	0,220 kg agua / s	Drenaje	0,125 kg agua / s	Drenaje	0,144 kg agua / s
IC 4		Aftercooler del BAC					
Entrada		Entrada					
Presión	14,826 barA	Presión	19,988 barA				
Temperatura	42,6 °C	Temperatura	60,6 °C				
Salida		Salida					
Presión	14,814 barA	Presión	19,938 barA				
Temperatura	27,4 °C	Temperatura	26,3 °C				
Funcionamiento		Funcionamiento					
Incremento temperatura	-15,3 °C	Incremento temperatura	-34,3 °C				
Pérdida de presión	0,012 bar	Pérdida de presión	0,050 bar				
Potencia disipada	212,47 kW	Potencia disipada	480,53 kW				

Figura 10.4. – Visión general de los resultados de los intercambiadores de calor

Para empezar, se pueden ver en la Tabla 10.3 los resultados del intercambiador IC 1, el cual se encuentra situado entre la primera y la segunda etapa de compresión del BLAC (BLAC 1 y BLAC 2). Cabe recordar que estos valores que se muestran son los del lado de aire del intercambiador, ya que el lado del agua de refrigeración no se ha podido incluir en el estudio por falta de sensores en el mismo. Así, se muestran las condiciones de presión y temperatura de entrada y salida del aire y unas variables de funcionamiento del intercambiador. Dentro de ellas aparece la variación de temperatura del aire, que sale negativa ya que el aire disminuye su temperatura a su paso por el intercambiador, la pérdida de presión que ocurre en el mismo, la potencia disipada y, en el caso de los que se encuentran en la zona de aire húmedo, el caudal másico del drenaje.



IC 1		
Entrada		
Presión	2,144	barA
Temperatura	97,9	°C
Salida		
Presión	2,131	barA
Temperatura	25,5	°C
Funcionamiento		
Variación temperatura	-72,4	°C
Pérdida de presión	0,013	bar
Potencia disipada	4039,11	kW
Drenaje	0,021	kg agua / s

Tabla 10.3. – Resultados del intercambiador IC 1

Aunque todas estas variables ya fueron definidas en el apartado del análisis teórico, hay una que puede resultar llamativa viendo los resultados y es la potencia disipada. Se puede apreciar cómo la corriente de aire pierde una gran cantidad de potencia a su paso por los intercambiadores, cercana a la ganada en la etapa anterior de compresión. Incluso en los intercambiadores de aire húmedo se alcanzan valores de 4000 kW de potencia disipada.

No obstante, esto se debe a que dentro de esa potencia disipada se tiene en cuenta toda la potencia que pierde la corriente de aire que circula por el sistema. Por tanto en el lado de aire húmedo dentro de la misma, además de la causada por la pérdida de entalpía del aire por su disminución de temperatura y que se va con el agua de refrigeración que se calienta, también está incluida la energía que se sale del sistema con el agua de drenaje, lo cual supone una disminución importante en la potencia de la corriente aire.

En cambio, en los intercambiadores de aire seco como el IC 4 que se puede ver en la Tabla 10.4 no se produce esa pérdida de potencia tan acusada gracias sobre todo a la ausencia de una salida de agua de drenaje.



IC 4		
Entrada		
Presión	14,826	barA
Temperatura	42,6	°C
Salida		
Presión	14,814	barA
Temperatura	27,4	°C
Funcionamiento		
Variación temperatura	-15,3	°C
Pérdida de presión	0,012	bar
Potencia disipada	212,47	kW

Tabla 10.4. – Resultados del intercambiador IC 4

En cuanto a las caídas de presión en estos equipos, se puede ver cómo se encuentran dentro de unos valores aceptables, con valores entre 0,01 y 0,03 bar de pérdidas para los intercambiadores interetapas. En cambio, el DCA posee unas caídas de presión mayores, con valores en torno a 0,10-0,15 bar. No obstante, cabe recordar que éste es un intercambiador de contacto directo, donde la corriente de aire choca primero con una corriente de agua a contracorriente procedente de la torre de refrigeración y luego con otra procedente del EVC, por lo que era esperable esta caída de presión mucho mayor que en los intercambiadores de carcasa y tubos.

Volviendo a los intercambiadores de aire húmedo, mencionar que los máximos valores de drenajes se producen en los de las últimas etapas y en el DCA, mientras que en el intercambiador IC 1 no sale agua por el drenaje en multitud de ocasiones.

Por último puede resultar llamativa la gran diferencia que se da en cuanto a la variación de temperatura. En el IC 1 disminuye 72,4 °C, mientras que en el IC 4 sólo lo hace 15,3 °C. A primera vista podría parecer que el intercambiador IC 4 tiene algún problema el cual le está entorpeciendo su funcionamiento. No obstante, para esto se diseñó la herramienta con un histórico de valores del último trimestre, con el objetivo de poder comparar los valores actuales respecto a periodos anteriores y así ver si se estaba produciendo un problema o era su funcionamiento habitual.

En este caso, viendo el histórico se comprueba cómo ambos valores se encuentran aproximadamente en su media del trimestre, lo cual indica que están trabajando correctamente. Analizando detenidamente el sistema, se observa cuál es la causa de esa diferencia notoria en la variación de la temperatura dependiendo del intercambiador. Ello se debe a la temperatura del aire que entra al intercambiador. La salida siempre estará en valores ligeramente por encima de la temperatura ambiental, ya que el agua de refrigeración se enfría en una torre de refrigeración con aire ambiente, pero obviamente



ningún proceso de intercambio de calor entre fluidos tiene una eficiencia del 100%, por lo que no llega a alcanzar la temperatura ambiente y se queda un poco por encima (25-30 °C aproximadamente). De esta forma, el aire que entra al intercambiador IC 1, el cual procede del BLAC 1, está cercano a los 100 °C, mientras que el aire que entra al intercambiador IC 4, el cual procede del BAC 1, está en torno a 40 °C, por lo que con una disminución de temperatura mucho menor ya alcanza los 27,4 °C que tiene en su salida.

El único intercambiador que posee una temperatura de salida del aire en un rango diferente es el DCA. Esto se debe a que en él se intercambia calor con una corriente de nitrógeno, la cual está a una temperatura mucho menor de la del agua de refrigeración, por lo que el aire de salida del DCA está en torno a 5 °C.

10.1.4.- Otros elementos

En esta parte de la hoja se muestran los resultados del análisis individualizado del funcionamiento del resto de los equipos que componen el sistema de compresión y purificación de aire. En la Figura 10.5 se puede apreciar cómo sería la visualización de estos resultados.

Otros elementos			
Filtro de aspiración del BLAC			
Entrada			
Presión	1,013	barA	
Temperatura	14,2	°C	
Salida			
Presión	1,007	barA	
Temperatura	14,2	°C	
Funcionamiento			
Variación temperatura	0,0	°C	
Pérdida de presión	0,006	bar	
Potencia disipada	3,06	kW	
Filtro de aspiración del BAC			
Entrada			
Presión	11,083	barA	
Temperatura	10,3	°C	
Salida			
Presión	10,936	barA	
Temperatura	10,3	°C	
Funcionamiento			
Variación temperatura	0,0	°C	
Pérdida de presión	0,147	bar	
Potencia disipada	-0,63	kW	
Prepurificadores y Filtro de polvo			
Entrada			
Presión	11,293	barA	
Temperatura	7,0	°C	
Salida			
Presión	11,083	barA	
Temperatura	10,3	°C	
Funcionamiento			
Variación temperatura	3,3	°C	
Pérdida de presión	0,210	bar	
Potencia aportada	100,50	kW	
Prepurificador 1			
Este prepurificador está trabajando			
Salida			
Presión	11,175	barA	
Temperatura	9,4	°C	
Prepurificador 2			
Este prepurificador está regenerándose			
Salida			
Presión	1,124	barA	
Temperatura	15,5	°C	

Figura 10.5. – Visión general de los resultados del resto de elementos del sistema

A continuación se muestra la tabla generada por el programa para mostrar los resultados del filtro de aspiración del BLAC en la Tabla 10.5, ya que en la vista general no se aprecian con claridad.



Filtro de aspiración del BLAC		
Entrada		
Presión	1,013	barA
Temperatura	14,2	°C
Salida		
Presión	1,007	barA
Temperatura	14,2	°C
Funcionamiento		
Variación temperatura	0,0	°C
Pérdida de presión	0,006	bar
Potencia disipada	3,06	kW

Tabla 10.5. – Resultados del filtro de aspiración del BLAC

Como se puede ver, los resultados que se recogen son las presiones y temperaturas del aire tanto a la entrada como a la salida del equipo, su variación de temperatura, la pérdida de presión y la potencia disipada en el equipo.

Un dato significativo de ambos filtros es que se carece de un sensor de temperatura a la entrada y otro a la salida, por lo que en ambos filtros hubo que suponer que la temperatura era constante a través de ellos. De esta forma la variación de temperatura entre su entrada y su salida es nula, lo cual no será cierto en la realidad, pero si estará muy aproximado, ya que probablemente esta variación sea tan sólo de unas pocas décimas.

No obstante, debido a las mínimas potencias que se disipan en estos equipos, esta aproximación de la temperatura provoca problemas ocasionales en el filtro de aspiración del BAC. Al caer su presión en la salida y no variar su temperatura, la potencia disipada por este equipo a veces sale negativa, es decir, como si el filtro aportase energía al fluido, lo cual no es posible (Tabla 10.6).



Filtro de aspiración del BAC		
Entrada		
Presión	11,083	barA
Temperatura	10,3	°C
Salida		
Presión	10,936	barA
Temperatura	10,3	°C
Funcionamiento		
Variación temperatura	0,0	°C
Pérdida de presión	0,147	bar
Potencia disipada	-0,63	kW

Tabla 10.6. - Resultados del filtro de aspiración del BAC

No obstante, no es un problema importante en el cálculo general del sistema ya que la potencia de ese filtro está siempre por debajo de 1 kW, lo cual es insignificante dentro de los 16000 kW aproximadamente que aportan los compresores (0,006%). Por el contrario, al ser mayor la potencia disipada en el filtro de aspiración del BLAC (en torno a 4 kW), este fenómeno no provoca valores negativos, aunque sí que se verá influenciado por él como ocurre con el otro filtro.

Asimismo, éste problema podría solucionarse fácilmente, sólo habría que instalar un sensor de temperatura a la entrada del filtro de aspiración del BLAC, es decir, de la temperatura ambiental y otro en la salida del filtro de aspiración del BAC.

A continuación se muestra el análisis del conjunto formado por los prepurificadores y el filtro de polvo. Cabe recordar que estos dos equipos se tienen que analizar juntos debido a la falta de sensores de caudal para cada uno de los prepurificadores, lo que impide hacer los correspondientes balances de energía para conocer las propiedades del aire entre ambos equipos cuando están trabajando los dos prepurificadores simultáneamente.

Como se puede ver en la Tabla 10.7, la variación de temperatura es positiva, es decir, la temperatura a la salida es mayor que la de la entrada. Esto se debe a que dentro de los prepurificadores se lleva a cabo una reacción exotérmica, la cual aporta energía al aire. Asimismo, se habla de potencia aportada en este equipo al igual que se hacía en los compresores, ya que el aire tiene mayor energía en la salida que en la entrada a causa de esta reacción exotérmica.



Prepurificadores y Filtro de polvo		
Entrada		
Presión	11,293	barA
Temperatura	7,0	°C
Salida		
Presión	11,083	barA
Temperatura	10,3	°C
Funcionamiento		
Variación temperatura	3,3	°C
Pérdida de presión	0,210	bar
Potencia aportada	100,50	kW

Tabla 10.7. – Resultados del conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo

Aunque no se han podido analizar detalladamente los prepurificadores de manera individual, se han programado unas tablas que muestran como resultados los valores de presión y temperatura en su salida. Hay que tener en cuenta que se habla de salida tomando como referencia el sentido de circulación del aire que circula a través del prepurificador desde el DCA hacia el filtro de polvo. Cuando el prepurificador esté regenerándose esta salida de referencia no será la salida real del fluido circulante por su interior, que en este caso será nitrógeno de desecho y que lo hará en sentido contrario al que llevaría el aire.

Con esto se ha programado la tabla de manera que muestre si ese prepurificador en concreto está trabajando, es decir, limpiando el aire que circula por su interior, o regenerándose con nitrógeno. De esta forma cuando la presión de salida del prepurificador sea aproximadamente la de salida del filtro de polvo, ese prepurificador estará trabajando. Se ha dejado un margen holgado de 1 bar entre ambas medidas, ya que en el filtro de polvo hay pérdidas de carga y para evitar errores del programa cuando ambos prepurificadores funcionen a la vez. Además, no hay posibilidad de que el programa pueda interpretar que el prepurificador está trabajando si realmente esta regenerándose, ya que al regenerarse tiene abierto el venteo para expulsar el nitrógeno, por lo que su presión será cercana a la atmosférica (aproximadamente 1 barA), mientras que trabajando estará varios bar por encima (11 barA aproximadamente).

Para ello se han programado ambas casillas con las siguientes fórmulas en Excel.

- Celda J135: “=SI(ABS(K137-G139)<=1;"Este prepurificador está trabajando";"Este prepurificador está regenerándose")”
- Celda N135: =SI(ABS(O137-G139)<=1;"Este prepurificador está trabajando";"Este prepurificador está regenerándose")



Donde las celdas J135 y N135 son las leyendas de los prepurificadores 1 y 2 respectivamente, la celda K137 es la presión de salida del prepurificador 1 (11,175 barA en la Tabla 10.8), la celda G139 es la presión de salida del filtro de polvo (11,083 barA en la Tabla 10.7) y O137 es la presión en la salida del prepurificador 2 (1,124 barA en la Tabla 10.9).

Prepurificador 1		
Este prepurificador está trabajando		
Salida		
Presión	11,175	barA
Temperatura	9,4	°C

Tabla 10.8. – Condiciones de salida del prepurificador 1

Prepurificador 2		
Este prepurificador está regenerándose		
Salida		
Presión	1,124	barA
Temperatura	15,5	°C

Tabla 10.9. - Condiciones de salida del prepurificador 2

Hay que tener en cuenta que ambos prepurificadores pueden estar trabajando simultáneamente dependiendo del ciclo en el que se encuentren como ya se explicó anteriormente. Por el contrario, nunca puede darse el caso de que ambos estén regenerándose a la vez, ya que al menos uno tiene que estar trabajando para limpiar el aire que entra a la planta y evitar que estropee la caja fría.

10.2.- Indicadores del funcionamiento del sistema de compresión

Esta parte de la pantalla de resultados del programa calcula una serie de indicadores globales del sistema de compresión y purificación de aire. Algunos de ellos aportan datos muy útiles para un momento concreto como puede ser el aprovechamiento de la potencia consumida por el motor del sistema o el rendimiento conjunto de las 6 etapas de compresión. No obstante, la mayoría de estos indicadores tienen poca aplicación si no se comparan a otro valor. En este sentido, tendrán una mayor aplicación cuando se pueda comparar un mismo indicador para varios instantes diferentes a lo largo de un periodo de tiempo concreto. Esto será lo que se haga en el histórico del trimestre, pero eso ya se hablará en el próximo capítulo.



Dentro de la pantalla de resultados que muestra el programa el usuario se podrá encontrar los siguientes indicadores:

- Evolución de la presión y la temperatura del aire a lo largo del proceso.
- Reparto de la potencia consumida por el motor eléctrico del sistema de compresión.
- Relación entre la potencia aportada al aire en los compresores y la consumida por el motor eléctrico (rendimiento electromecánico del sistema).
- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia del aire de entrada.
- Relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada y la consumida por el motor.
- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia consumida por el motor eléctrico.
- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia aportada al sistema en todos sus equipos.
- Relación entre la potencia aportada y pérdida en los equipos del sistema.
- Rendimiento isentrópico conjunto de los 6 compresores.

A continuación se explicará cada uno de ellos así como los valores que se obtuvieron de su cálculo.

10.2.1.- Evolución de la presión y la temperatura del aire a lo largo del proceso

En esta parte de la pantalla de resultados el programa genera dos elementos para que el usuario pueda ver cuál es la evolución tanto de la presión como de la temperatura del aire a lo largo del sistema de compresión y purificación de aire.

A la izquierda aparece una tabla (Tabla 10.10) donde se muestra cada uno de los puntos del proceso con la descripción del mismo, la presión en ese punto (medida en barA) y la temperatura de la corriente de aire en el mismo (medida en °C). Esta tabla le permitirá al usuario conocer con precisión, tanto la presión como la temperatura en un punto concreto del proceso. Además, gracias a contar con la descripción de cada punto, no es necesario conocer de memoria el sistema ni dónde se ubican esos puntos, ya que se puede buscar por la entrada o salida de un equipo en concreto.



Evolución de la presión y la temperatura del aire		
Punto del proceso	Presión [barA]	Temperatura [°C]
0. Condiciones ambientales	1,01	14,2
1. Salida del filtro de aspiración del BLAC y entrada al BLAC 1	1,01	14,2
2. Salida del BLAC 1 y entrada al intercambiador IC1	2,14	97,9
3. Salida del intercambiador IC1 y entrada al BLAC 2	2,13	25,5
4. Salida del BLAC 2 y entrada al intercambiador IC2	3,68	84,0
5. Salida del intercambiador IC2 y entrada al BLAC 3	3,65	25,4
6. Salida del BLAC 3 y entrada al intercambiador IC3	7,41	107,8
7. Salida del intercambiador IC3 y entrada al BLAC 4	7,38	28,2
8. Salida del BLAC 4 y entrada al DCA	11,39	75,7
9. Salida del DCA y entrada al conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo	11,29	7,0
10. Salida del conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo	11,08	10,3
11. Entrada al filtro de aspiración del BAC	11,08	10,3
12. Salida del filtro de aspiración del BAC y entrada al BAC 1	10,94	10,3
13. Salida del BAC 1 y entrada al intercambiador IC4	14,83	42,6
14. Salida del intercambiador IC4 y entrada al BAC 2	14,81	27,4
15. Salida del BAC 2 y entrada al aftercooler del BAC.	19,99	60,6
16. Salida del aftercooler del BAC	19,94	26,3

Tabla 10.10. - Evolución de la presión y la temperatura del aire a lo largo del proceso

Asimismo, el programa genera una gráfica para representar la evolución de ambas variables de una manera más visual para el usuario (Figura 10.6). En esta parte no se busca tanto la precisión a la hora de mirar un punto concreto, sino que está más enfocada a ver la evolución global de estas variables. Aún así cuenta con una pequeña tabla en eje inferior, la cual muestra un resumen de los datos recogidos en la Tabla 10.10.



Así por ejemplo, esta gráfica resulta muy útil para ver dónde aparecen los puntos máximos o mínimos de alguna variable, o si se producen grandes variaciones en algún punto. Por último, cabe resaltar que se ha dibujado con dos ejes independientes, uno para la presión (izquierda) y otro para la temperatura (derecha) con el fin de facilitar al usuario de la herramienta la visualización de ambas variables en una escala apropiada.

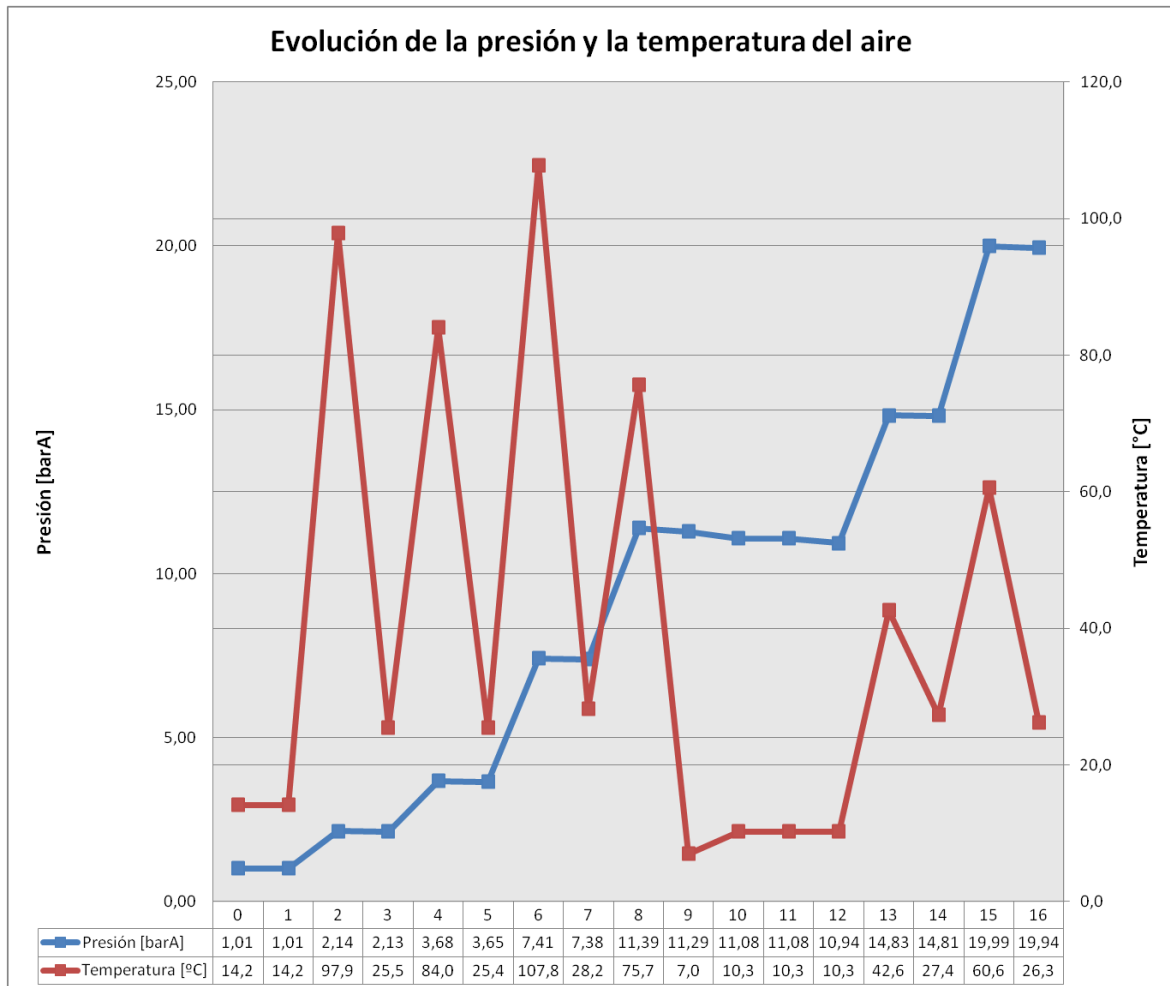


Figura 10.6. – Evolución de la presión (azul) y la temperatura (rojo) del aire a lo largo del proceso

En este caso se puede apreciar cómo la presión (línea azul) tiene grandes subidas en cada una de las etapas de compresión. A su vez la temperatura (línea roja) sigue una evolución cíclica alternando fuertes subidas a su paso por las etapas de compresión y fuertes bajadas al hacerlo por los intercambiadores de calor. Incluso a la salida del DCA se comprueba cómo esta temperatura disminuye por debajo de la ambiental, que es la de entrada al sistema. Esto se debe a que en la segunda etapa del DCA el líquido refrigerante es agua que viene del enfriador evaporativo donde intercambió calor con el nitrógeno procedente de la caja fría el cual se encuentra muy por debajo de la temperatura ambiental.



10.2.2.- Reparto de la potencia consumida por el motor eléctrico del sistema de compresión

Esta parte de la pantalla de resultados sirve para analizar cuál está siendo el reparto de la potencia que está consumiendo el motor eléctrico que alimenta al sistema de compresión.

Para empezar, el programa genera una tabla donde se muestran la potencia eléctrica consumida por el motor de la red eléctrica, las potencias útiles de cada una de las etapas de compresión y las pérdidas térmicas producidas en cada una de estas etapas (Tabla 10.11). Para la potencia eléctrica consumida por el motor se referenciará esa celda a la de lectura del sensor JT 500, mientras que las potencias útiles y las pérdidas térmicas de cada etapa de compresión serán las calculadas en la primera parte de la pantalla de resultados, concretamente en el análisis individualizado del BLAC y del BAC.

La última fila será la correspondiente a las pérdidas mecánicas y eléctricas del sistema, que engloban principalmente las pérdidas del rendimiento eléctrico del motor y las mecánicas debida a la fricción de las diferentes partes móviles, sobre todo del sistema de transmisión formado por varios engranajes. Para calcular esta celda simplemente es la diferencia entre la potencia consumida por el motor y el sumatorio de todas las potencias aportadas al fluido (suma de la potencias útil y perdidas térmicas) en cada una de las etapas de compresión.



Potencia útil y pérdidas en los compresores		
Potencia consumida por el motor eléctrico	16833,93	kW
Potencia útil del BLAC 1	3871,03	kW
Pérdidas térmicas del BLAC 1	734,51	kW
Potencia útil del BLAC 2	2825,72	kW
Pérdidas térmicas del BLAC 2	349,00	kW
Potencia útil del BLAC 3	3678,08	kW
Pérdidas térmicas del BLAC 3	798,85	kW
Potencia útil del BLAC 4	2194,87	kW
Pérdidas térmicas del BLAC 4	384,20	kW
Potencia útil del BAC 1	352,99	kW
Pérdidas térmicas del BAC 1	81,39	kW
Potencia útil del BAC 2	365,95	kW
Pérdidas térmicas del BAC 2	79,31	kW
Pérdidas eléctricas y mecánicas	1118,03	kW

Tabla 10.11. - Reparto de la potencia consumida por el motor eléctrico del sistema de compresión

Seguidamente el programa genera las tres gráficas que se recogen a continuación en base a los valores de esta tabla.

En la primera de estas gráficas el programa muestra un diagrama de sectores tridimensional donde se pueden ver qué porcentaje de la potencia consumida por el motor se va a cada parte, ordenando cada una de éstas en función de su posición en el proceso.

Gracias a este tipo de representación tan visual de los resultados, se puede apreciar rápidamente, sin necesidad de entrar en valores concretos, que las etapas de compresión del BLAC, es decir, las del lado de aire húmedo, son las que más potencia aportan al fluido, siendo aproximadamente un 85-90 % de la potencia consumida por el motor. No obstante estas etapas también son las que mayores pérdidas térmicas generan por lo que de este 85-90 % de la potencia total del motor que se aporta al aire en los compresores del BLAC, sólo el 70-75 % representan potencia útil, mientras que el 15% restante de la



potencia aportada en los compresores son pérdidas térmicas debidas al calentamiento indeseado del fluido.

Con las etapas de compresión del BAC ocurren los mismos fenómenos que para el BLAC pero a pequeña escala. Así la potencia aportada por el BAC al fluido se encuentra en torno al 5% de la total del motor, siendo un 4% de éstas potencia útil y un 1% pérdidas térmicas.

Aunque las potencias de estas etapas sean mucho menores que las del BLAC, se puede apreciar cómo ambas guardan la misma relación entre las pérdidas térmicas de una etapa y la potencia útil de dicha etapa, siendo de entre una cuarta y una quinta parte. Esto debe su explicación a que ambas variables se relacionan con el rendimiento isentrópico de cada compresor y en todas las etapas de este sistema de compresión los rendimientos isentrópicos están en torno al 80-85 %. Por tanto para una etapa donde se aportasen 100 kW con un rendimiento del 80%, significaría que habría 80 kW de potencia útil y 20 kW de pérdidas térmicas, por lo que la relación entre ambas sería 20/80, o lo que es lo mismo, 1/4

Asimismo en esta Figura 10.7 se puede ver la proporción de las pérdidas eléctricas y mecánicas del sistema, las cuales sin ser nulas tienen unos valores más que aceptables, encontrándose habitualmente entre el 4 y el 8 % de la potencia total consumida por el motor.

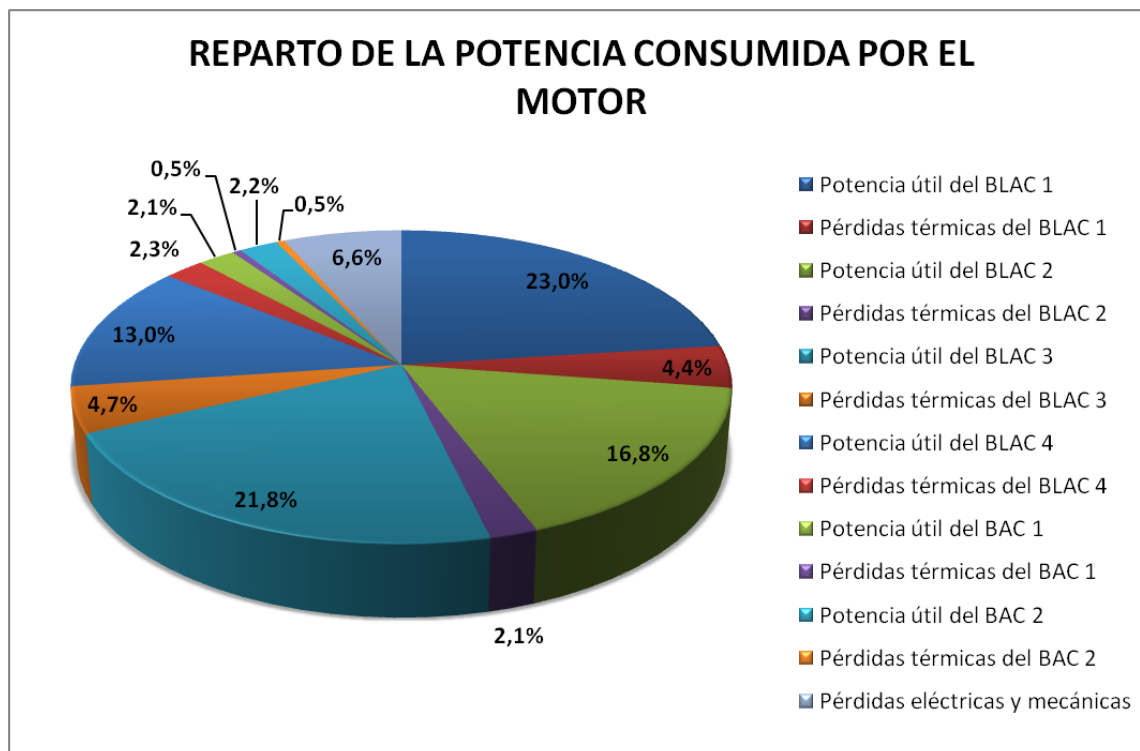


Figura 10.7. – Reparto de la potencia consumida por el motor



A continuación el programa genera una tabla (Tabla 10.12) con su correspondiente gráfica (Figura 10.8) donde aglutina por un lado todas las potencias útiles de las 6 etapas de compresión (las 4 del BLAC y las 2 del BAC) y por otro lado, todas las pérdidas (térmicas, mecánicas y eléctricas). Con esto se obtiene una eficiencia global del sistema de compresión y purificación de aire desde el punto de vista del consumo eléctrico que hace el motor. Como se puede comprobar en los resultados obtenidos, este rendimiento resulta notablemente bueno, aprovechándose en torno al 75-80% de la potencia consumida por el motor para transformarla en potencia útil.

Aprovechamiento de la potencia consumida por el motor eléctrico		
Potencia útil total en los compresores	13288,64	kW
Pérdidas totales (térmicas, mecánicas y eléctricas)	3545,30	kW
Rendimiento global del conjunto	78,94	%

Tabla 10.12. – Aprovechamiento de la potencia consumida por el motor eléctrico

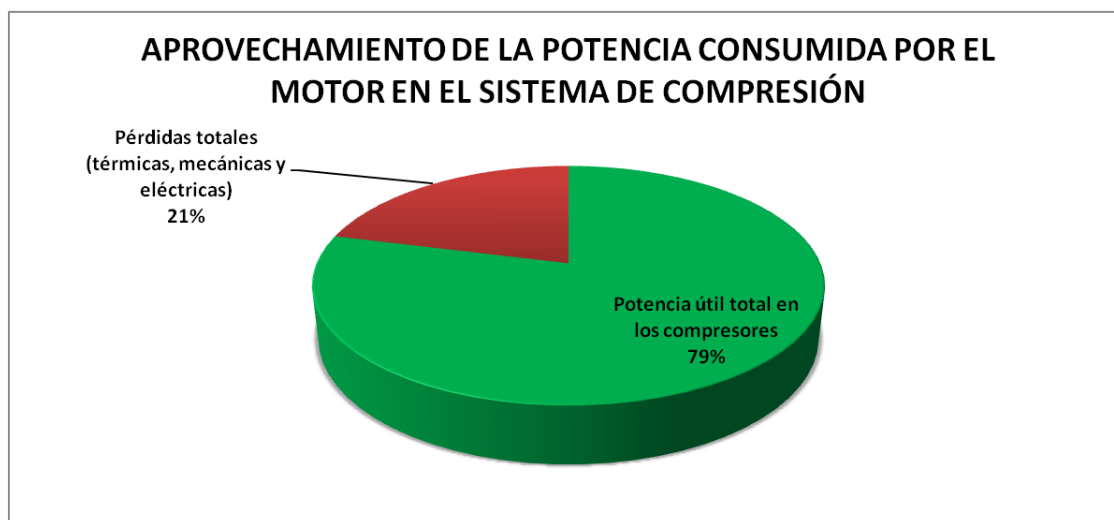


Figura 10.8. - Aprovechamiento de la potencia consumida por el motor eléctrico

Para concluir con el análisis del aprovechamiento de la potencia consumida por el motor, el programa muestra el diagrama de sectores recogido en la Figura 10.9. Éste aúna las ventajas de los dos anteriores, pudiendo ver por un lado todas las potencias útiles y por otro las pérdidas. Además, dado que las pérdidas tienen un porcentaje mucho menor que la potencia útil, como se puede comprobar en la Figura 10.7, éstas no se aprecian correctamente en una gráfica donde se encuentren a la misma escala que el resto de potencias. Así en esta gráfica se aglutinan todas las pérdidas en el diagrama de sectores principal para que queden en proporción a las potencias útiles. Mientras tanto se despliega una segunda parte de la gráfica a partir de los valores de estas pérdidas poniendo ya cada

una de manera independiente pero a una escala mayor a la que estaban en el diagrama principal.

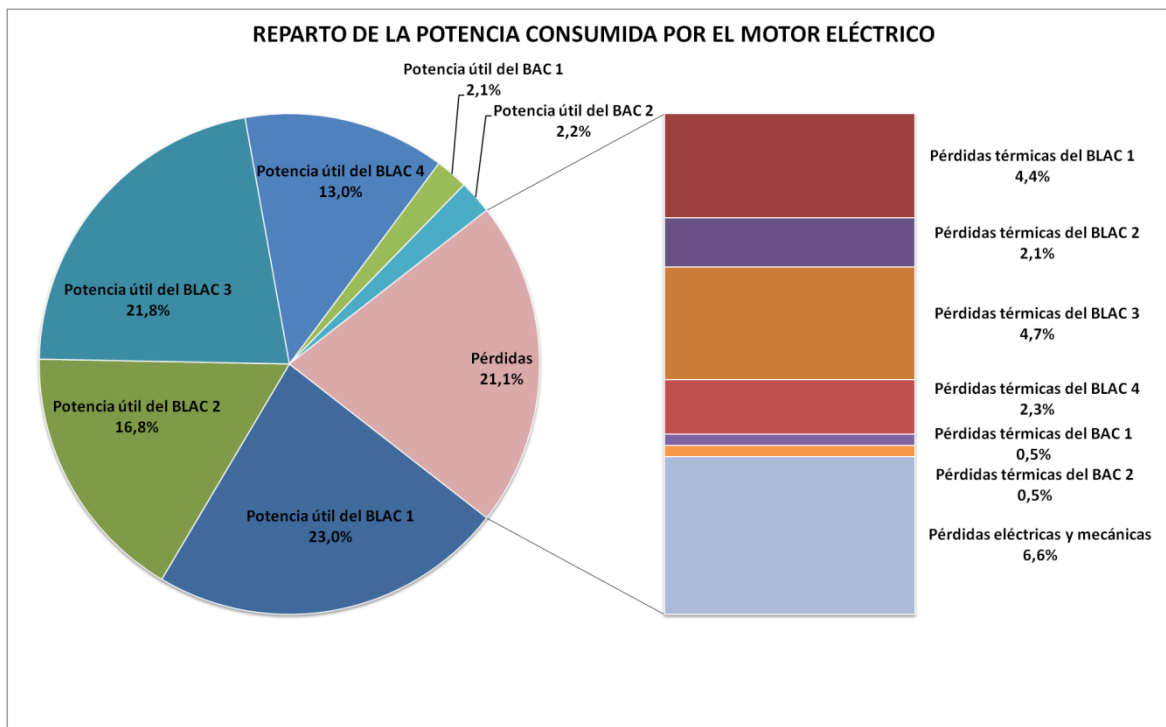


Figura 10.9. – Reparto de la potencia consumida por el motor agrupando todas las pérdidas

10.2.3.- Relación entre la potencia aportada al aire en los compresores y la consumida por el motor eléctrico (rendimiento electromecánico del sistema)

Esta relación calcula el rendimiento electromecánico del sistema de compresión de aire. Este rendimiento viene a ser lo contrario a las pérdidas mecánicas y eléctricas del apartado anterior.

De este modo, por un lado se suman las potencias aportadas al fluido por todas las etapas de compresión, mientras que por el otro se encuentran las pérdidas mecánicas y eléctricas del sistema (Tabla 10.13). Así dividiendo la potencia total aportada en los compresores entre la potencia consumida por el motor, se obtiene el rendimiento electromecánico.



Relación entre la potencia aportada al aire en los compresores y la consumida por el motor eléctrico		
Potencia aportada al aire en los compresores	15715,91	kW
Potencia consumida por el motor eléctrico	16833,93	kW
Relación entre la potencia aportada en compresores y la consumida por el motor	93,36	%

Tabla 10.13. – Relación entre la potencia aportada al aire en los compresores y la consumida por el motor eléctrico

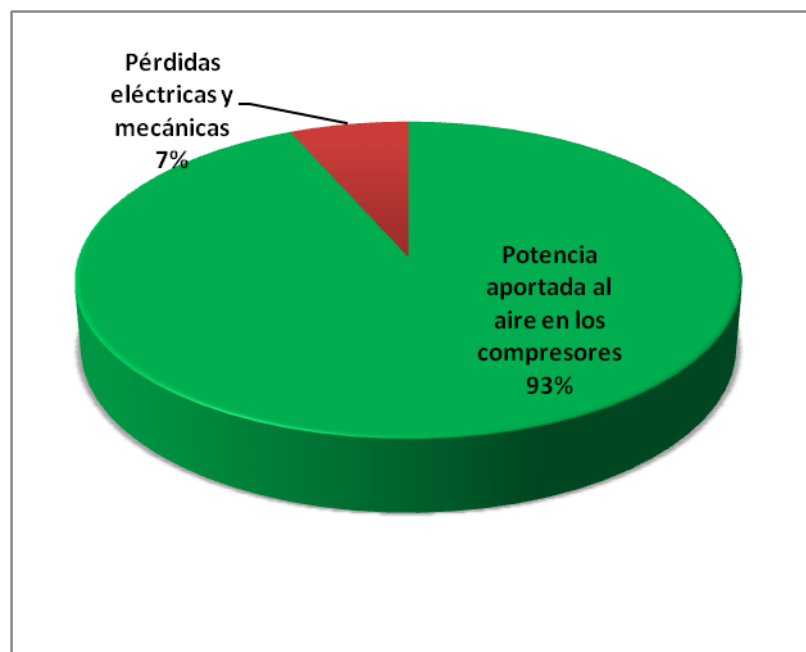


Figura 10.10. – Rendimiento electromecánico del sistema

Como se puede comprobar en la Figura 10.10, la diferencia desde el rendimiento electromecánico del sistema (93,4%) hasta el 100% son las pérdidas eléctricas y mecánicas del sistema (6,6%) que se calcularon en el apartado anterior.

10.2.4.- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia del aire de entrada

En este apartado se relaciona la potencia que tiene la corriente de aire que sale del sistema con la potencia del aire de entrada. Dentro de la potencia del aire de salida se incluyen las dos corrientes que salen del sistema, la de baja presión (punto 17) y la de alta presión (punto 16). Es importante recordar que, dado que se están comparando las



corrientes de salida con las de entrada, ambas tendrán que estar en la misma base, por lo que para las de salida tendrán que tomarse sus valores en base húmeda.

De esta forma el programa genera la Tabla 10.14 y la Figura 10.11.

Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia del aire de entrada		
Potencia obtenida en el aire saliente total	771,87	kW
Potencia de la corriente de aire entrante	2205,29	kW
Relación entre la potencia obtenida y la del aire de entrada	35,00	%
Pérdida de potencia del aire en el proceso	1433,41	kW

Tabla 10.14. – Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia del aire de entrada

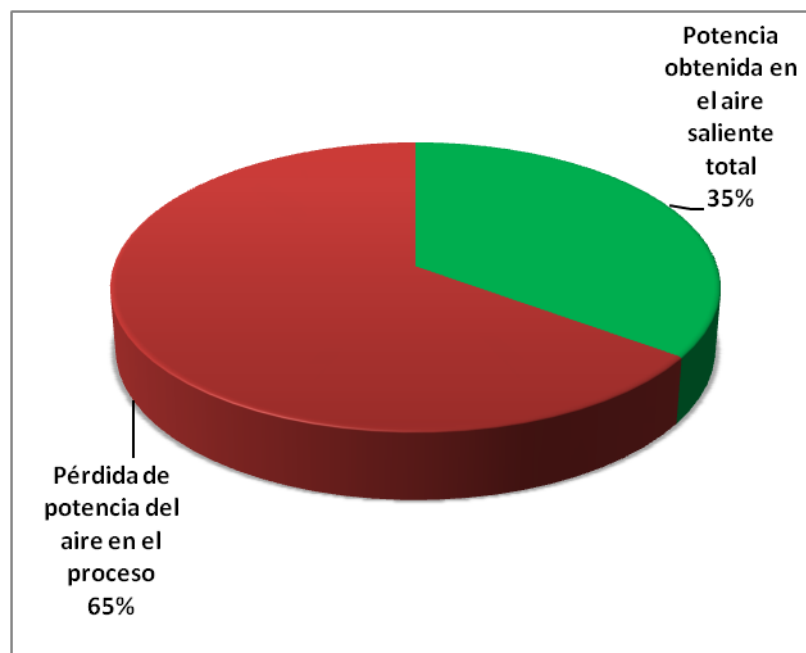


Figura 10.11. – Porcentaje de aprovechamiento de la potencia del aire de entrada al sistema

En base a la Figura 10.11 se puede comprobar cómo sólo se aprovecha una pequeña parte de la potencia que trae el aire que entra al sistema (aproximadamente el 35%), ya que de cada 100 kW que entran al sistema con la corriente de entrada, sólo salen 35 kW en forma de corrientes de aire útiles (salida de aire a baja presión y salida de aire a alta presión). El resto es la potencia que se va perdiendo en todos los equipos a lo largo del proceso, principalmente en los intercambiadores de calor.



Aunque pueda parecer extraño que el aire tenga menos energía a la salida del sistema de compresión que a la entrada, tiene una base científica que lo demuestra. La causa de esto es que esta potencia de la corriente de aire viene determinada por la entalpía del mismo, ya que como se vio en el balance de materia todo el aire que entra al sistema sale por el otro extremo. Asimismo esta entalpía viene determinada por las condiciones de temperatura y presión, siendo proporcional a la primera e inversamente proporcional a la segunda.

Dado que el aire se comprime y luego se enfría, las condiciones del aire de salida son de una presión mucho mayor que la de entrada, pero con una temperatura cercana a la de entrada. Este aumento de la presión a una temperatura aproximadamente constante provoca esa disminución de la entalpía que provoca que la potencia del aire de salida sea menor que la del de entrada.

Una forma fácil de ver esta variación isotérmica de la entalpía es mirar las tablas de propiedades termodinámicas elaboradas para este proyecto. Así cogiendo cualquiera de las tablas de entalpía, en una fila concreta y desplazándose a lo largo de ella hacia los lados se puede ver cómo se cumple esta relación. Si uno se desplaza hacia la izquierda (disminuye la presión) aumenta la entalpía, mientras que si lo hace hacia la derecha (aumenta la presión) disminuye la entalpía.

10.2.5.- Relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada y la consumida por el motor.

Este indicador viene a ser parecido al anterior, sólo que ahora también se tiene en cuenta la potencia que consume el motor eléctrico del sistema de compresión.

Con ello, el programa genera la Tabla 10.15 y la Figura 10.12. En esta segunda se ve claramente que el aprovechamiento de la potencia entrante al sistema (contando la que trae el aire y la se le aporta con el motor eléctrico) es mínima, situándose en torno a un 4%.



Relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada y la consumida por el motor		
Potencia obtenida en el aire saliente total	771,87	kW
Suma de la potencia del aire entrante y la consumida por el motor	19039,22	kW
Relación entre la potencia obtenida y la suma de la del aire entrante y la del motor	4,05	%
Pérdidas del proceso	18267,35	kW

Tabla 10.15. – Relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada y la consumida por el motor

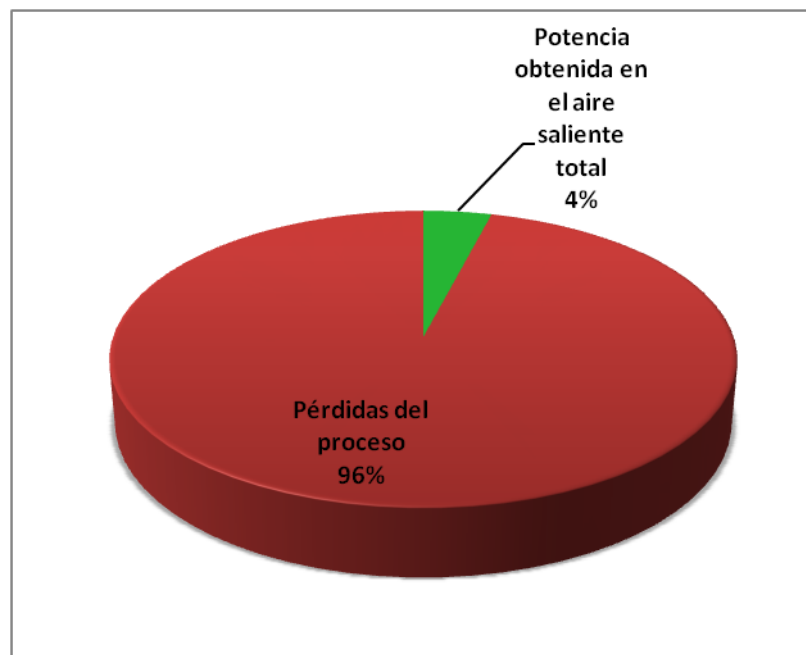


Figura 10.12. - Porcentaje de aprovechamiento de la potencia del aire de entrada al sistema y la consumida por el motor

10.2.6.- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia consumida por el motor eléctrico

Este indicador que genera la herramienta (Tabla 10.16) relaciona la potencia del aire saliente (en base seca) respecto a la potencia consumida por el motor. Se toma el aire en base seca a diferencia de antes ya que ahora no hay necesidad de tomarlo en base húmeda para compararlo con el de la entrada y así el indicador marcará un valor mayor y más



preciso, ya que los resultados en base seca tienen mayor precisión como se explicó al diseñar las tablas de propiedades del aire.

No obstante, hay que tener en cuenta que esto no es un rendimiento propiamente dicho, ya que puede salir mayor del 100%. Sin embargo sirve de gran ayuda para analizar el sistema ya que un valor alto de este indicador mostrará un buen funcionamiento, ya sea debido a que la potencia del aire de salida sea alta o a que la potencia consumida por el motor sea baja.

Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia consumida por el motor eléctrico		
Potencia obtenida en el aire saliente total (en base seca)	15221,56	kW
Potencia consumida por el motor eléctrico	16833,93	kW
Relación entre la potencia obtenida y la consumida por el motor eléctrico	90,42	%

Tabla 10.16. – Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia consumida por el motor

10.2.7.- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia aportada al sistema en todos sus equipos

Este indicador sigue un funcionamiento similar al anterior, sólo que ahora en vez de relacionar la potencia del aire de salida con la consumida por el motor, se relaciona con la aportada por los equipos, es decir, toda aquella potencia que realmente llega al fluido. De esta manera, ahora no tiene en cuenta la potencia que se pierde en las pérdidas mecánicas y eléctricas del sistema motriz, pero en cambio, sí cuenta la potencia aportada en los prepurificadores la cual antes no intervenía. Lo que sí permanece igual al indicador anterior es el hecho de que cuanto mayor sea el valor del indicador mejor funcionamiento tendrá la instalación. En la Tabla 10.17 se puede ver cómo sería el resultado que muestra el programa para este indicador.

Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia aportada al sistema en todos sus equipos		
Potencia obtenida en el aire saliente total (en base seca)	15221,56	kW
Potencia aportada al sistema en sus equipos	15816,40	kW
Relación entre la potencia obtenida y la aportada en sus equipos	96,24	%

Tabla 10.17. – Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia aportada al sistema en todos sus equipos



10.2.8.- Relación entre la potencia aportada y perdida en los equipos del sistema

Este indicador es completamente diferente a los anteriores, ya que éste no tiene en cuenta en ningún momento la corriente de salida de aire. Por el contrario, este indicador sirve para comprobar cuál está siendo la relación entre la potencia aportada por los equipos (incluye compresores y prepurificadores) y la disipada en algunos de ellos (intercambiadores de calor y filtros). Así, si este indicador marca un valor por encima del 100% querrá decir que la potencia aportada al fluido es mayor que la quitada en sus equipos.

De todos modos, esto no ocurrirá nunca, ya que la entalpía del aire siempre es menor a la salida que a la entrada porque la temperatura se mantiene aproximadamente igual y la presión aumenta considerablemente. Por tanto se deduce que la potencia que sale del volumen de control que representaría el aire en dichos equipos siempre será mayor que la que entra en los demás equipos.

Seguidamente se pueden apreciar los resultados mostrados por la herramienta (Tabla 10.18). Como se puede ver este indicador resulta menor del 100%, lo que señala que la potencia que sale del sistema en algunos equipos es mayor que la que entra en el resto de ellos.

Relación entre la potencia aportada y perdida en los equipos del sistema		
Potencia aportada al sistema en sus equipos	15816,40	kW
Potencia perdida por el sistema en sus equipos	17280,86	kW
Relación entre la potencia aportada y la perdida	91,53	%

Tabla 10.18. – Relación entre la potencia aportada y la perdida en los equipos del sistema

10.2.9.- Rendimiento isentrópico conjunto de los 6 compresores.

Dado que las 6 etapas de compresión del sistema se encuentran dispuestas en paralelo, se puede hallar un rendimiento isentrópico conjunto de todas ellas como el producto de todos sus rendimientos. Hay que tener en cuenta que este rendimiento no es el del sistema de compresión de manera global, ya que sólo tiene en cuenta las etapas de compresión, sin afectarle lo que ocurre en los demás equipos del sistema como los intercambiadores de calor, los filtros o los prepurificadores.



De esta forma, el programa genera la Tabla 10.19 y la Figura 10.13 para mostrar este valor.

Rendimiento isentrópico conjunto de los 6 compresores		
Rendimiento conjunto de los 6 compresores	34,93	%

Tabla 10.19. – Rendimiento isentrópico conjunto de las 6 etapas de compresión

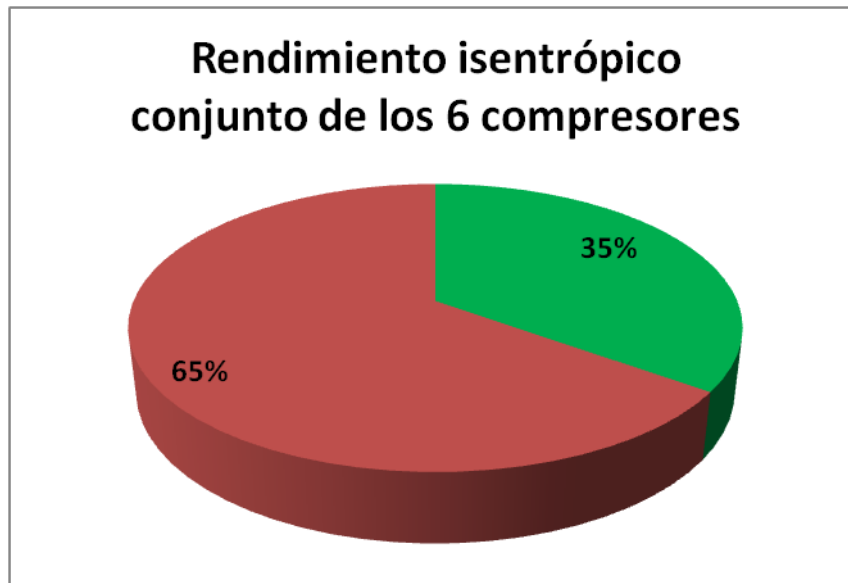


Figura 10.13. - Rendimiento isentrópico conjunto de todas las etapas de compresión del sistema

Viendo este resultado, se comprueba que está dentro de los valores esperables para un sistema de compresión de 6 etapas. Se remarca el número de etapas porque éste dependerá en la bondad o no del resultado de este indicador. Esto se debe a que contando que el rendimiento de cada una de las etapas fuera el mismo, el rendimiento del conjunto disminuiría según aumenta el número de etapas. Por ejemplo para un rendimiento de cada etapa del 80 % (0,8), con 2 etapas el rendimiento del conjunto sería del 64 % (0,64) y con 3 etapas sería del 51 % (0,51).

No obstante, esto podría llevar a pensar que sería mejor poner una única etapa de compresión que comprimiera desde la presión ambiental (1 barA aproximadamente) hasta la salida de alta presión (20 barA aproximadamente), lo cual sería un grave error. Como se indica en (Greene, 1990), es recomendable no superar una relación de presiones de 4 entre la entrada y la salida de cada etapa, ya que en caso de superarla, el aire se calentará en exceso, empeorando el rendimiento isentrópico, lo que hará que consuma más potencia de la necesaria.



10.3.- Balance global del sistema

En este apartado de la pantalla de resultados se muestra el análisis del balance de energía global del sistema en base al esquema mostrado anteriormente en la Figura 5.6. Esto no sólo permitirá localizar las zonas de mayores pérdidas, sino que también será de gran utilidad para comprobar el grado de calidad del análisis realizado, en función de cuanto se desvíó de cero el balance de todas las potencias del sistema.

La primera parte de la pantalla del balance global del sistema muestra una serie de tablas donde aglutina todos los valores calculados en otros apartados de las hojas y referentes a los balances individuales de cada uno de los equipos. En la Figura 10.14 se puede ver una captura de pantalla de la misma.

Balance global del sistema de compresión								
Potencia del aire entrante al sistema (en base húmeda)			Potencia del aire saliente del sistema (en base húmeda)			Potencia del aire saliente del sistema (en base seca)		
Potencia de la corriente de aire entrante	2205,29	kW	Potencia de la corriente de aire del bypass del BAC	413,59	kW	Potencia de la corriente de aire del bypass del BAC	11232,90	kW
			Potencia de la corriente de aire saliente del BAC	358,29	kW	Potencia de la corriente de aire saliente del BAC	3988,66	kW
Potencia aportada por los equipos al sistema			Potencia disipada por los equipos en el sistema			Balance global del sistema de compresión de aire		
Potencia aportada al aire por el BLAC 1	4605,54	kW	Potencia perdida en el filtro de aspiración BLAC	3,06	kW	Potencia entrante	18021,69	kW
Potencia aportada al aire por el BLAC 2	3174,72	kW	Potencia perdida en el intercambiador 1	4039,11	kW	Potencia saliente	18052,74	kW
Potencia aportada al aire por el BLAC 3	4476,93	kW	Potencia perdida en el intercambiador 2	3776,77	kW	Error diferencial	31,05	kW
Potencia aportada al aire por el BLAC 4	2579,07	kW	Potencia perdida en el intercambiador 3	4667,81	kW	Error relativo	0,17	%
Potencia aportada en los prepurificadores y el filtro	100,50	kW	Potencia perdida en el DCA	4101,74	kW			
Potencia aportada al aire por el BAC 1	434,38	kW	Potencia perdida en el filtro de aspiración del BAC	-0,63	kW			
Potencia aportada al aire por el BAC 2	445,26	kW	Potencia perdida en el intercambiador 4	212,47	kW			
Total	15816,40	kW	Potencia perdida en el aftercooler del BAC	480,53	kW			
			Total	17280,86	kW			

Figura 10.14. – Visión general de la primera parte del balance global del sistema de compresión

La primera de estas tablas recoge el valor de la potencia de la corriente de aire de entrada al sistema (Tabla 10.20). A su derecha aparece la tabla donde se muestran las potencias de las dos corrientes de aire de salida, que son la de baja presión y la de alta presión (Tabla 10.21). Ambas tablas tienen todas sus potencias en base húmeda, ya que de no ser así no se podría llevar a cabo el balance de potencia entre ellas.

Potencia del aire entrante al sistema (en base húmeda)		
Potencia de la corriente de aire entrante	2205,29	kW

Tabla 10.20. – Potencia de la corriente de aire entrante al sistema (en base húmeda)



Potencia del aire saliente del sistema (en base húmeda)		
Potencia de la corriente de aire a baja presión	413,59	kW
Potencia de la corriente de aire a alta presión	358,29	kW

Tabla 10.21. – Potencia de las corrientes de aire salientes del sistema (en base húmeda)

Además a modo indicativo se muestran también las corrientes de salida en base seca (Tabla 10.22) por si en algún momento se quisieran consultar. No obstante, éstas no se utilizan para los cálculos.

Potencia del aire saliente del sistema (en base seca)		
Potencia de la corriente de aire a baja presión	11232,90	kW
Potencia de la corriente de aire a alta presión	3988,66	kW

Tabla 10.22. – Potencia de las corrientes de aire salientes del sistema (en base seca)

A continuación el programa muestra otras dos tablas calculadas a partir de los balances de energía particulares de cada equipo. Así, agrupa todos los equipos del sistema en dos tablas diferentes en función de si son equipos que aportan energía al fluido, como los compresores y los prepurificadores, o si son equipos que quitan energía al fluido, como los intercambiadores de calor y los filtros. Los primeros aparecen en la Tabla 10.23, mientras que los segundos lo hacen en la Tabla 10.24.



Potencia aportada por los equipos al sistema		
Potencia aportada al aire por el BLAC 1	4605,54	kW
Potencia aportada al aire por el BLAC 2	3174,72	kW
Potencia aportada al aire por el BLAC 3	4476,93	kW
Potencia aportada al aire por el BLAC 4	2579,07	kW
Potencia aportada en los prepurificadores y el filtro	100,50	kW
Potencia aportada al aire por el BAC 1	434,38	kW
Potencia aportada al aire por el BAC 2	445,26	kW
Total	15816,40	kW

Tabla 10.23. – Potencias aportadas en los diferentes equipos del sistema

Aquí que se pueden ver todas las potencias que aportan cada uno de los equipos al aire, destaca aún más la diferencia ya comentada anteriormente entre las etapas del BLAC y las del BAC, siendo las primeras del orden de diez veces mayores que las segundas. Esto se debe principalmente al diferente flujo de aire que pasa por ellos. Siendo aproximadamente una cuarta parte el aire que circula por el BAC respecto al que lo hace por el BLAC. El resto de la diferencia se debe a la corriente de vapor de agua que acompaña al aire en el BLAC, lo cual no ocurre en el BAC ya que es aire seco.

Además también se puede ver el hecho de que las etapas impares del BLAC aportan una mayor potencia al fluido que las pares. A primera vista podría parecer un dato positivo, pero no lo es tanto. Como ya se vio antes, estas etapas impares son las que poseen un rendimiento iséntropico ligeramente inferior debido a la presencia de los álabes guía que poseen para regular el caudal. Por tanto parte de esa diferencia de potencias se deberá realmente a un aumento de la potencia que transmiten al fluido en forma de pérdidas térmicas, la cual no es útil, porque no se aprovecha para aumentar su presión, sino que aumenta su temperatura.

Por último, se puede comprobar cómo en los prepurificadores aparece un cierto flujo de potencia aportada al fluido, a causa de la reacción exotérmica que en ellos se da. No obstante, representa una porción mínima de la potencia aportada total por todos los equipos, rondando el 0,5% aproximadamente.



Potencia disipada por los equipos en el sistema		
Potencia perdida en el filtro de aspiración BLAC	3,06	kW
Potencia perdida en el intercambiador 1	4039,11	kW
Potencia perdida en el intercambiador 2	3776,77	kW
Potencia perdida en el intercambiador 3	4667,81	kW
Potencia perdida en el DCA	4101,74	kW
Potencia perdida en el filtro de aspiración del BAC	-0,63	kW
Potencia perdida en el intercambiador 4	212,47	kW
Potencia perdida en el aftercooler del BAC	480,53	kW
Total	17280,86	kW

Tabla 10.24. – Potencias disipadas en los diferentes equipos del sistema

En cuanto a los equipos que disipan energía, se puede apreciar la ya comentada diferencia entre los intercambiadores del lado de aire húmedo y los del lado de aire seco, donde los primeros disipan en torno a diez veces más que los segundos. Al igual que para los compresores se debe al menor caudal tanto de aire como de vapor de agua que circula por la segunda parte del sistema.

No obstante, en los intercambiadores de calor ocurre otro fenómeno que aumenta aún más esa disipación de energía y es el drenaje de agua condensada. Con esta corriente de agua se va del sistema parte de la potencia que traía el aire húmedo que entraba al intercambiador de calor.

Asimismo se comprueba como las potencias disipadas en los filtros son mínimas. Incluso debido al error que implica el no contar con sensores de temperatura a la entrada y la salida de estos filtros, como ya se explicó anteriormente, y que implica tener que suponer temperatura constante del aire a su paso por ellos, hace que ocasionalmente salgan resultados incoherentes. Esto pasa, cuando como se ve en la Tabla 10.24, la potencia disipada en el filtro de aspiración del BAC sale negativa, lo cual implicaría que está aportando energía al fluido y no puede ser. Esto ocurre porque la potencia ahí es casi nula y ese pequeño error hace que baje de cero. En el filtro de aspiración del BLAC probablemente implique el mismo error sólo que al ser un poco mayor se encuentra más lejos de cero y nunca llega a ser negativa.



No obstante, esto no será un problema a la hora de hacer el balance global del sistema, como se verá más adelante, ya que la potencia de ese filtro representa sólo el 0,003% del total de potencia disipada por el sistema.

Con los datos recogidos en estas tablas el programa genera dos gráficas de columnas apiladas donde se muestran por un lado todas las potencias aportadas al sistema y por el otro todas las potencias disipadas en el sistema.

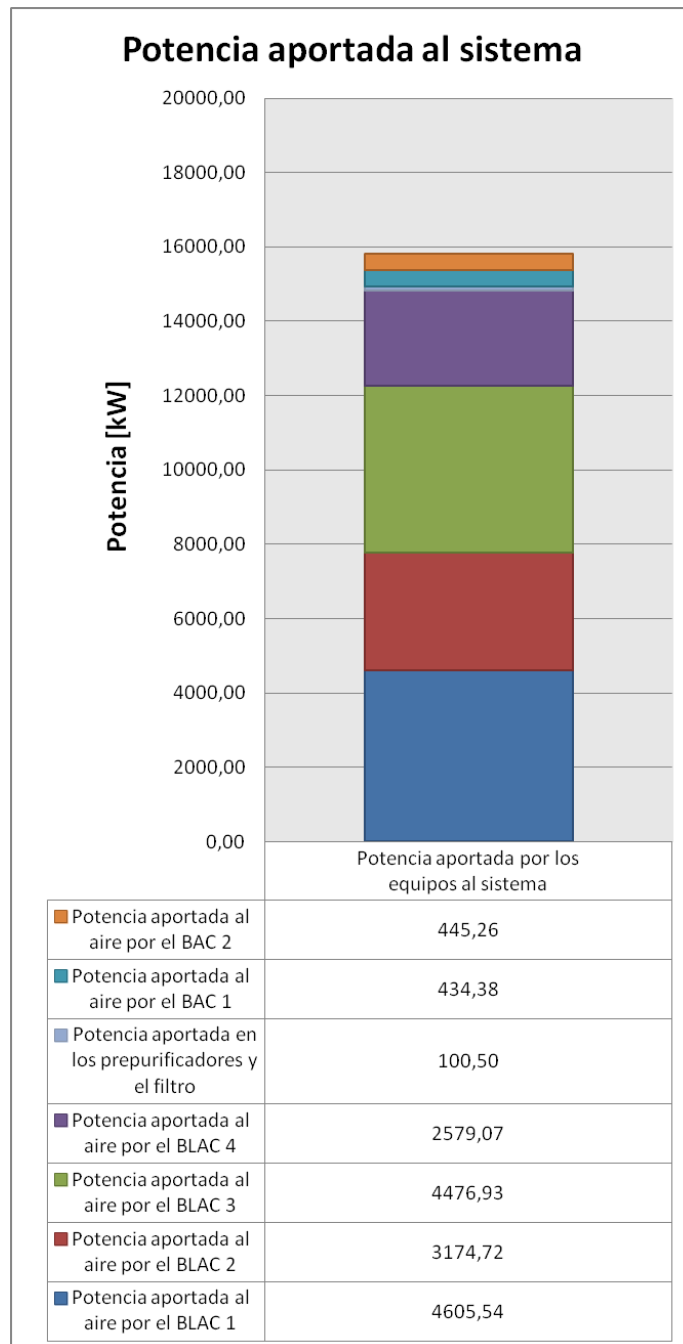


Figura 10.15. – Representación gráfica de las potencias aportadas por los equipos al sistema

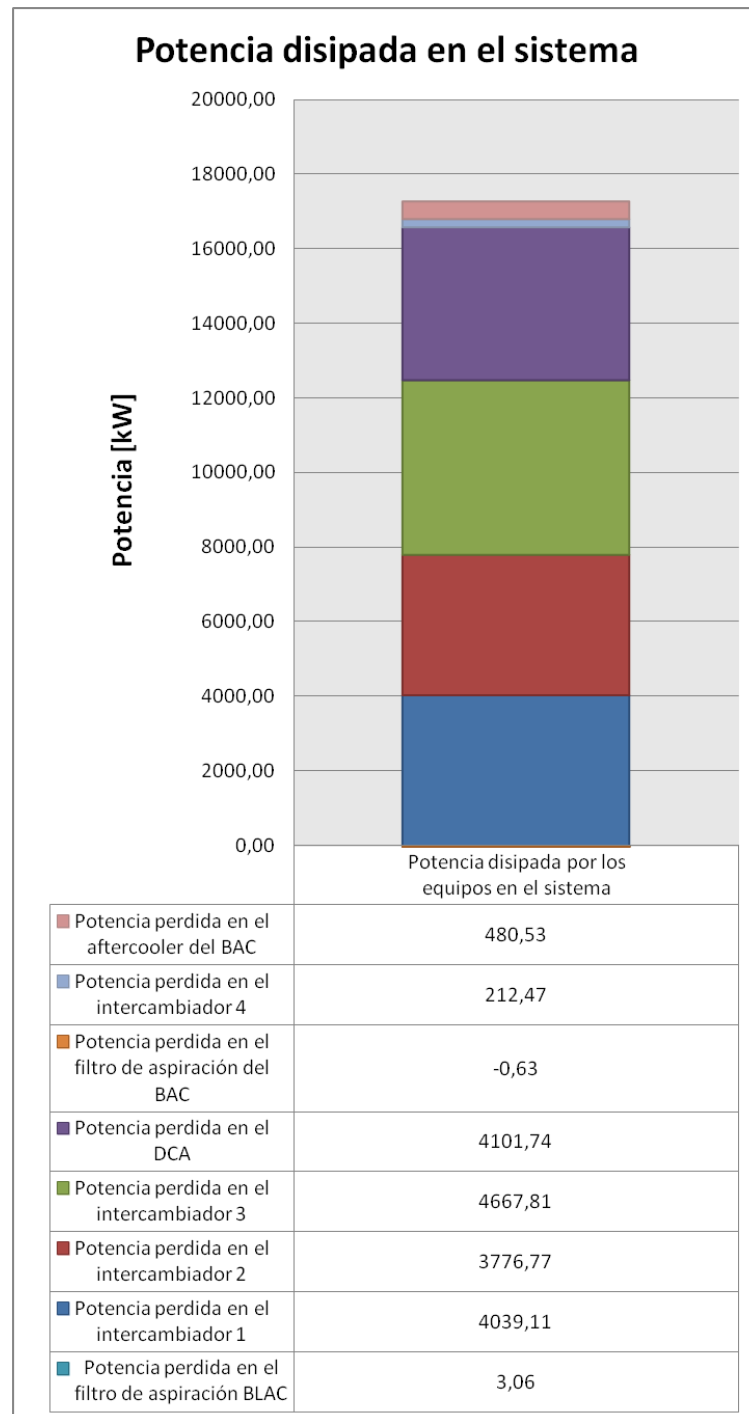


Figura 10.16. – Representación gráfica de las potencias disipadas en los equipos del sistema

Con estos datos de las variaciones de potencia que se dan en cada equipo y conociendo la potencia de la corriente de aire de entrada al sistema se puede ver cuál es la evolución de la potencia que lleva asociada la corriente de aire a lo largo de todo el sistema de compresión y purificación de aire.



Para ello el programa genera la Tabla 10.25. En ella se pueden apreciar dos partes claramente diferenciadas, una primera parte que representa esta evolución en unidades de potencia y una segunda parte que representa esta evolución porcentualmente respecto a los valores de potencia que tenía el aire a la entrada.

En esta tabla aparecen dos tipos de filas, las referentes a los puntos del proceso, las cuales indicarán la potencia que lleva el aire en ese punto, y las referentes a los diferentes equipos del proceso, las cuales indicarán la variación de potencia entre la entrada y la salida del mismo.

Evolución de la potencia que lleva el aire en cada punto (en base húmeda)						
	Variación de potencia	Potencia del aire en ese punto	Unidades	Variación respecto a la entrada	Porcentaje respecto a la entrada	Unidades
0. Aire de entrada (en base húmeda)		2205,29	kW		100,00	%
Filtro de aspiración del BLAC	-3,06		kW	-0,14		%
1. Potencia del aire en la entrada del BLAC 1		2202,23	kW		99,86	%
BLAC 1	4605,54		kW	208,84		%
2. Potencia del aire en la salida del BLAC 1		6807,77	kW		308,70	%
Intercambiador de calor 1	-4039,11		kW	-183,16		%
3. Potencia del aire en la entrada del BLAC 2		2768,66	kW		125,55	%
BLAC 2	3174,72		kW	143,96		%
4. Potencia del aire en la salida del BLAC 2		5943,39	kW		269,51	%
Intercambiador de calor 2	-3776,77		kW	-171,26		%
5. Potencia del aire en la entrada del BLAC 3		2166,62	kW		98,25	%
BLAC 3	4476,93		kW	203,01		%
6. Potencia del aire en la salida del BLAC 3		6643,54	kW		301,26	%
Intercambiador de calor 3	-4667,81		kW	-211,66		%
7. Potencia del aire en la entrada del BLAC 4		1975,73	kW		89,59	%
BLAC 4	2579,07		kW	116,95		%
8. Potencia del aire en la salida del BLAC 4		4554,80	kW		206,54	%
DCA	-4101,74		kW	-186,00		%
9. Potencia del aire en la salida del DCA		453,06	kW		20,54	%
Prepurificadores y filtro de polvo	100,50		kW	4,56		%
10. Potencia del aire en la salida del filtro de polvo		553,55	kW		25,10	%
17. Desvío de aire a baja presión (en base húmeda)	-382,54		kW	-17,35		%
11. Potencia del aire en la entrada del filtro del BAC		171,02	kW		7,75	%
Filtro de aspiración del BAC	0,63		kW	0,03		%
12. Potencia del aire en la entrada del BAC 1		171,64	kW		7,78	%
BAC 1	434,38		kW	19,70		%
13. Potencia del aire en la salida del BAC 1		606,02	kW		27,48	%
Intercambiador de calor 4	-212,47		kW	-9,63		%
14. Potencia del aire en la entrada del BAC 2		393,55	kW		17,85	%
BAC 2	445,26		kW	20,19		%
15. Potencia del aire en la salida del BAC 2		838,81	kW		38,04	%
Aftercooler del BAC	-480,53		kW	-21,79		%
16. Potencia del aire a alta presión (en base húmeda)		358,29	kW		16,25	%

Tabla 10.25. – Evolución de la potencia que lleva la corriente de aire a lo largo del proceso

Además, con estos valores la herramienta representa la gráfica que se muestra en la Figura 10.17. En ella se puede ver cómo la potencia que lleva el aire en la primera parte del



sistema es bastante superior a la de la segunda. Como ya se comentó en otras ocasiones, esto se debe a la humedad que tiene el aire en la primera parte y a que por ésta circula un mayor caudal de aire que por la segunda. Asimismo se puede comprobar cómo esta línea sigue la tendencia marcada por la evolución de la presión y la temperatura a lo largo del proceso representada en la Figura 10.6. Esto se debe a que la potencia es función de la entalpía del aire y este a su vez lo es de la presión y la temperatura, siendo mayor cuanto menor presión y mayor temperatura tenga el aire.

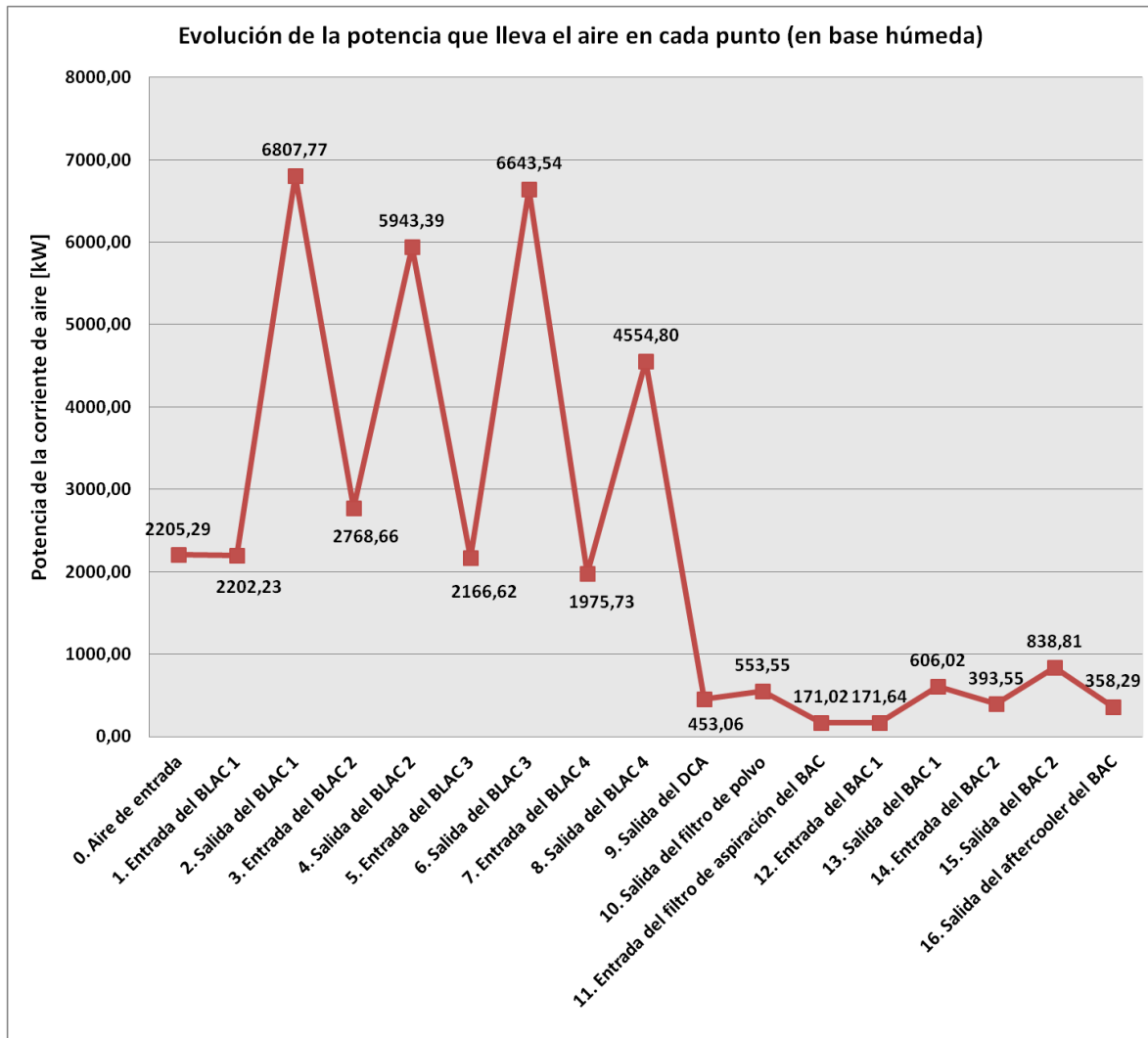


Figura 10.17. – Evolución de la potencia de la corriente de aire a lo largo del proceso

Una vez tiene todos estos datos el programa se encarga de calcular el balance global de energía (en base de potencia) al sistema de compresión y purificación de aire, para comprobar qué nivel de error se está cometiendo.

Por un lado suma todos los flujos de potencia entrantes al sistema.

$$Pot_{entrante} = Pot_{aire\ entrada} + \sum Pot_{aportada} \tag{ec. 10.1}$$



Por otro lado suma todas las potencias salientes del sistema.

$$Pot_{saliente} = Pot_{aire\ salida\ BP} + Pot_{aire\ salida\ AP} + \sum Pot_{disipada} \quad (\text{ec. 10.2})$$

Dado que la suma de ambas debería ser cero, pero no lo será porque hay implicado un cierto grado de error en la herramienta, habrá un pequeño error diferencial entre ambos valores, el de la potencia entrante y el de la potencia saliente. Así ese error diferencial se calcula como se muestra a continuación.

$$Error_{diferencial} = |Pot_{entrante} - Pot_{saliente}| \quad (\text{ec. 10.3})$$

Por último representa este error en forma de error relativo dividiéndolo entre la potencia entrante.

$$Error_{relativo} = \frac{Error_{diferencial}}{Pot_{entrante}} \quad (\text{ec. 10.4})$$

Para que quede más claro el cálculo que efectúa el programa, se muestran a continuación las operaciones que llevaría a cabo internamente el programa para calcular este balance con los datos de la potencias aportadas y disipadas en los equipos (Tabla 10.23 y Tabla 10.24 respectivamente) y las potencias de las corrientes de aire de entrada y de salida en base húmeda (Tabla 10.20 y Tabla 10.21)

$$Pot_{entrante} = 2205,29 + 15816,40 = 18021,69 \text{ kW} \quad (\text{ec. 10.5})$$

$$Pot_{saliente} = 413,59 + 358,29 + 17280,86 = 18052,74 \text{ kW} \quad (\text{ec. 10.6})$$

$$Error_{diferencial} = |18021,69 - 18052,74| = 31,05 \text{ kW} \quad (\text{ec. 10.7})$$

$$Error_{relativo} = \frac{31,05}{18021,69} = 0,0017 = 0,17 \% \quad (\text{ec. 10.8})$$

En la Tabla 10.26 se puede apreciar cómo el programa muestra este mismo valor que se acaba de calcular aquí.

Balance global del sistema de compresión de aire		
Potencia entrante	18021,69	kW
Potencia saliente	18052,74	kW
Error diferencial	31,05	kW
Error relativo	0,17	%

Tabla 10.26. - Balance global de energía del sistema de compresión y purificación de aire

Este error del 0,17% en el balance global de energía es un resultado altamente satisfactorio, ya que esto indica que el error asimilado a este estudio es casi nulo, lo cual le



otorga gran credibilidad a los resultados obtenidos en el mismo. Cabe decir que no siempre sale este valor del error exactamente, pero se suele mover en ese rango, siendo del 0,20 % el máximo error encontrado durante la fase de pruebas del programa en la empresa.

Con esto se demuestra no sólo la efectividad de los propios cálculos llevados a cabo por el programa, sino también de los buenos resultados de las propiedades del aire conseguidos con el subprograma implementado para realizar las interpolaciones y de la precisión de los sensores con los que cuenta la planta.



11.- HISTÓRICO SEMANAL DEL ÚLTIMO TRIMESTRE

Esta hoja sirve para comparar los resultados semanales a lo largo del último trimestre, lo que otorga una visión más relativa de estos resultados mediante su comparación con los que había en otro momento. Con ello, servirá de gran ayuda para avisar al usuario si surge algún problema en la instalación, si el valor marcado por ésta tiene un empeoramiento respecto a los valores de periodos anteriores.

11.1.- Encabezado de la hoja

Esta hoja del libro de Excel comienza con un encabezado (Figura 11.1), el cual tiene la misma estructura y funcionamiento que los de las hojas de “estado de funcionamiento” por lo que no se volverá a explicar aquí.



Figura 11.1. – Encabezado de la hoja “Histórico del trimestre”

11.2.- Histórico de los compresores

En la primera parte de la hoja el programa genera los históricos referentes a las diferentes variables de las etapas de compresión calculadas en las hojas de “estado de funcionamiento”.

A continuación se muestra en la Tabla 11.1, el histórico de los rendimientos isentrópicos de las diferentes etapas de compresión del sistema. La estructura de estas tablas de los históricos será muy similar para cualquiera que sea el dato analizado. Así constarán de 13 filas donde se mostrarán los valores desde hace 12 semanas hasta el actual y posteriormente otras tres donde se mostrará la media del último trimestre, la media del último mes y el valor actual, con el fin de poder compararlos fácilmente.

Además, en este caso, también se cuenta con dos columnas adicionales a la derecha donde muestra tanto la media de las seis etapas de compresión, como el rendimiento conjunto de las mismas.



	BLAC 1	BLAC 2	BLAC 3	BLAC 4	BAC 1	BAC 2		Media del sistema	Rendimiento conjunto
Hace 12 semanas	82,60	89,45	82,13	86,32	83,53	83,76		84,63	36,64
Hace 11 semanas	84,71	88,42	82,09	85,64	82,21	83,91		84,50	36,32
Hace 10 semanas	83,14	87,08	83,69	84,54	84,52	82,85		84,30	35,87
Hace 9 semanas	81,39	86,77	80,27	86,06	85,21	80,93		83,44	33,64
Hace 8 semanas	82,88	88,20	80,75	85,75	81,91	81,61		83,52	33,83
Hace 7 semanas	82,76	89,46	81,45	86,68	82,04	82,37		84,12	35,32
Hace 6 semanas	84,03	88,88	81,77	85,67	80,75	80,99		83,68	34,22
Hace 5 semanas	82,04	86,84	80,47	87,42	81,13	82,91		83,47	33,71
Hace 4 semanas	81,96	87,12	82,96	84,47	83,21	82,73		83,74	34,45
Hace 3 semanas	84,05	89,01	82,16	85,10	81,26	82,19		83,96	34,93
Hace 2 semanas	84,75	89,26	83,01	85,02	81,69	80,59		84,05	35,15
Hace 1 semana	82,97	86,69	83,56	84,90	80,60	81,50		83,37	33,52
Actual	85,21	89,02	84,03	83,45	81,23	83,33		84,38	36,00
Media del último trimestre	83,27	88,17	82,18	85,46	82,25	82,28		83,94	34,89
Media del último mes	83,79	88,22	83,14	84,59	81,60	82,07		83,90	34,81
Actual	85,21	89,02	84,03	83,45	81,23	83,33		84,38	36,00

Tabla 11.1. – Valores de los rendimientos isentrópicos de las 6 etapas de compresión en el último trimestre

Analizando estos resultados se comprueba cómo los rendimientos de las seis etapas de compresión siguen una evolución estable en el último trimestre situándose en torno al 80-85%, lo cual era el valor esperable para este tipo de compresores. El rendimiento conjunto de las seis etapas también muestra una buena estabilidad con valores en torno al 35%.

Como se puede ver todas las casillas con números salen en color verde. Esto se debe a que se programó un código de colores, utilizando el formato condicional de celdas que posee Excel, con el fin de alertar al usuario cuando se produzca un funcionamiento inadecuado. Así estas celdas se sombrearán en color naranja si su valor desciende por debajo del 95% (pero sin bajar del 90%) del rendimiento medio del último trimestre para esa misma etapa de compresión, mientras que lo hará en rojo si desciende por debajo del 90%. En caso de encontrarse por encima del 95% se supondrá que el equipo funciona correctamente y se sombreará en color verde.

Con estos valores el programa representa la evolución de estas variables en el periodo de tiempo estudiado (Figura 11.2). En ella se puede apreciar claramente cómo todos los rendimientos de los compresores se encuentran en el rango del 80 al 90 %, mientras que el rendimiento conjunto de todas las etapas lo hace entre el 30 y el 40 %.

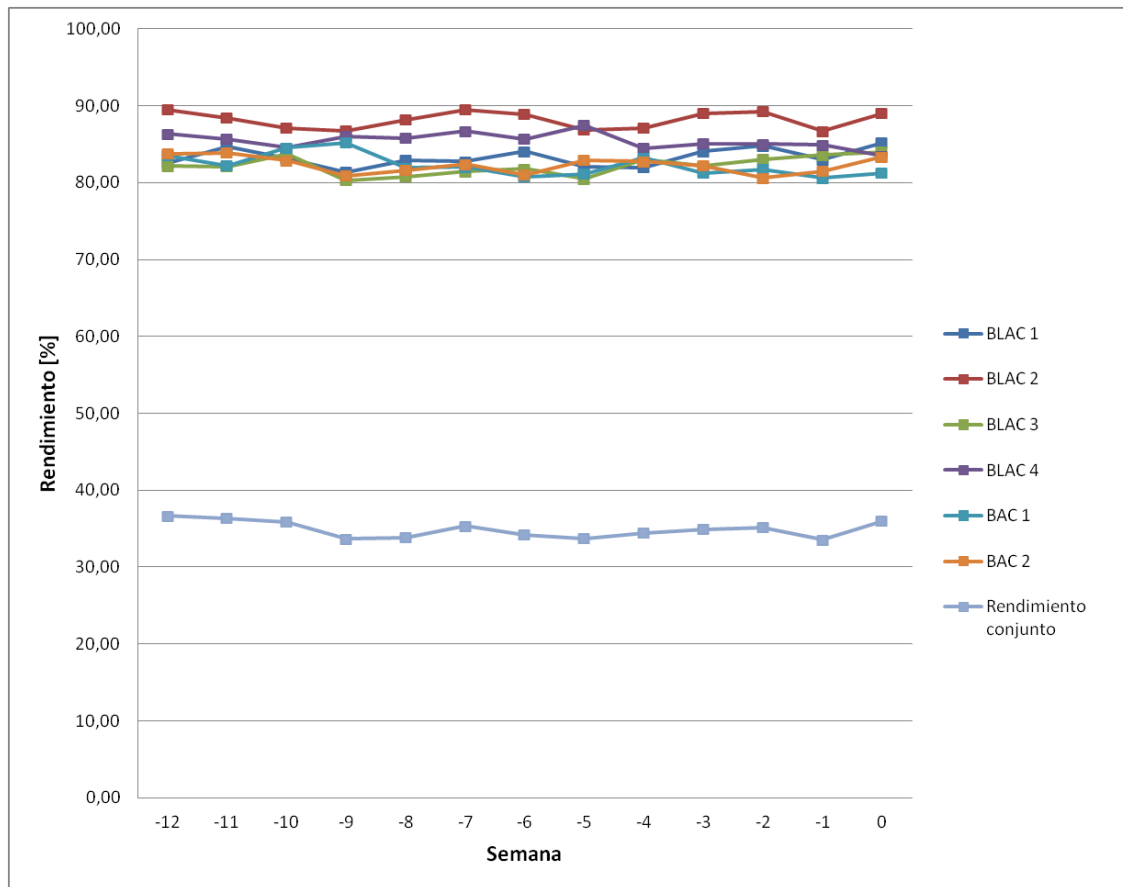


Figura 11.2. – Evolución de los rendimientos isentrópicos de las 6 etapas de compresión y el rendimiento conjunto en el último trimestre

A continuación el programa genera la tabla referente al histórico de los incrementos de presión en cada una de las etapas de compresión.

	BLAC 1	BLAC 2	BLAC 3	BLAC 4	BAC 1	BAC 2	Media del sistema	Total del sistema
Hace 12 semanas	2,141	1,556	3,809	4,009	3,927	5,193	3,439	20,633
Hace 11 semanas	2,146	1,552	3,812	4,009	3,889	5,217	3,437	20,624
Hace 10 semanas	2,148	1,494	3,870	3,865	4,031	4,989	3,399	20,397
Hace 9 semanas	2,088	1,564	3,598	4,045	4,308	5,417	3,503	21,020
Hace 8 semanas	2,079	1,542	3,631	4,020	4,124	5,358	3,459	20,754
Hace 7 semanas	2,109	1,544	3,711	3,978	3,965	5,244	3,425	20,551
Hace 6 semanas	2,119	1,542	3,741	4,030	3,914	5,071	3,403	20,417
Hace 5 semanas	2,097	1,553	3,670	4,084	4,072	5,408	3,481	20,884
Hace 4 semanas	2,152	1,483	3,869	3,828	4,144	5,007	3,414	20,482
Hace 3 semanas	2,130	1,548	3,762	4,010	3,889	5,173	3,419	20,513
Hace 2 semanas	2,139	1,538	3,816	3,967	3,941	4,944	3,391	20,344
Hace 1 semana	2,161	1,495	3,928	3,905	3,918	4,890	3,383	20,297
Actual	2,159	1,521	3,886	3,903	3,868	5,157	3,416	20,494
Media del último trimestre	2,128	1,533	3,777	3,973	3,999	5,159	3,428	20,570
Media del último mes	2,148	1,517	3,853	3,923	3,952	5,034	3,404	20,426
Actual	2,159	1,521	3,886	3,903	3,868	5,157	3,416	20,494

Tabla 11.2. – Valores de los incrementos de presiones en cada etapa de compresión en el último trimestre medidos en bar



Como se puede apreciar en la Tabla 11.2, los incrementos de presión en cada etapa también siguen una distribución muy estable a lo largo del tiempo. Sólo un valor desciende por debajo del 95% del valor medio, pero se mantiene por encima del 90% del mismo, ya que su celda queda sombreada en color naranja. Este valor es el del BAC 2 hace 2 semanas.

En cuanto a las diferentes etapas de compresión se ve cómo no son comparables entre ellas ya que unas tienen unos valores mucho más grandes que otras.

Mientras tanto, el valor total del incremento de presión en las 6 etapas se mantiene estable con valores en torno a 20,5 bar. No obstante, hay que tener en cuenta que éste no es el valor de la presión de salida del sistema de compresión y purificación de aire, ya que a este valor habría que restarle las pérdidas de carga de todos los equipos que el flujo de aire se va encontrando en su avance.

Con estos datos el programa genera dos gráficas. La primera se muestra en la Figura 11.3 y representa la evolución a lo largo del último trimestre de los incrementos de presión que se llevan a cabo en cada una de las etapas de compresión de manera individualizada. Por el contrario, en la Figura 11.4 se representa el incremento de presión total de las 6 etapas que forman el sistema de compresión, es decir, el acumulado por todas las etapas de compresión, el cual se sitúa ligeramente por encima de los 20 bar mencionados anteriormente.

Viendo la evolución de los incrementos de presiones de las diferentes etapas, aunque sea mínimo, se aprecia un ligero aumento en la inestabilidad según se avanza en el proceso. Así, mientras la línea que representa el BLAC 1 resulta casi horizontal, la línea que representa el BAC 2 tiene mayor ondulación. Pese a que no haya una explicación clara para este fenómeno, probablemente se deba a la presencia de más equipos que tiene que atravesar el fluido (filtros, intercambiadores, etc) lo que hace que sus condiciones varíen más de un día para otro, lo cual no ocurre en el BLAC 1, donde toma el aire del ambiente y sólo pasa por el filtro.

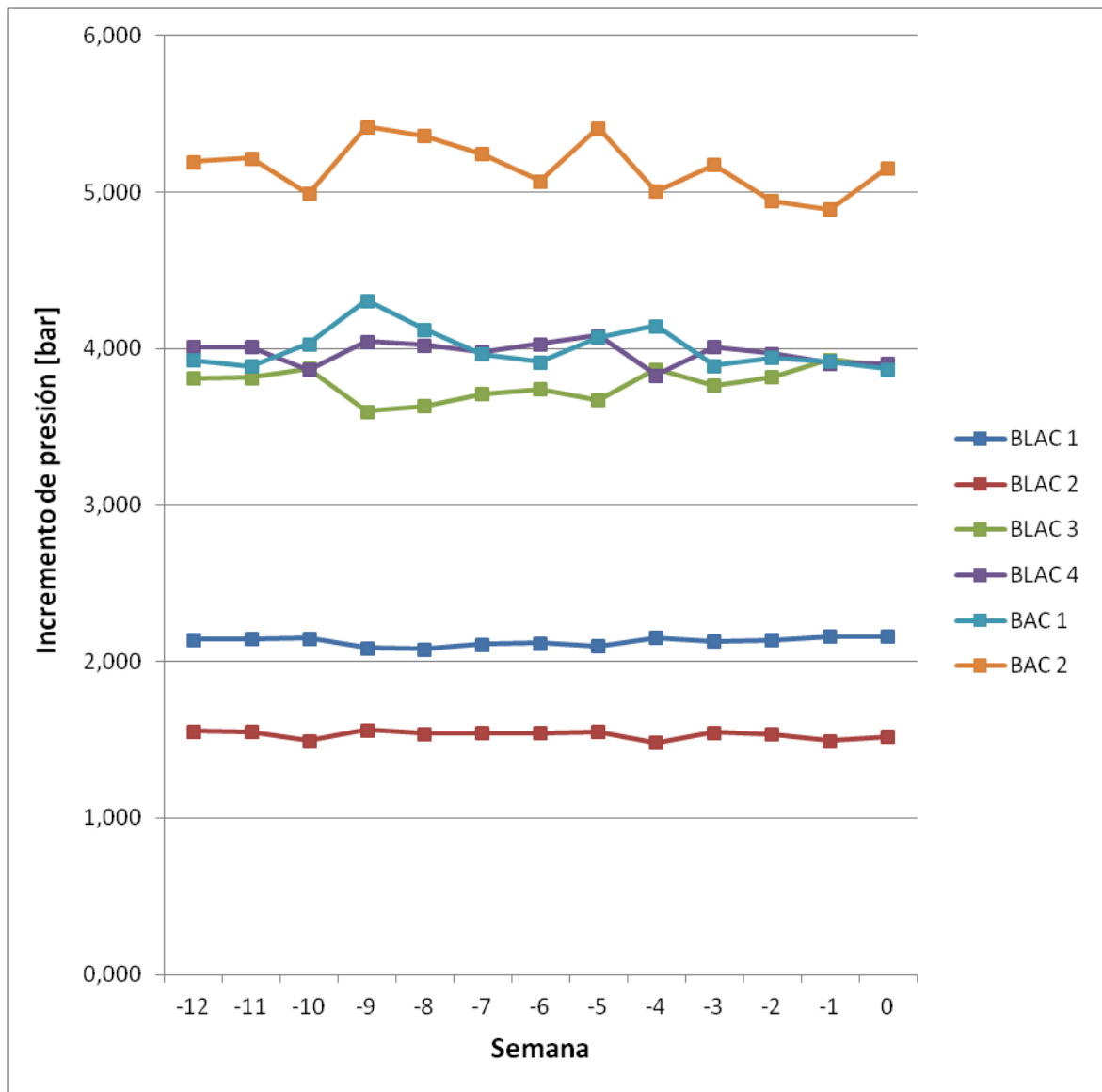


Figura 11.3. – Evolución de los incrementos de presión en las diferentes etapas de compresión en el último trimestre

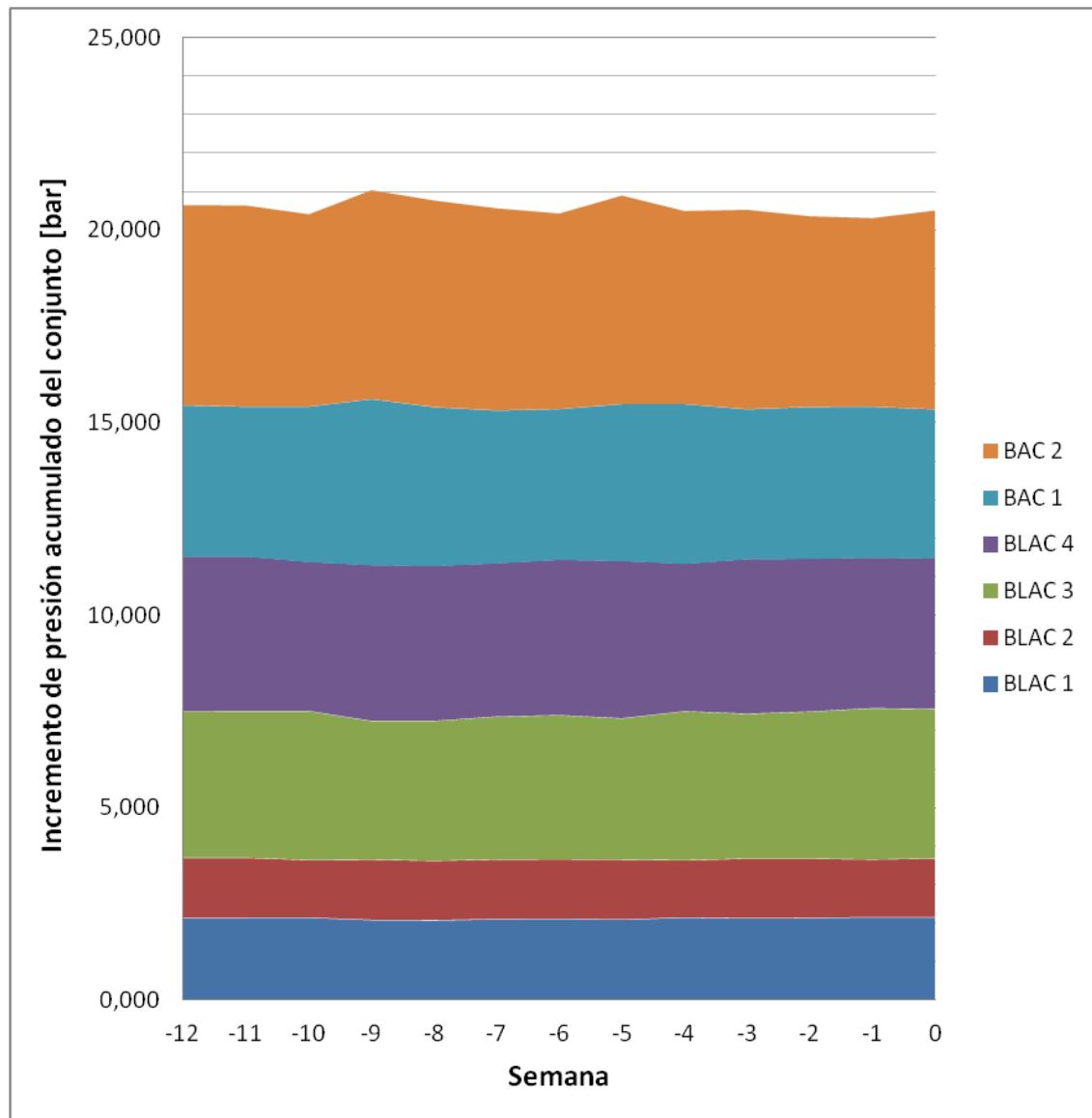


Figura 11.4. – Evolución del incremento de presión acumulado de las 6 etapas de compresión en el último trimestre

A continuación, el programa elabora el histórico de los valores de la relación de presiones de cada una de las etapas de compresión, los cuales se recogen en la Tabla 11.3. Asimismo, estos datos los representa de forma gráfica como se muestra en la Figura 11.5.



	BLAC 1	BLAC 2	BLAC 3	BLAC 4	BAC 1	BAC 2		Media del sistema	Total del sistema
Hace 12 semanas	2,14	1,73	2,04	1,54	1,36	1,35		1,69	21,34
Hace 11 semanas	2,15	1,73	2,04	1,54	1,36	1,35		1,69	21,30
Hace 10 semanas	2,15	1,70	2,07	1,52	1,37	1,34		1,69	21,07
Hace 9 semanas	2,09	1,75	1,99	1,56	1,40	1,36		1,69	21,73
Hace 8 semanas	2,08	1,74	2,01	1,56	1,39	1,36		1,69	21,42
Hace 7 semanas	2,11	1,73	2,02	1,54	1,37	1,35		1,69	21,15
Hace 6 semanas	2,12	1,73	2,03	1,55	1,36	1,34		1,69	21,03
Hace 5 semanas	2,10	1,74	2,01	1,56	1,38	1,37		1,69	21,65
Hace 4 semanas	2,15	1,69	2,08	1,52	1,39	1,34		1,69	21,25
Hace 3 semanas	2,13	1,73	2,03	1,54	1,36	1,35		1,69	21,08
Hace 2 semanas	2,14	1,72	2,05	1,53	1,36	1,33		1,69	20,97
Hace 1 semana	2,16	1,69	2,09	1,52	1,36	1,33		1,69	20,96
Actual	2,16	1,71	2,07	1,52	1,35	1,35		1,69	21,11
Media del último trimestre	2,13	1,72	2,04	1,54	1,37	1,35		1,69	21,24
Media del último mes	2,15	1,71	2,06	1,53	1,36	1,34		1,69	21,07
Actual	2,16	1,71	2,07	1,52	1,35	1,35		1,69	21,11

Tabla 11.3. – Valores de la relación de presiones de las diferentes etapas de compresión en el último trimestre

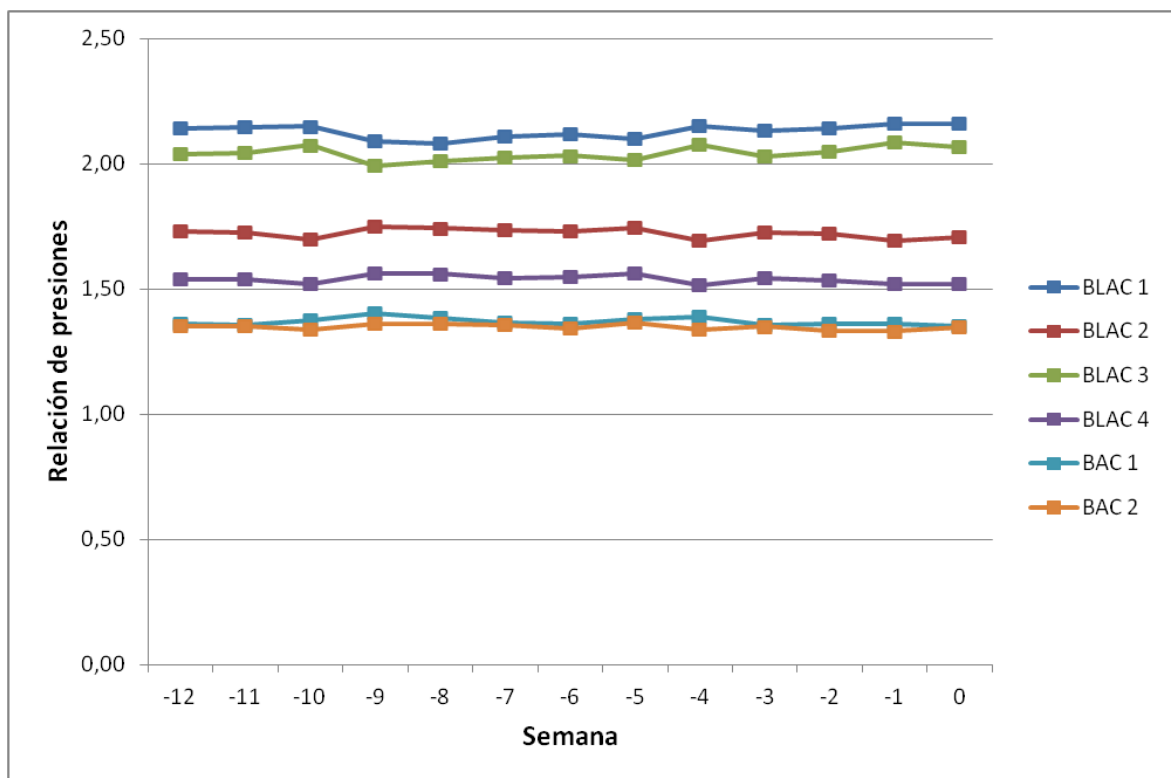


Figura 11.5. – Evolución de la relación de presiones de las distintas etapas de compresión en el último trimestre

Como se puede apreciar, esta relación de presiones resulta muy estable en todas las etapas del sistema, siendo en los seis casos casi constante. Por su parte, se muestra también la relación de presiones de las seis etapas, la cual es el producto de las relaciones de presiones individuales de cada etapa. Esta relación se sitúa en torno a 21, lo que resulta esperable, ya que la presión del aire a la entrada y la salida del sistema son 1 barA y 20



barA aproximadamente y la ligera diferencia que hay se debe a las pérdidas de presión que hay en el resto de equipos.

11.3.- Histórico del reparto de la potencia consumida por el motor

Al igual que para los casos anteriores el programa recopila todos los datos referentes a los porcentajes de las potencias que salen del motor de cada una de las hojas semanales y los aglutina en el histórico que se recoge en la Tabla 11.4.

	Potencia útil BLAC 1	Pérdidas térmicas BLAC 1	Potencia útil BLAC 2	Pérdidas térmicas BLAC 2	Potencia útil BLAC 3	Pérdidas térmicas BLAC 3	Potencia útil BLAC 4	Pérdidas térmicas BLAC 4	Potencia útil BAC 1	Pérdidas térmicas BAC 1	Potencia útil BAC 2	Pérdidas térmicas BAC 2	Pérdidas eléctricas y mecánicas
Hace 12 semanas	22,86	4,82	16,90	1,99	22,02	4,79	13,03	2,07	2,14	0,42	2,21	0,43	6,31
Hace 11 semanas	23,09	4,17	16,76	2,20	21,94	4,79	12,96	2,17	2,08	0,45	2,18	0,42	6,79
Hace 10 semanas	23,08	4,68	16,09	2,39	22,32	4,35	12,41	2,27	2,12	0,39	2,05	0,42	7,44
Hace 9 semanas	22,09	5,05	17,01	2,59	21,20	5,21	13,47	2,18	2,31	0,40	2,21	0,52	5,77
Hace 8 semanas	21,97	4,54	16,73	2,24	21,09	5,03	13,18	2,19	2,22	0,49	2,21	0,50	7,61
Hace 7 semanas	22,56	4,70	16,90	1,99	21,65	4,93	13,12	2,02	2,09	0,46	2,14	0,46	6,97
Hace 6 semanas	22,97	4,36	16,86	2,11	21,82	4,86	13,18	2,21	2,16	0,51	2,18	0,51	6,26
Hace 5 semanas	21,94	4,80	16,53	2,50	21,18	5,14	13,29	1,91	2,17	0,51	2,22	0,46	7,35
Hace 4 semanas	23,73	5,22	16,26	2,40	22,75	4,67	12,50	2,30	2,29	0,46	2,14	0,45	4,83
Hace 3 semanas	23,00	4,36	16,79	2,07	21,85	4,75	13,04	2,28	2,10	0,48	2,17	0,47	6,64
Hace 2 semanas	23,28	4,19	16,70	2,01	22,14	4,53	12,89	2,27	2,11	0,47	2,07	0,50	6,84
Hace 1 semana	23,25	4,77	16,01	2,46	22,57	4,44	12,42	2,21	2,06	0,50	2,03	0,46	6,83
Actual	23,56	4,09	16,49	2,03	22,54	4,28	12,62	2,50	2,06	0,48	2,15	0,43	6,77
Media del último trimestre	22,87	4,60	16,62	2,23	21,93	4,75	12,93	2,20	2,15	0,46	2,15	0,46	6,65
Media del último mes	23,36	4,53	16,45	2,20	22,37	4,53	12,69	2,31	2,12	0,48	2,11	0,46	6,38
Actual	23,56	4,09	16,49	2,03	22,54	4,28	12,62	2,50	2,06	0,48	2,15	0,43	6,77

Tabla 11.4. – Histórico del reparto de la potencia consumida por el motor eléctrico medidas en porcentaje respecto a la potencia total consumida por el mismo

Dado que en estos cálculos influyen muchas variables distintas, a diferencia de lo que ocurría en los históricos relacionados con los compresores, el código de colores será diferente. De esta forma, se utilizará el verde para valores mayores del 90% de su media del último trimestre, naranja para valores entre el 80 y 90% y el rojo para valores por debajo del 80%. Hay que tener en cuenta que este código rige las potencias útiles, las cuales se busca que sean lo mayores posibles. Por el contrario, las pérdidas se buscan que sean lo menores posibles, por lo que el código será el inverso. Así, se mantendrá en verde hasta un 110% de su valor medio, naranja para valores entre el 110 y el 120% y rojo para valores superiores al 120%.

Obviamente, estos valores no tienen la constancia a lo largo de las semanas que tenían los relacionados con el compresor. Aún así poseen una estabilidad aceptable como se puede apreciar en la Figura 11.6, lo que indica que no hay problemas de ningún tipo.

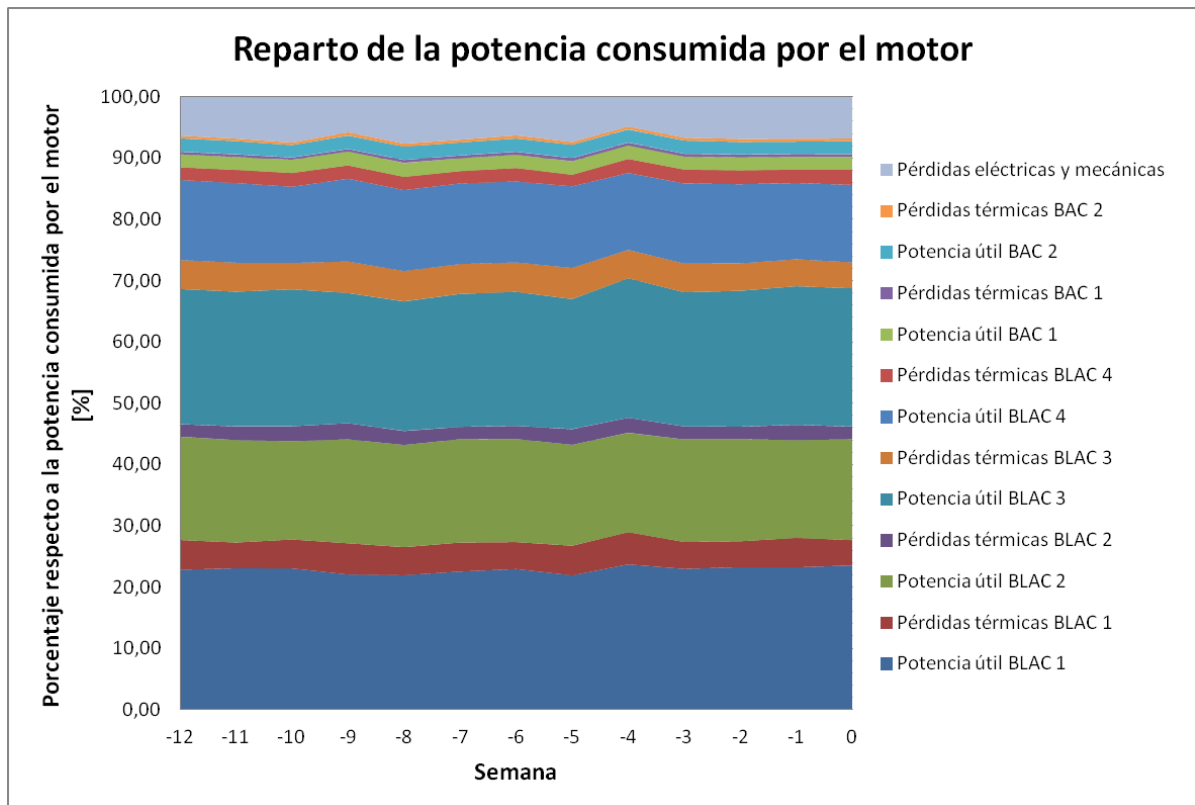


Figura 11.6. – Evolución del reparto de la potencia consumida por el motor en el último trimestre

Asimismo, en este apartado también se muestra la evolución del rendimiento global del sistema de compresión desde el punto de vista de la potencia consumida por el motor. Para ello, el programa genera la Tabla 11.5 donde muestra la potencia total consumida por el motor en kilovatios y a su derecha los porcentajes de esa potencia que son útiles y los que son pérdidas.

Seguidamente se representa la Figura 11.7, donde se comprueba cómo un poco menos del 80% de la potencia consumida por el motor se transforma en potencia útil en cualquiera de las semanas consultadas. Este dato resulta muy satisfactorio, ya que gracias a él se puede ver cómo en ningún caso este rendimiento baja del 75%, por lo que en el peor de los casos de cada 100 kW que consume el motor eléctrico, 75 kW se transforman en potencia útil y se emplean en aumentar la presión del aire en los compresores.



	Potencia consumida por el motor [kW]	Potencia útil total [%]	Pérdidas totales [%]
Hace 12 semanas	17154,98	79,17	20,83
Hace 11 semanas	17127,06	79,02	20,98
Hace 10 semanas	17762,17	78,06	21,94
Hace 9 semanas	15759,13	78,27	21,73
Hace 8 semanas	15926,63	77,40	22,60
Hace 7 semanas	16778,10	78,47	21,53
Hace 6 semanas	16575,70	79,17	20,83
Hace 5 semanas	16317,47	77,33	22,67
Hace 4 semanas	17978,53	79,67	20,33
Hace 3 semanas	16833,93	78,94	21,06
Hace 2 semanas	17378,31	79,18	20,82
Hace 1 semana	18006,45	78,34	21,66
Actual	17734,26	79,41	20,59
Media del último trimestre	17025,59	78,65	21,35
Media del último mes	17586,30	79,11	20,89
Actual	17734,26	79,41	20,59

Tabla 11.5. – Aprovechamiento de la potencia consumida por el motor en el último trimestre

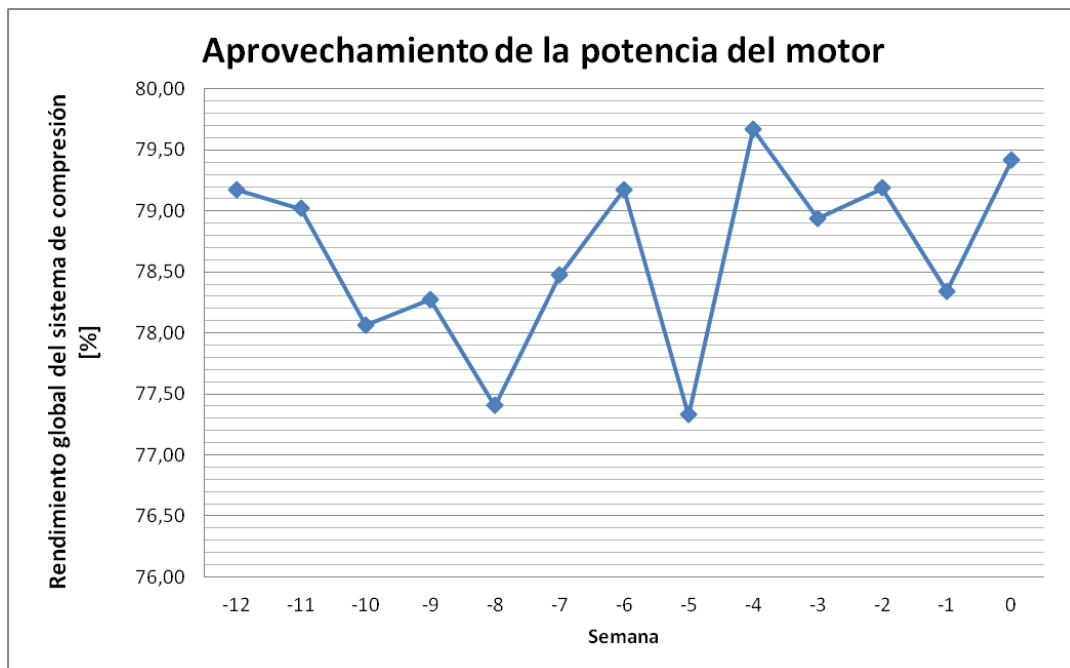


Figura 11.7. – Evolución de aprovechamiento de la potencia consumida por el motor en el trimestre



11.4.- Histórico de los intercambiadores de calor

En cuanto a los intercambiadores de calor, el programa genera el histórico de dos variables, la variación de temperatura a través del intercambiador y la caída de presión en el lado del aire. En la Tabla 11.6 y en la Tabla 11.7 se muestran estos históricos creados por la herramienta.

	IC 1		IC 2		IC 3	
	Variación temperatura	Pérdida de presión	Variación temperatura	Pérdida de presión	Variación temperatura	Pérdida de presión
Hace 12 semanas	-71,43	0,017	-58,24	0,028	-78,88	0,029
Hace 11 semanas	-72,04	0,018	-58,61	0,029	-79,37	0,033
Hace 10 semanas	-74,36	0,015	-57,63	0,033	-80,71	0,036
Hace 9 semanas	-73,63	0,015	-60,32	0,025	-77,41	0,033
Hace 8 semanas	-75,21	0,013	-60,07	0,029	-78,14	0,037
Hace 7 semanas	-72,77	0,016	-58,49	0,027	-77,90	0,030
Hace 6 semanas	-74,48	0,017	-58,85	0,026	-79,37	0,030
Hace 5 semanas	-75,95	0,018	-60,56	0,026	-77,29	0,035
Hace 4 semanas	-77,05	0,019	-57,51	0,031	-81,56	0,034
Hace 3 semanas	-72,41	0,013	-58,61	0,029	-79,61	0,029
Hace 2 semanas	-74,85	0,012	-57,88	0,033	-79,12	0,030
Hace 1 semana	-74,60	0,016	-57,26	0,033	-81,81	0,032
Actual	-73,26	0,016	-57,51	0,031	-80,59	0,034
Media del último trimestre	-74,00	0,016	-58,58	0,029	-79,37	0,033
Media del último mes	-74,43	0,015	-57,75	0,031	-80,54	0,032
Actual	-73,26	0,016	-57,51	0,031	-80,59	0,034

Tabla 11.6. – Histórico de variaciones de temperatura (en °C) y pérdidas de presión (en bar) en intercambiadores del último trimestre (intercambiadores IC 1, IC 2 e IC 3)



	DCA		IC 4		Aftercooler del BAC	
	Variación temperatura	Pérdida de presión	Variación temperatura	Pérdida de presión	Variación temperatura	Pérdida de presión
Hace 12 semanas	-67,16	0,152	-14,77	0,013	-33,94	0,050
Hace 11 semanas	-67,16	0,146	-15,14	0,014	-34,43	0,050
Hace 10 semanas	-69,72	0,162	-13,80	0,013	-32,97	0,050
Hace 9 semanas	-65,81	0,127	-18,68	0,011	-36,87	0,050
Hace 8 semanas	-67,64	0,098	-18,32	0,009	-36,63	0,050
Hace 7 semanas	-66,91	0,108	-16,36	0,011	-35,16	0,050
Hace 6 semanas	-68,13	0,102	-16,00	0,011	-34,80	0,050
Hace 5 semanas	-65,32	0,137	-18,56	0,011	-36,39	0,050
Hace 4 semanas	-70,57	0,137	-14,77	0,015	-33,70	0,050
Hace 3 semanas	-68,74	0,102	-15,26	0,012	-34,31	0,050
Hace 2 semanas	-68,50	0,165	-14,90	0,013	-33,94	0,050
Hace 1 semana	-71,79	0,178	-12,94	0,014	-32,60	0,050
Actual	-68,86	0,159	-14,16	0,013	-33,82	0,050
Media del último trimestre	-68,18	0,136	-15,67	0,012	-34,58	0,050
Media del último mes	-69,69	0,148	-14,41	0,013	-33,68	0,050
Actual	-68,86	0,159	-14,16	0,013	-33,82	0,050

Tabla 11.7. - Histórico de variaciones de temperatura (en °C) y pérdidas de presión (en bar) en intercambiadores del último trimestre (DCA, IC 4 y aftercooler del BAC)

A diferencia de los casos anteriores en estos históricos sí aparecen valores en rojo, concretamente en las pérdidas de presión en el DCA y en intercambiador de calor del BAC (IC 4).

En el segundo caso, no tuvo mayor importancia ya que debido a que son diferencias de presión muy pequeñas (del orden del milibar), en cuanto se desvía ligeramente del valor medio cambia el color de la celda. Además se puede apreciar cómo fue algo puntual, ya que justo en el periodo siguiente ya estaba otra vez en verde.

No ocurre lo mismo con el DCA, donde se ha repetido en los últimos tres periodos, siendo dos de color rojo y otro naranja. Ciertamente es que al principio del tiempo de análisis ya se alcanzaron valores similares (hace 10 semanas marcó unas pérdidas de presión de 0,162 bar) y en los periodos siguientes bajo notablemente hasta valores en torno a 0,09-0,10 bar. No obstante, sería conveniente saber qué es lo que ocurrió exactamente, si es que tuvo algún problema que se arregló y ahora vuelve a fallar o simplemente se trata de una oscilación normal del equipo. Este intercambiador, a diferencia de los demás que son de tipo carcasa-tubos, este es de contacto directo, esto puede ser una de las razones de estas oscilaciones, ya que una mayor corriente de agua a contracorriente podría ser la causa de este aumento de las pérdidas de presión en el equipo.

Para facilitar su comparación estos históricos también se representan de forma gráfica como se recoge en la Figura 11.8 y en la Figura 11.9.

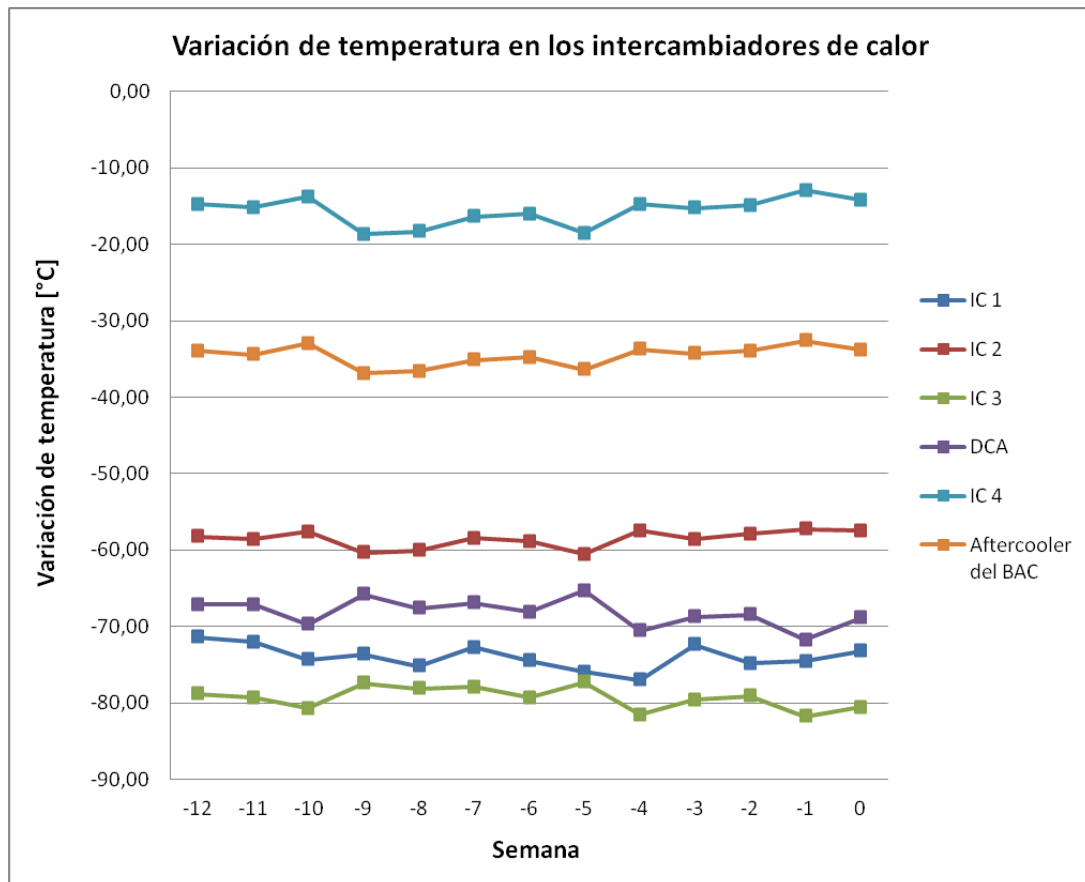


Figura 11.8. – Evolución de la variación de temperatura en los intercambiadores en el último trimestre

Como ya se comentó en el análisis de resultados, lo más destacable es la diferencia de variación de temperatura que hay entre los intercambiadores del lado de aire húmedo y los del lado de aire seco, lo cual se puede comprobar cómo no era algo puntual, sino que se mantiene a lo largo del tiempo.

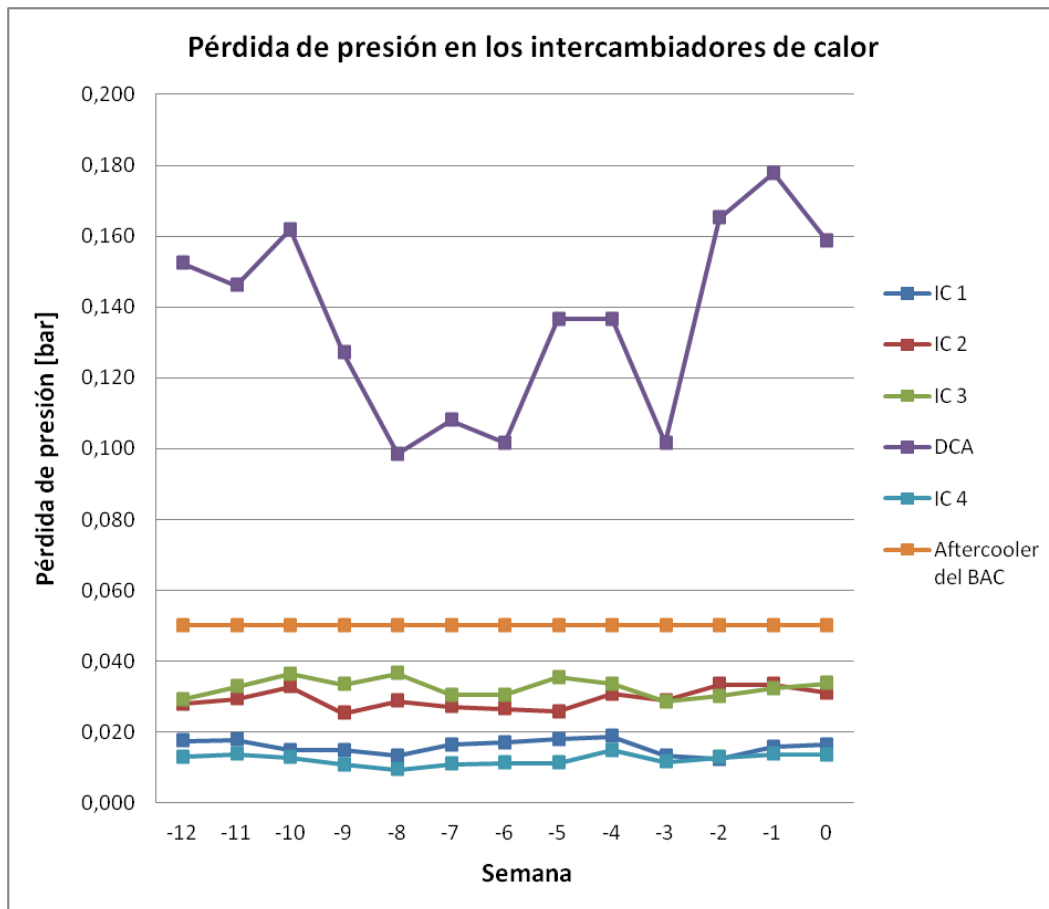


Figura 11.9. – Evolución de las pérdidas de presión en los intercambiadores en el último trimestre

En cuanto a las pérdidas de presión, resaltar lo comentado anteriormente, que aquí se puede ver claramente. El único intercambiador de contacto directo, el DCA, es el mayores pérdidas de presión tiene muy por encima del resto de intercambiadores.

11.5.- Histórico de los demás elementos

Para concluir los históricos de los diferentes elementos, se muestran los de los dos filtros de aspiración de los compresores y el del conjunto formado por los prepurificadores y el filtro de polvo. En la Tabla 11.8 y en la Figura 11.10 se muestran los históricos de las pérdidas de presión en estos elementos.



	Filtro de aspiración del BLAC	Prepurificadores y filtro de polvo	Filtro de aspiración del BAC
Hace 12 semanas	0,008	0,178	0,220
Hace 11 semanas	0,008	0,171	0,194
Hace 10 semanas	0,007	0,178	0,174
Hace 9 semanas	0,007	0,156	0,274
Hace 8 semanas	0,007	0,187	0,226
Hace 7 semanas	0,008	0,210	0,107
Hace 6 semanas	0,008	0,197	0,164
Hace 5 semanas	0,007	0,159	0,288
Hace 4 semanas	0,008	0,222	0,221
Hace 3 semanas	0,006	0,210	0,147
Hace 2 semanas	0,007	0,178	0,184
Hace 1 semana	0,008	0,165	0,177
Actual	0,008	0,184	0,102
Media del último trimestre	0,007	0,184	0,191
Media del último mes	0,007	0,192	0,166
Actual	0,008	0,184	0,102

Tabla 11.8. – Histórico de las pérdidas de presión (en bar) de los dos filtros de aspiración de los compresores y del conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo en el trimestre

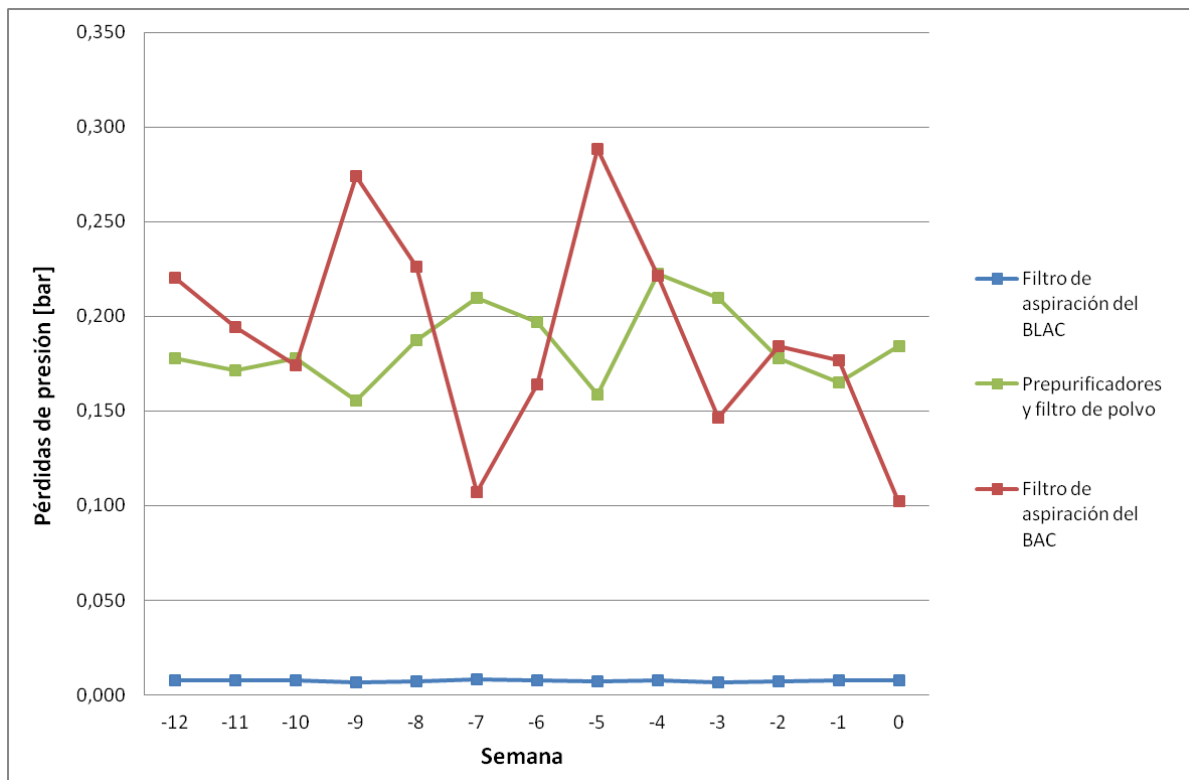


Figura 11.10. – Evolución de las pérdidas de carga en los filtros y en el conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo en el último trimestre



Con estos resultados se puede ver cómo cada uno de ellos sigue un comportamiento diferente. Así, mientras el filtro de aspiración del BLAC tiene unas pérdidas muy bajas (7 mbar aproximadamente), los otros dos tienen unas pérdidas bastante más considerables.

El conjunto formado por los prepurificadores y el filtro de polvo tienen unas pérdidas de presión que se ubican en torno a 0,18 bar, pero con bastantes oscilaciones alcanzando valores tanto de 0,15 bar por debajo como de 0,2 bar por arriba. La magnitud de este valor se debe a que aquí se está suponiendo como un bloque pero en realidad son dos equipos, el prepurificador y el filtro de polvo, incluso en algunos casos tres, si están trabajando ambos prepurificadores simultáneamente. Precisamente estos diferentes ciclos de funcionamiento de los prepurificadores serán los que provoquen estas variaciones en las pérdidas de carga, ya que por ejemplo las pérdidas serán mayores cuando alguno de ellos se encuentre en fase de despresurización o de represurización.

En cuanto al filtro de aspiración del BAC se puede observar cómo posee unas pérdidas de carga relativamente grandes, bastantes mayores de lo esperado si se compara con el de aspiración del BLAC por ejemplo. Esto probablemente se deba al error que conlleva el valor de la presión en su descarga. En este punto es donde está ubicado el sensor PI 594, el cual como no genera una señal eléctrica para mandar al PLC, se calculó aproximándolo en función de otros sensores y de las pérdidas de carga en el aftercooler del BAC, las cuales como no se pueden conocer con exactitud se supusieron las de diseño que eran de 0,05 bar. De esta aproximación que hubo que hacer probablemente vengan estas fuertes variaciones, ya que se está suponiendo un comportamiento demasiado ideal de ese intercambiador, lo que si se compara con los demás intercambiadores se observa que no ocurre así, ya que tienen una cierta oscilación en el valor de sus pérdidas de presión.

11.6.- Histórico de los indicadores del sistema

El histórico de estos indicadores es una parte fundamental de la herramienta, ya que no todos son un rendimiento por sí mismo, que se pueda ver la calidad de estos respecto a su cercanía al 100%.

Por eso para el análisis de la mayoría es muy importante contar con este histórico de valores que permita seguir el correcto desarrollo de la planta, lo cual se traducirá en una estabilidad de los valores de estos indicadores.

11.6.1.- Rendimiento electromecánico del sistema

El primero de los indicadores que se muestran en el histórico es el del rendimiento electromecánico del sistema, el cual indica la relación que hay entre la potencia aportada al aire en las etapas de compresión y la potencia consumida por el motor eléctrico. En la



Tabla 11.9 y en la Figura 11.11 se puede apreciar la evolución de este indicador en el último trimestre.

En cuanto al código de colores para las casillas será para todos los indicadores igual, a excepción del segundo de ellos. En el resto, se sombreadrá la celda en verde siempre que su valor se encuentre por encima del 95% del valor medio, en naranja si se encuentra entre 90 y 95% y si desciende por debajo del 90% del valor medio quedará en rojo.

Rendimiento electromecánico del sistema de compresión	
Hace 12 semanas	93,69
Hace 11 semanas	93,21
Hace 10 semanas	92,56
Hace 9 semanas	94,23
Hace 8 semanas	92,39
Hace 7 semanas	93,03
Hace 6 semanas	93,74
Hace 5 semanas	92,65
Hace 4 semanas	95,17
Hace 3 semanas	93,36
Hace 2 semanas	93,16
Hace 1 semana	93,17
Actual	93,23
Media del último trimestre	93,35
Media del último mes	93,62
Actual	93,23

Tabla 11.9. – Histórico del indicador del rendimiento electromecánico del sistema de compresión

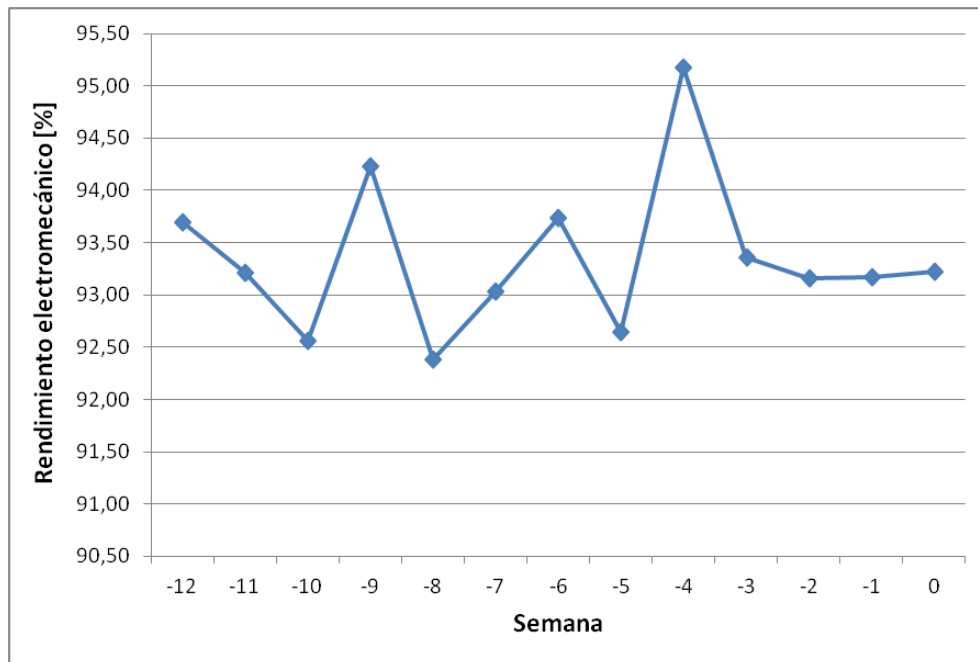


Figura 11.11. – Evolución del rendimiento electromecánico del sistema de compresión en el trimestre

En ellas se puede apreciar cómo este indicador marca un valor muy estable a lo largo del tiempo, encontrándose todos sus valores entre el 92,5 y el 94 %, a excepción de uno que supera el 95 %. Esto sirve para comprobar el buen estado tanto del motor eléctrico como de los engranajes que forman el sistema de transmisión, ya que las pérdidas mecánicas y eléctricas se sitúan en torno al 5-8 %, lo cual son unos valores más que aceptables.

11.6.2.- Relación entre la potencia del aire de salida y la del aire de entrada

Este indicador relaciona la potencia total de las corrientes de aire de salida del sistema (la de baja presión y la de alta presión) con la potencia de la corriente de aire de entrada.

El programa recoge el histórico de este indicador de dos formas las cuales se muestran a continuación en la Tabla 11.10 y en la Figura 11.12.



Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia del aire de entrada	
Hace 12 semanas	40,32
Hace 11 semanas	37,22
Hace 10 semanas	31,82
Hace 9 semanas	43,70
Hace 8 semanas	39,50
Hace 7 semanas	38,19
Hace 6 semanas	35,70
Hace 5 semanas	47,42
Hace 4 semanas	29,14
Hace 3 semanas	35,00
Hace 2 semanas	35,06
Hace 1 semana	28,78
Actual	32,08
Media del último trimestre	36,46
Media del último mes	32,01
Actual	32,08

Tabla 11.10. – Histórico del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la del aire de entrada

Como ya se comentó cuando se explicó el código de colores del indicador anterior, éste posee un código diferente al resto de indicadores. De esta manera, éste sombrará la celda en verde siempre que se mantenga por encima del 90 % de su valor medio, entre el 80 y 90 % lo hará en naranja y por debajo del 80 % lo hará en rojo. La razón de este cambio se debe a que debido a la gran variabilidad de este indicador, el cual posee un rango de oscilación bastante amplio (entre el 30 y el 45 % aproximadamente).

Este gran rango de oscilación puede deberse a la falta de un sensor que mida la presión ambiental, la cual hubo que suponer como un valor aproximado de 101325 Pa. Hay que tener en cuenta que la potencia del aire de entrada viene determinada por la entalpía del aire en condiciones ambientales y ésta a su vez por la presión ambiental. Por tanto, cualquier error en la presión ambiental acabará influyendo en este indicador.

No obstante, esta influencia no es tan grande como para producir estas oscilaciones, ya que aunque se tomase el valor real de la presión no sufriría un cambio muy significativo. Para corroborarlo se hicieron pruebas en las semanas donde el indicador poseía sus valores mínimos, sustituyendo el valor de la presión atmosférica de 101325 Pa por el valor máximo de Gijón que es de 103530 Pa, y con ello el aumento en el valor del indicador no alcanzó ni el 1%.

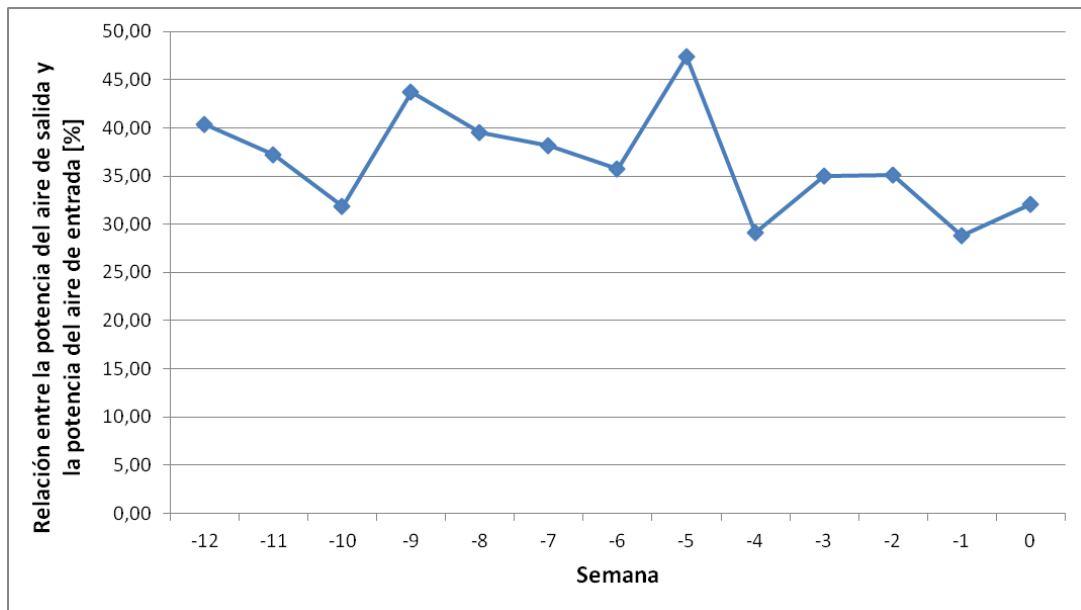


Figura 11.12. – Evolución del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la del aire de entrada en el último trimestre

11.6.3.- Relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada y consumida por el motor

Este indicador relaciona la potencia total de las corrientes de aire de salida del sistema (la de baja presión y la de alta presión) con la suma de la potencia de la corriente de aire de entrada más la consumida por el motor. En la Tabla 11.11 y en la Figura 11.13 se recogen tanto la tabla como la gráfica generadas por el programa para mostrar el histórico de este indicador.



Relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada y la consumida por el motor	
Hace 12 semanas	3,74
Hace 11 semanas	3,84
Hace 10 semanas	3,98
Hace 9 semanas	3,67
Hace 8 semanas	3,94
Hace 7 semanas	3,84
Hace 6 semanas	4,10
Hace 5 semanas	3,71
Hace 4 semanas	4,26
Hace 3 semanas	4,05
Hace 2 semanas	3,92
Hace 1 semana	3,97
Actual	3,97
Media del último trimestre	3,92
Media del último mes	4,03
Actual	3,97

Tabla 11.11. – Histórico del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada más la consumida por el motor

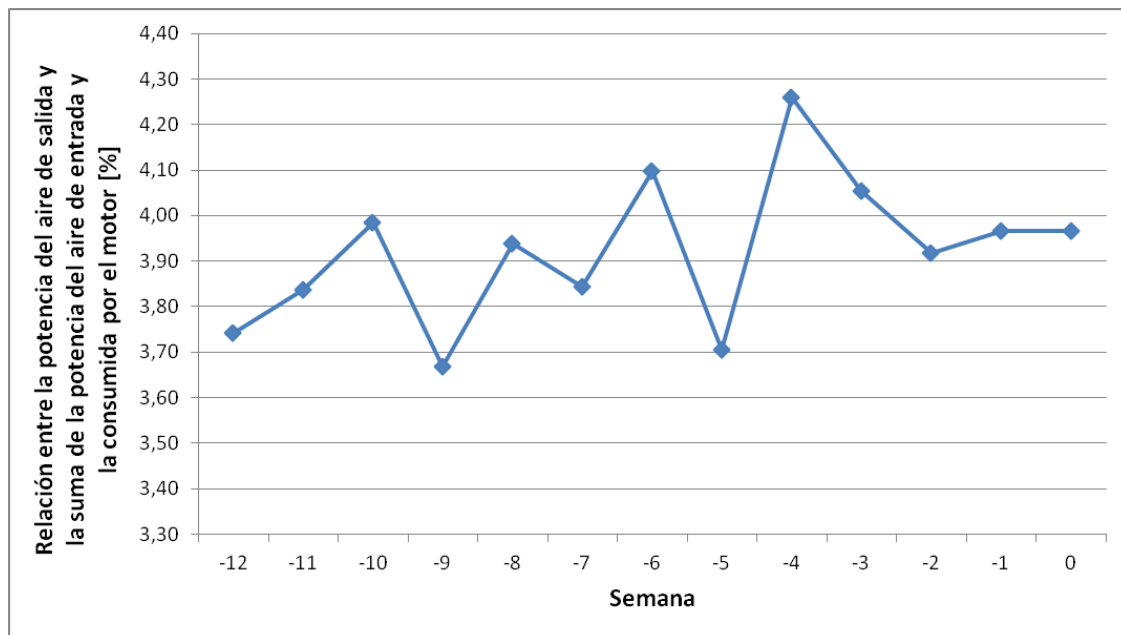


Figura 11.13. – Evolución del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la suma de la potencia del aire de entrada y la consumida por el motor.



11.6.4.- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia consumida por el motor eléctrico

Este indicador, el cual relaciona la potencia del aire de salida con la potencia consumida por el motor eléctrico, genera los históricos que se muestran en la Tabla 11.12 y en la Figura 11.14.

Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia consumida por el motor eléctrico	
Hace 12 semanas	90,75
Hace 11 semanas	90,40
Hace 10 semanas	89,16
Hace 9 semanas	90,97
Hace 8 semanas	89,45
Hace 7 semanas	90,67
Hace 6 semanas	90,74
Hace 5 semanas	89,58
Hace 4 semanas	90,77
Hace 3 semanas	90,42
Hace 2 semanas	90,50
Hace 1 semana	88,88
Actual	90,45
Media del último trimestre	90,21
Media del último mes	90,21
Actual	90,45

Tabla 11.12. – Histórico del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la potencia consumida por el motor

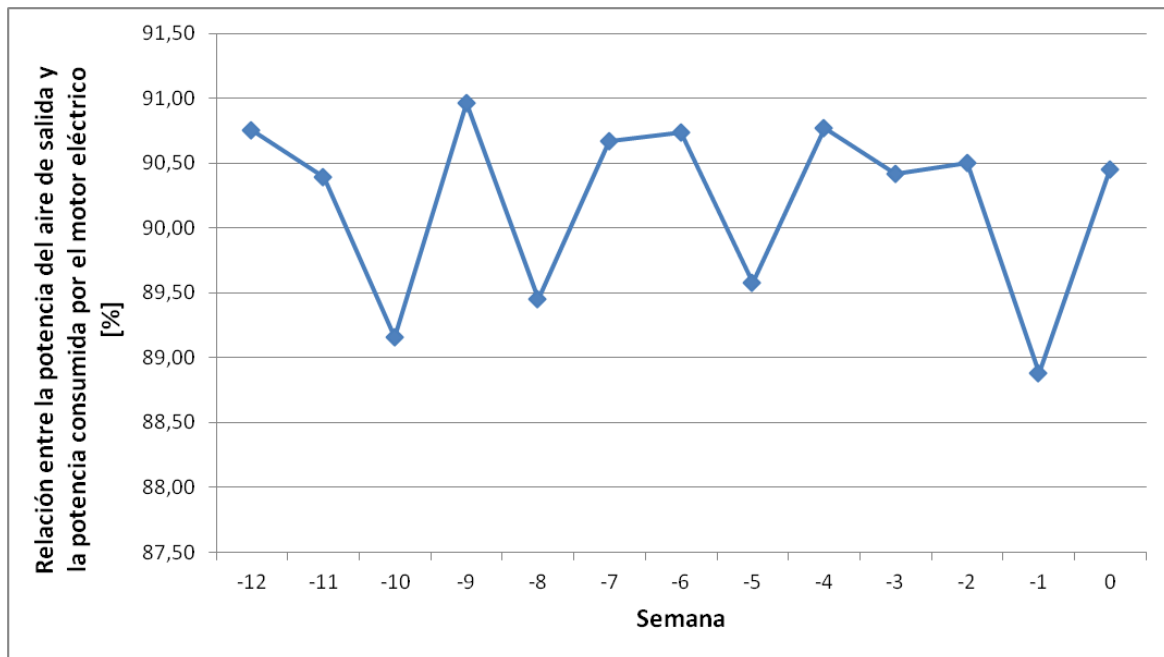


Figura 11.14. – Evolución del indicador de la relación entre la potencia de salida del aire y la consumida por el motor

Como se puede apreciar en la Figura 11.14 este indicador se encuentra muy estabilizado en valores entre el 89 y el 91%. Como ya se comentó anteriormente, este indicador no es un rendimiento propiamente dicho por lo que no hay que buscar que sea cercano al 100%. Así, mientras se encuentre en torno a estos valores querrá decir que la instalación está funcionando correctamente, mientras que si se produce un valor, por ejemplo, del 80%, será un mal resultado ya que implica un fuerte descenso respecto a su valor habitual.

11.6.5.- Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia aportada al sistema en todos sus equipos

Este indicador, el cual relaciona la potencia del aire de salida frente a la potencia aportada en sus equipos (compresores y prepurificadores) muestra una estabilidad similar a los indicadores anteriores como se puede ver en la Tabla 11.13 y en la Figura 11.15, encontrándose sus valores entre el 94,5 y el 97%.



Relación entre la potencia del aire de salida y la potencia aportada al sistema en todos sus equipos	
Hace 12 semanas	96,29
Hace 11 semanas	96,38
Hace 10 semanas	95,72
Hace 9 semanas	95,94
Hace 8 semanas	95,95
Hace 7 semanas	96,82
Hace 6 semanas	96,06
Hace 5 semanas	96,18
Hace 4 semanas	94,47
Hace 3 semanas	96,24
Hace 2 semanas	96,51
Hace 1 semana	94,78
Actual	96,44
Media del último trimestre	95,98
Media del último mes	95,69
Actual	96,44

Tabla 11.13. – Histórico del indicador de la relación de la potencia del aire de salida y la potencia aportada en todos sus equipos

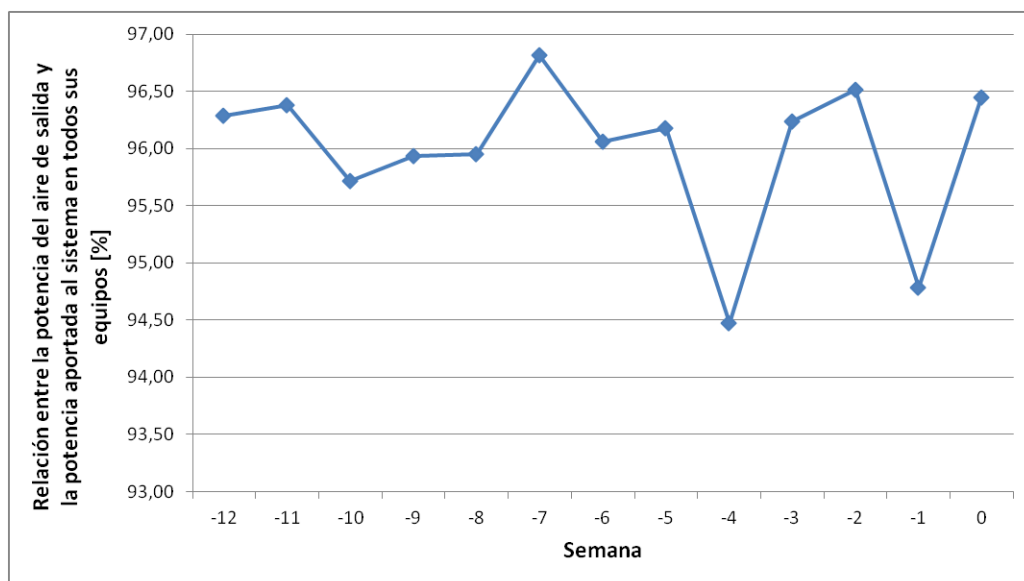


Figura 11.15. – Evolución del indicador de la relación entre la potencia del aire de salida y la potencia aportada en todos sus equipos

11.6.6.- Relación entre la potencia aportada y perdida en los equipos del sistema

Como ya se comentó en la parte de resultados y ahora se corrobora en la Tabla 11.14 y en la Figura 11.16, este indicador siempre sale menor del 100% en cualquiera que sea la



semana observada, lo que indica siempre es mayor la potencia que le quitan al aire los equipos como los intercambiadores de calor o los filtros que la que le aportan los compresores y los prepurificadores. Así este indicador suele encontrarse en torno al 90% aproximadamente.

Relación entre la potencia aportada y perdida en los equipos del sistema	
Hace 12 semanas	93,74
Hace 11 semanas	92,69
Hace 10 semanas	90,36
Hace 9 semanas	94,65
Hace 8 semanas	93,11
Hace 7 semanas	92,95
Hace 6 semanas	91,72
Hace 5 semanas	95,24
Hace 4 semanas	88,64
Hace 3 semanas	91,53
Hace 2 semanas	91,83
Hace 1 semana	89,03
Actual	90,58
Media del último trimestre	92,00
Media del último mes	90,32
Actual	90,58

Tabla 11.14. – Histórico del indicador de la relación entre la potencia aportada y la perdida en los equipos del sistema

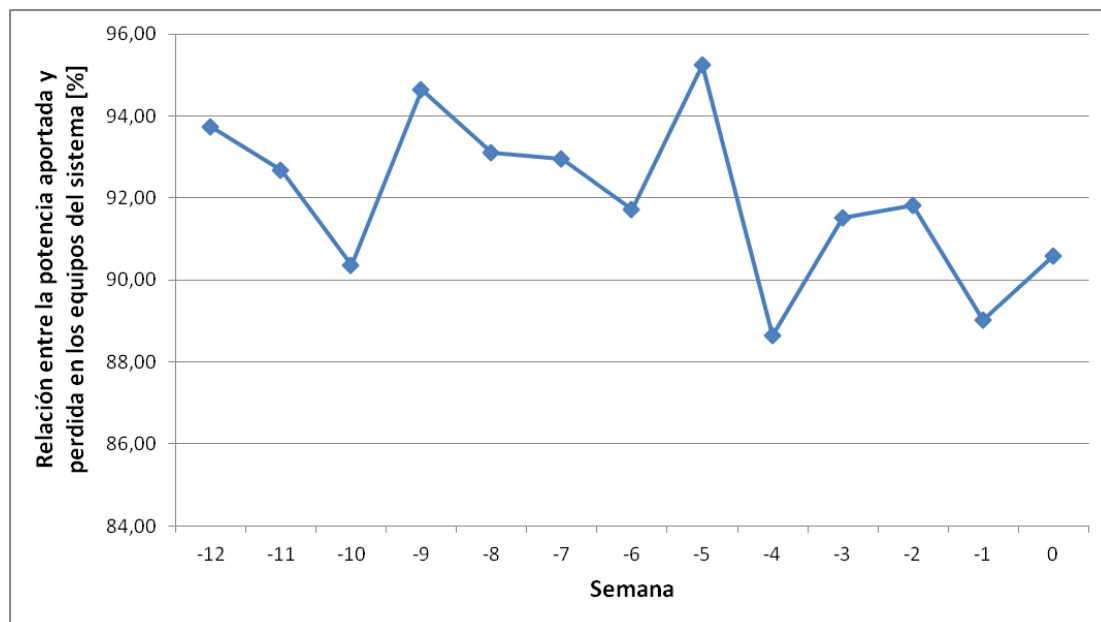


Figura 11.16. – Evolución del indicador de la relación entre la potencia aportada y la perdida en los equipos del sistema



11.6.7.- Rendimiento isentrópico conjunto de los 6 compresores

Este indicador que representa el rendimiento isentrópico conjunto de las 6 etapas de compresión como el producto de los rendimientos individuales de cada uno, es una buena forma de observar el sistema de compresión de manera global. Como se recoge en la Tabla 11.15 y en la Figura 11.17 generadas por el sistema este rendimiento conjunto se encuentra entre el 33,5 y el 36,5 %

Rendimiento isentrópico conjunto de los 6 compresores	
Hace 12 semanas	36,64
Hace 11 semanas	36,32
Hace 10 semanas	35,87
Hace 9 semanas	33,64
Hace 8 semanas	33,83
Hace 7 semanas	35,32
Hace 6 semanas	34,22
Hace 5 semanas	33,71
Hace 4 semanas	34,45
Hace 3 semanas	34,93
Hace 2 semanas	35,15
Hace 1 semana	33,52
Actual	36,00
Media del último trimestre	34,89
Media del último mes	34,81
Actual	36,00

Tabla 11.15. – Histórico del rendimiento isentrópico conjunto de las 6 etapas de compresión

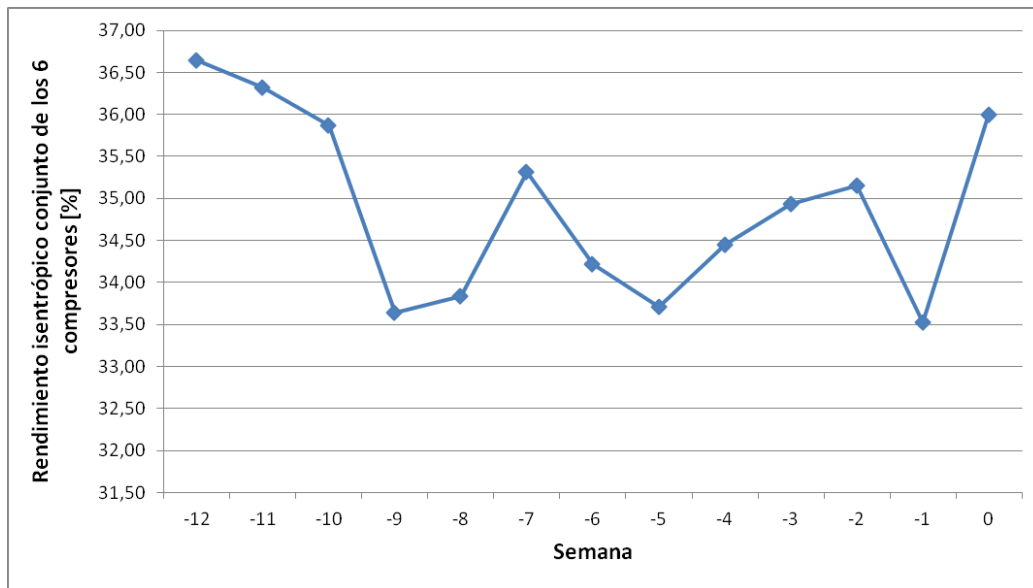


Figura 11.17. – Evolución del rendimiento isentrópico conjunto de las 6 etapas de compresión



12.- COMPROBACIÓN DE FUNCIONAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Para comprobar el funcionamiento de la herramienta diseñada fueron muchas las pruebas que se hicieron en la empresa en diferentes momentos para ver cuál era el comportamiento de la misma en función de los diferentes valores de los sensores.

Gracias a ellas se comprobó que el funcionamiento final del programa después de varios meses de trabajo y varias modificaciones es el adecuado. Una buena demostración de este nivel de precisión alcanzado es el mínimo error que resulta al efectuar el balance de energía del sistema, los cuales nunca sobrepasaron el 0,5% de error entre la potencia entrante al sistema y la saliente, quedando patente el buen funcionamiento de una de las partes más delicadas del programa como eran las interpolaciones en las tablas de propiedades del aire.

No obstante, cabe recordar que este programa sólo está diseñado para el funcionamiento normal de la planta (pueden ser diferentes capacidades, no tiene por qué ser una fija), pero no así para los periodos de arranque de la misma, ya que entonces influirían otras partes de la instalación que no entraban dentro del alcance de este proyecto.

Aunque en esta memoria se ha explicado la versión final del programa para no confundir al lector, ha habido versiones anteriores del mismo, las cuales se han ido modificando. Estas modificaciones se debían principalmente a dos razones. La primera era la de solventar errores o funcionamientos extraños del mismo. La segunda fue la de ir optimizando y simplificando la herramienta, con el fin de obtener un funcionamiento fluido de la misma. Así por ejemplo, las primeras tablas de las propiedades del aire que se elaboraron tenían un rango mayor de alcance, llegando hasta 25 barA, lo cual en estas pruebas se vio que era completamente innecesario ya que el margen de seguridad que se había dejado era excesivo y se decidió reducirlo a 23 barA.

Asimismo, también se redujeron notablemente el número de hojas de cálculo, ya que en las primeras versiones cada uno de los apartados de la hoja de “estado de funcionamiento” (lectura de sensores, cálculos, resultados, etc) aparecían en una hoja de cálculo diferente, lo cual se vio que era inviable cuando se decidió ampliar el estudio a instantes del pasado, para elaborar un histórico del sistema.

Con todo ello se llegó a la versión final del programa que es el archivo que se entrega anexo a esta memoria. Sin embargo, dado que el lector probablemente no tenga la posibilidad de conectar su ordenador a la red interna de Praxair no podrá disponer de las



lecturas de los sensores, provocando que en todas esas casillas se muestre el error “#¿NOMBRE?”.

Para solventar este contratiempo, se entrega también un archivo con la versión final del programa, pero que incluyendo los valores de los sensores a día del 3 de Julio y hora 10:00 en el estado actual y los correspondientes en las semanas anteriores. No obstante, esta versión no sería operativa ya que para que el lector pueda visualizar estos valores desde cualquier ordenador se han tenido que pegar los mismos en las correspondientes celdas. Solamente se han pegado el valor de lectura de los sensores, mientras que se han dejado el resto de las celdas como son en la versión real para que el lector pueda ver las operaciones que se realizan si así lo desea.



13.- CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

13.1.- Conclusiones

Una vez terminado el estudio y obtenidos los resultados es hora de hacer unas valoraciones generales, así como extraer unas conclusiones del mismo.

Lo primero decir que el estudio se ha completado satisfactoriamente, alcanzando todos los puntos propuestos en el alcance del proyecto y con un nivel de error mejor aún de lo esperado como se pudo comprobar con el balance de energía llevado a cabo.

En cuanto a las conclusiones del proyecto se pueden sacar varias y de muy diversa índole. Empezando por el sistema de compresión en sí mismo se comprobó cómo el rendimiento isentrópico de todas sus etapas rondaba entre el 80 y el 85 %, lo cual era lo esperable para unos compresores de tipo centrífugo, por lo que está bastante bien.

Asimismo analizando el sistema motriz que mueve estos compresores, formado por un motor eléctrico y una transmisión de engranajes, se comprobó cómo posee unos rendimientos muy buenos. De esta forma, sólo un 7 % aproximadamente de la potencia que consume el motor se pierde en forma de pérdidas eléctricas y mecánicas, mientras que el 93 % restante llega a los compresores. Teniendo en cuenta tanto el rendimiento electromecánico del sistema motriz como el rendimiento isentrópico de los compresores, se obtiene un rendimiento global del sistema de compresión cercano al 80 %, lo cual es sumamente bueno, ya que esto implica que por cada 100 kW que el motor consume de la red eléctrica, unos 80 kW se transforman en potencia útil en los compresores y se utilizan para incrementar la presión del fluido, en este caso, aire.

Saliendo de los compresores y analizando el resto de los equipos se encontraron varias curiosidades. La más llamativa de todas es la gran cantidad de energía que se desperdicia en los intercambiadores de calor. Por un lado llega el aire caliente con gran cantidad de energía, mientras que por el otro extremo sale una corriente de aire frío después de intercambiar energía con el agua de refrigeración, el cual sale del intercambiador caliente y con gran cantidad de energía. De esta forma, en los intercambiadores de calor se pierden unos 17000 kW aproximadamente que se salen del sistema acompañando al agua de refrigeración y al de los drenajes, lo cual es excesivamente alto, ya que es casi la potencia del motor.

Desgraciadamente, esta energía térmica que lleva el agua se desperdicia completamente, ya que en la torre de refrigeración se enfría este agua mediante convección



forzada con el aire, lo que provoca que al final toda esta energía térmica acabe desaprovechándose en calentar el aire ambiental.

Una buena forma de combatir este fenómeno y darle algún uso a esta gran cantidad de energía térmica del agua que se desperdicia sería la de implantar algún tipo de sistema de cogeneración. De esta manera, aparte de aprovechar la energía del aire comprimido, se aprovecharía la energía térmica de este agua, ya fuese en la propia planta o en alguna de las empresas colindantes. Por ejemplo, una opción para aprovecharla en la propia planta estudiada sería usar esta corriente de agua caliente para precalentar el nitrógeno con el que se regeneran los prepurificadores, antes de pasar por el horno de regeneración, lo que implicaría un menor consumo de gas, ya que el nitrógeno ya llegaría a una temperatura superior, redundando finalmente en un cierto ahorro a nivel económico.

13.2.- Trabajos futuros

Para continuar este proyecto existen principalmente dos vías. Así se podría hablar de una ampliación transversal, es decir, ampliar el estudio hacia los sistemas de compresión de otras plantas, o también cabría la posibilidad de una ampliación longitudinal, es decir, continuar analizando el proceso de la planta de Gijón III aguas abajo del sistema de compresión y purificación de aire.

La primera de las opciones consistiría en ampliar el estudio hacia los sistemas de compresión y purificación de aire de otras plantas. Hay que tener en cuenta que ésta es una parte imprescindible en cualquier planta criogénica de separación de aire, por lo que todas cuentan con ella. Incluso en algunos casos el sistema será muy similar al ya estudiado. Por ejemplo, el sistema de compresión de aire de la planta de Praxair en Tabaza es muy similar al estudiado, por lo que simplemente con unas ligeras modificaciones podría aprovecharse gran parte del programa diseñado.

La segunda opción consistiría en continuar analizando el proceso de separación de aire que se lleva a cabo en la planta de Gijón III, aguas abajo del sistema de compresión y purificación de aire, que es donde se dejó. De esta forma, se podría analizar el rendimiento tanto de los demás compresores de la instalación (los de oxígeno BOC y los de nitrógeno BLNC) como de la turbina de expansión y de los intercambiadores de calor repartidos por la instalación.

Asimismo dentro de esta opción podría incluirse el perfeccionamiento del programa diseñado con alguna mejora en el estudio realizado que no se pudo hacer debido a carecer de los sensores necesarios. Por ejemplo se podrían adquirir un sensor de presión absoluta para medir la presión ambiental y registrar su dato en la casilla del Excel "P_amb" que ya se dejó preparada para ello. Otro sensor que se podría adquirir sería uno de presión relativa con un alcance de unos 15 barG para colocar en el punto donde ahora se encuentra el sensor PI 594 y que también cuenta con una casilla en Excel preparada para si un día se



compra. También sería de gran utilidad instalar unos sensores de caudal en la salida de cada uno de los prepurificadores con el objetivo de poder analizarlos individualmente mediante un balance de energía y no tener que estudiarlo como un bloque conjunto con el filtro de polvo como ahora ocurre. Incluso si se instalasen sensores de caudal en el agua de refrigeración y de temperatura a la entrada y salida del agua de los intercambiadores, podría calcularse cuál es la eficiencia real del intercambio de calor entre ambos fluidos.



14.- BIBLIOGRAFÍA

AENOR, 2001. *Norma UNE-EN ISO 10628. Diagrama de flujo de plantas de proceso. Reglas generales*. AENOR.

Fernández, F. J., 2013. *Apuntes de refrigeración y climatización*. Universidad de Oviedo.

Greene, R. W., 1990. *Compresores : selección, uso y mantenimiento*. McGraw Hill.

Mannesmann Demag S.A., 1998. *Instrucciones de servicio. Turbocompresor de cuatro etapas y con multiplicador incorporado tipo VK*.

Mannesmann Demag S.A., 1998. *Manufacturer's data book. Air compressor*.

Meteogijón, 2017. *Meteorología en Gijón*. [En línea]
Disponible en: <http://www.meteogijon.es/>

Ministerio de agricultura, pesca alimentación y medio ambiente, 2017. *Agencia Estatal de Meteorología*. [En línea]
Disponible en: <http://www.aemet.es/es/>

Ministerio de fomento, 2013. *DA DB-HE/2. Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos*. Gobierno de España.

Pizarro García, C., 2016. *Apuntes de Análisis y diseño de lo procesos químicos*. Universidad de Oviedo.

Praxair España S.L.U., 1998. *Manual de planta de Gijón III*.

Praxair España S.L.U., 1998. *P&ID de Gijón III*.

Praxair España S.L.U., 2016. *An introduction to Praxair*.

Sirgo Blanco, J. Á., 2016. *Apuntes de Ingeniería de control*. Universidad de Oviedo.

Stull, R., 2015. *Practical meteorology. An algebra-based survey of atmospheric science*. UBC.

Zubizarreta Enríquez, J. I., *Componentes del aire y tecnologías para su separación*. Universidad Politécnica de Madrid.



15.- ANEXO I: TABLAS DE PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AIRE

En este anexo se recogen todas las tablas de propiedades del aire elaboradas por el autor para integrar dentro de la herramienta diseñada. Como se puede ver en ellas, todas están medidas en unidades del SI.

Tablas del aire húmedo:

- Entalpía en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa.
- Entropía en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa.
- Temperatura en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta.

Tablas del aire seco:

- Entalpía en función de la presión y la temperatura.
- Entropía en función de la presión y la temperatura.
- Temperatura en función de la presión y la entropía.



HR = 0 %		Presión [Pa]										
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000	
Temperatura [°C]	-20	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114
	-10	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064
	20	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130
	30	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196
	40	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264
	50	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333
	60	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403
	70	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476
	80	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553
	90	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635
	100	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722
	110	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818
	120	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922
	130	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036
	140	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162
150	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	
160	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	

Tabla 15.1. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa



HR = 0 %		Presión [Pa]												
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000			
Temperatura [°C]	-20	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114
	-10	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064
	20	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130
	30	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196
	40	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264
	50	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333
	60	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403
	70	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476
	80	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553
	90	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635
	100	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722
	110	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818
	120	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922
	130	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036
	140	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162
150	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	
160	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	

Tabla 15.2. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 0 %		Presión [Pa]										
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000	1300000	1350000	1400000	1450000	1500000	
Temperatura [°C]	-20	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114
	-10	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064
	20	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130
	30	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196
	40	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264
	50	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333
	60	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403
	70	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476
	80	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553
	90	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635
	100	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722
	110	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818
	120	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922
	130	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036
	140	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162
150	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	
160	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	

Tabla 15.3. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 0 %		Presión [Pa]										
		1550000	1600000	1650000	1700000	1750000	1800000	1850000	1900000	1950000	2000000	
Temperatura [°C]	-20	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114
	-10	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064	10064
	20	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130	20130
	30	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196	30196
	40	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264	40264
	50	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333	50333
	60	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403	60403
	70	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476	70476
	80	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553	80553
	90	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635	90635
	100	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722	100722
	110	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818	110818
	120	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922	120922
	130	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036	131036
	140	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162	141162
150	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	151300	
160	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	161452	

Tabla 15.4. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 0 %		Presión [Pa]					
		2050000	2100000	2150000	2200000	2250000	2300000
Temperatura [°C]	-20	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114	-20114
	-10	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060	-10060
	0	0	0	0	0	0	0
	10	10064	10064	10064	10064	10064	10064
	20	20130	20130	20130	20130	20130	20130
	30	30196	30196	30196	30196	30196	30196
	40	40264	40264	40264	40264	40264	40264
	50	50333	50333	50333	50333	50333	50333
	60	60403	60403	60403	60403	60403	60403
	70	70476	70476	70476	70476	70476	70476
	80	80553	80553	80553	80553	80553	80553
	90	90635	90635	90635	90635	90635	90635
	100	100722	100722	100722	100722	100722	100722
	110	110818	110818	110818	110818	110818	110818
	120	120922	120922	120922	120922	120922	120922
	130	131036	131036	131036	131036	131036	131036
	140	141162	141162	141162	141162	141162	141162
150	151300	151300	151300	151300	151300	151300	
160	161452	161452	161452	161452	161452	161452	

Tabla 15.5. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 10 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	-19798	-19956	-20009	-20035	-20051	-20061	-20069	-20075	-20079	-20083
	-10	-9257	-9659	-9793	-9860	-9900	-9926	-9946	-9960	-9971	-9980
	0	1904	951,3	634,1	475,5	380,4	317	271,7	237,7	211,3	190,2
	10	13922	11990	11348	11027	10834	10706	10614	10545	10492	10449
	20	27548	23830	22595	21978	21608	21361	21185	21053	20950	20868
	30	43813	36976	34709	33579	32901	32450	32127	31886	31698	31548
	40	64261	52173	48184	46196	45006	44214	43649	43225	42895	42632
	50	91160	70491	63716	60349	58336	56996	56041	55325	54769	54324
	60	127829	93430	82273	76750	73454	71265	69704	68536	67628	66903
	70	179194	123084	105176	96363	91120	87644	85169	83318	81881	80733
	80	252788	162384	134216	120475	112336	106954	103130	100274	98060	96292
	90	360759	215502	171837	150798	138418	130263	124486	120179	116844	114186
	100	524223	288574	221416	189631	171097	158958	150390	144020	139098	135181
	110	783920	391038	287760	240108	212677	194848	182331	173060	165916	160244
	120	1231000	538362	377972	306622	266276	240332	222247	208919	198690	190592
	130	2123000	758056	503113	395559	336242	298655	272705	253713	239212	227776
	140	4584000	1105000	681575	516661	428865	374344	337195	310256	289826	273801
150	34310000	1706000	946685	685705	553678	473962	420609	382397	353681	331313	
160	-	2944000	1366000	930275	725993	607480	530092	475588	435125	403897	

Tabla 15.6. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 10 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	-20085	-20088	-20090	-20092	-20093	-20094	-20096	-20097	-20098	-20098
	-10	-9987	-9993	-9998	-10003	-10007	-10010	-10013	-10016	-10018	-10020
	0	172,9	158,5	146,3	135,8	126,8	118,8	111,9	105,6	100,1	95,08
	10	10414	10385	10360	10339	10320	10304	10290	10278	10266	10256
	20	20801	20745	20698	20657	20622	20591	20564	20540	20518	20499
	30	31425	31322	31236	31161	31097	31041	30991	30947	30907	30872
	40	42416	42237	42085	41954	41842	41743	41656	41578	41509	41447
	50	53961	53658	53401	53182	52992	52825	52678	52548	52431	52326
	60	66310	65816	65398	65040	64730	64459	64220	64008	63817	63646
	70	79796	79015	78355	77790	77300	76872	76494	76159	75859	75589
	80	94849	93648	92633	91765	91012	90355	89775	89260	88799	88385
	90	112017	110214	108692	107389	106261	105276	104408	103636	102947	102327
	100	131990	129339	127103	125191	123538	122093	120821	119692	118683	117775
	110	155630	151804	148581	145827	143447	141371	139543	137921	136473	135171
	120	184021	178582	174007	170105	166737	163800	161218	158928	156885	155051
	130	218527	210892	204483	199026	194324	190230	186634	183449	180610	178062
140	260895	250277	241389	233840	227349	221707	216759	212383	208486	204994	
150	313397	298724	286488	276127	267241	259536	252791	246838	241544	236807	
160	379065	358848	342067	327917	315822	305366	296236	288196	281061	274686	

Tabla 15.7. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 10 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	-20099	-20100	-20100	-20101	-20102
	-10	-10022	-10024	-10025	-10027	-10028
	0	90,55	86,43	82,67	79,23	76,06
	10	10247	10239	10231	10224	10218
	20	20481	20465	20451	20437	20425
	30	30839	30810	30784	30759	30737
	40	41391	41339	41293	41250	41210
	50	52231	52145	52066	51993	51927
	60	63492	63351	63223	63105	62997
	70	75345	75123	74920	74734	74564
	80	88010	87670	87359	87075	86813
	90	101767	101257	100793	100367	99975
	100	116955	116211	115531	114909	114337
	110	133996	132928	131955	131063	130244
	120	153394	151891	150521	149267	148115
	130	175764	173680	171781	170044	168449
140	201846	198994	196398	194025	191847	
150	232541	228682	225172	221967	219028	
160	268957	263779	259078	254789	250861	

Tabla 15.8. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 20 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	-19481	-19798	-19903	-19956	-19988	-20009	-20024	-20035	-20044	-20051
	-10	-8453	-9257	-9525	-9659	-9739	-9793	-9831	-9860	-9882	-9900
	0	3812	1904	1269	951,3	760,9	634,1	543,4	475,5	422,7	380,4
	10	17799	13922	12634	11990	11605	11348	11164	11027	10920	10834
	20	35036	27548	25067	23830	23088	22595	22242	21978	21772	21608
	30	57665	43813	39248	36976	35615	34709	34063	33579	33202	32901
	40	88988	64261	56182	52173	49777	48184	47048	46196	45535	45006
	50	134109	91160	77323	70491	66419	63716	61790	60349	59230	58336
	60	201102	127829	104740	93430	86718	82273	79112	76750	74918	73454
	70	303415	179194	141381	123084	112293	105176	100129	96363	93446	91120
	80	465335	252788	191501	162384	145372	134216	126337	120475	115943	112336
	90	736313	360759	261422	215502	189043	171837	159752	150798	143898	138418
	100	1237000	524223	360982	288574	247686	221416	203113	189631	179286	171097
	110	2362000	783920	506522	391038	327733	287760	260226	240108	224765	212677
	120	6638000	1231000	727650	538362	439097	377972	336548	306622	283990	266276
	130	-	2123000	1085000	758056	598057	503113	440250	395559	362155	336242
140	-	4584000	1725000	1105000	833639	681575	584271	516661	466951	428865	
150	-	34310000	3125000	1706000	1204000	946685	790585	685705	610387	553678	
160	-	-	8223000	2944000	1843000	1366000	1100000	930275	812485	725993	

Tabla 15.9. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 20 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	-20057	-20061	-20065	-20069	-20072	-20075	-20077	-20079	-20081	-20083
	-10	-9914	-9926	-9937	-9946	-9953	-9960	-9966	-9971	-9976	-9980
	0	345,8	317	292,6	271,7	253,6	237,7	223,7	211,3	200,2	190,2
	10	10764	10706	10656	10614	10577	10545	10517	10492	10469	10449
	20	21473	21361	21266	21185	21115	21053	20999	20950	20907	20868
	30	32655	32450	32276	32127	31998	31886	31786	31698	31619	31548
	40	44574	44214	43910	43649	43422	43225	43050	42895	42756	42632
	50	57605	56996	56482	56041	55659	55325	55031	54769	54535	54324
	60	72259	71265	70424	69704	69081	68536	68055	67628	67246	66903
	70	89222	87644	86310	85169	84181	83318	82557	81881	81277	80733
	80	109396	106954	104893	103130	101606	100274	99101	98060	97129	96292
	90	133960	130263	127147	124486	122186	120179	118412	116844	115444	114186
	100	164455	158958	154334	150390	146987	144020	141411	139098	137035	135181
	110	202908	194848	188086	182331	177374	173060	169271	165916	162926	160244
	120	252033	240332	230549	222247	215114	208919	203489	198690	194419	190592
	130	315553	298655	284591	272705	262527	253713	246007	239212	233175	227776
	140	398751	374344	354162	337195	322732	310256	299384	289826	281357	273801
150	509438	473962	444882	420609	400044	382397	367088	353681	341843	331313	
160	659787	607480	565111	530092	500665	475588	453964	435125	418566	403897	

Tabla 15.10. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 20 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	-20084	-20085	-20087	-20088	-20089
	-10	-9984	-9987	-9990	-9993	-9996
	0	181,1	172,9	165,4	158,5	152,1
	10	10430	10414	10399	10385	10372
	20	20833	20801	20772	20745	20720
	30	31483	31425	31371	31322	31277
	40	42519	42416	42322	42237	42158
	50	54134	53961	53803	53658	53524
	60	66592	66310	66052	65816	65599
	70	80242	79796	79388	79015	78672
	80	95536	94849	94222	93648	93120
	90	113049	112017	111076	110214	109422
	100	133508	131990	130606	129339	128176
	110	157824	155630	153632	151804	150127
	120	187144	184021	181179	178582	176200
	130	222919	218527	214535	210892	207553
140	267018	260895	255340	250277	245645	
150	321886	313397	305713	298724	292341	
160	390811	379065	368464	358848	350085	

Tabla 15.11. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 30 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	-19164	-19639	-19798	-19877	-19924	-19956	-19979	-19995	-20009	-20019
	-10	-7649	-8855	-9257	-9458	-9579	-9659	-9716	-9759	-9793	-9819
	0	5725	2857	1904	1427	1142	951,3	815,3	713,4	634,1	570,6
	10	21695	15858	13922	12956	12376	11990	11715	11508	11348	11219
	20	42595	31283	27548	25687	24572	23830	23300	22903	22595	22348
	30	71758	50709	43813	40387	38338	36976	36004	35275	34709	34257
	40	114480	76531	64261	58194	54576	52173	50461	49179	48184	47388
	50	179350	112359	91160	80760	74583	70491	67580	65404	63716	62367
	60	281016	163688	127829	110453	100197	93430	88630	85048	82273	80059
	70	446711	239166	179194	150680	134015	123084	115362	109617	105176	101639
	80	734223	353186	252788	206432	179737	162384	150198	141172	134216	128693
	90	1294000	531843	360759	285282	242773	215502	196522	182551	171837	163360
	100	2688000	828574	524223	399352	331350	288574	259183	237745	221416	208565
	110	10410000	1374000	783920	569538	458729	391038	345398	312542	287760	268400
	120	-	2605000	1231000	835687	647985	538362	466488	415729	377972	348788
	130	-	7387000	2123000	1285000	943655	758056	641474	561447	503113	458704
	140	-	-	4584000	2157000	1445000	1105000	905312	774258	681575	612564
150	-	-	34310000	4426000	2431000	1706000	1331000	1101000	946685	835334	
160	-	-	-	22090000	5100000	2944000	2098000	1647000	1366000	1175000	

Tabla 15.12. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 30 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	-20028	-20035	-20041	-20046	-20051	-20055	-20058	-20061	-20064	-20067
	-10	-9841	-9860	-9875	-9888	-9900	-9910	-9919	-9926	-9933	-9940
	0	518,7	475,5	438,9	407,6	380,4	356,6	335,6	317	300,3	285,3
	10	11114	11027	10952	10889	10834	10786	10743	10706	10672	10641
	20	22146	21978	21835	21713	21608	21515	21434	21361	21296	21238
	30	33887	33579	33318	33095	32901	32732	32582	32450	32331	32224
	40	46738	46196	45739	45346	45006	44709	44447	44214	44006	43818
	50	61266	60349	59574	58911	58336	57833	57390	56996	56644	56328
	60	78253	76750	75481	74395	73454	72633	71908	71265	70689	70172
	70	98757	96363	94343	92615	91120	89815	88665	87644	86731	85911
	80	124200	120475	117335	114653	112336	110314	108533	106954	105543	104276
	90	156485	150798	146015	141937	138418	135351	132653	130263	128130	126215
	100	198187	189631	182456	176353	171097	166525	162511	158958	155791	152952
	110	252859	240108	229458	220429	212677	205949	200055	194848	190216	186068
	120	325556	306622	290895	277624	266276	256460	247886	240332	233627	227634
	130	423765	395559	372311	352820	336242	321970	309554	298655	289009	280414
	140	559182	516661	481991	453183	428865	408063	390067	374344	360489	348189
150	751332	685705	633018	589788	553678	523062	496776	473962	453975	436319	
160	1035000	930275	847522	780853	725993	680060	641040	607480	578310	552721	

Tabla 15.13. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 30 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	-20069	-20071	-20073	-20075	-20076
	-10	-9946	-9951	-9956	-9960	-9964
	0	271,7	259,3	248	237,7	228,2
	10	10614	10589	10566	10545	10526
	20	21185	21137	21093	21053	21016
	30	32127	32039	31959	31886	31818
	40	43649	43494	43354	43225	43106
	50	56041	55781	55543	55325	55125
	60	69704	69279	68891	68536	68209
	70	85169	84495	83881	83318	82800
	80	103130	102091	101143	100274	99476
	90	124486	122917	121488	120179	118977
	100	150390	148068	145954	144020	142245
	110	182331	178948	175871	173060	170481
	120	222247	217377	212954	208919	205223
	130	272705	265753	259452	253713	248466
	140	337195	327309	318373	310256	302849
150	420609	406541	393870	382397	371960	
160	530092	509938	491873	475588	460834	

Tabla 15.14. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 40 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	-18847	-19481	-19692	-19798	-19861	-19903	-19933	-19956	-19974	-19988
	-10	-6843	-8453	-8989	-9257	-9418	-9525	-9601	-9659	-9703	-9739
	0	7643	3812	2539	1904	1523	1269	1087	951,3	845,5	760,9
	10	25611	17799	15212	13922	13149	12634	12266	11990	11776	11605
	20	50227	35036	30036	27548	26059	25067	24360	23830	23418	23088
	30	86099	57665	48404	43813	41071	39248	37949	36976	36219	35615
	40	140772	88988	72421	64261	59404	56182	53889	52173	50841	49777
	50	227071	134109	105232	91160	82830	77323	73412	70491	68226	66419
	60	368516	201102	151567	127829	113899	104740	98258	93430	89694	86718
	70	613842	303415	218722	179194	156308	141381	130877	123084	117072	112293
	80	1085000	465335	318509	252788	215513	191501	174744	162384	152891	145372
	90	2209000	736313	471532	360759	299900	261422	234896	215502	200705	189043
	100	7259000	1237000	717722	524223	423117	360982	318928	288574	265633	247686
	110	-	2362000	1147000	783920	609223	506522	438915	391038	355355	327733
	120	-	6638000	2018000	1231000	905544	727650	615514	538362	482032	439097
	130	-	-	4500000	2123000	1421000	1085000	887664	758056	666357	598057
	140	-	-	45830000	4584000	2476000	1725000	1339000	1105000	947016	833639
150	-	-	-	34310000	5623000	3125000	2193000	1706000	1406000	1204000	
160	-	-	-	-	157100000	8223000	4299000	2944000	2258000	1843000	

Tabla 15.15. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 40 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	-19999	-20009	-20017	-20024	-20030	-20035	-20040	-20044	-20048	-20051
	-10	-9768	-9793	-9813	-9831	-9846	-9860	-9871	-9882	-9891	-9900
	0	691,7	634,1	585,3	543,4	507,2	475,5	447,5	422,7	400,4	380,4
	10	11465	11348	11249	11164	11091	11027	10970	10920	10874	10834
	20	22819	22595	22405	22242	22101	21978	21869	21772	21685	21608
	30	35121	34709	34361	34063	33805	33579	33379	33202	33044	32901
	40	48908	48184	47572	47048	46594	46196	45846	45535	45257	45006
	50	64943	63716	62678	61790	61021	60349	59756	59230	58759	58336
	60	84290	82273	80569	79112	77852	76750	75779	74918	74147	73454
	70	108403	105176	102454	100129	98118	96363	94818	93446	92221	91120
	80	139269	134216	129964	126337	123205	120475	118073	115943	114043	112336
	90	179616	171837	165308	159752	154965	150798	147138	143898	141009	138418
	100	233262	221416	211514	203113	195897	189631	184139	179286	174966	171097
	110	305718	287760	272832	260226	249441	240108	231953	224765	218382	212677
	120	405287	377972	355445	336548	320469	306622	294572	283990	274624	266276
	130	545213	503113	468781	440250	416164	395559	377731	362155	348429	336242
	140	748229	681575	628110	584271	547674	516661	490044	466951	446726	428865
150	1057000	946685	860143	790585	733459	685705	645191	610387	580166	553678	
160	1565000	1366000	1217000	1100000	1006000	930275	866494	812485	766162	725993	

Tabla 15.16. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 40 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	-20054	-20057	-20059	-20061	-20064
	-10	-9907	-9914	-9921	-9926	-9932
	0	362,3	345,8	330,8	317	304,3
	10	10797	10764	10733	10706	10680
	20	21537	21473	21415	21361	21312
	30	32772	32655	32548	32450	32359
	40	44780	44574	44386	44214	44056
	50	57953	57605	57287	56996	56729
	60	72828	72259	71740	71265	70827
	70	90126	89222	88398	87644	86950
	80	110795	109396	108121	106954	105881
	90	136080	133960	132029	130263	128642
	100	167611	164455	161582	158958	156550
	110	207546	202908	198694	194848	191325
	120	258787	252033	245909	240332	235231
	130	325348	315553	306699	298655	291315
	140	412976	398751	385940	374344	363796
150	530271	509438	490776	473962	458736	
160	690828	659787	632185	607480	585239	

Tabla 15.17. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 50 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	-18530	-19323	-19587	-19718	-19798	-19850	-19888	-19916	-19938	-19956
	-10	-6037	-8051	-8721	-9056	-9257	-9391	-9487	-9558	-9614	-9659
	0	9566	4768	3175	2380	1904	1586	1359	1189	1057	951,3
	10	29546	19745	16504	14889	13922	13278	12818	12473	12205	11990
	20	57931	38807	32532	29413	27548	26307	25421	24758	24242	23830
	30	100695	64681	53021	47254	43813	41527	39899	38679	37732	36976
	40	167903	101636	80663	70373	64261	60212	57331	55178	53507	52173
	50	277483	156431	119546	101692	91160	84212	79285	75609	72762	70491
	60	464739	240173	175982	145571	127829	116205	108000	101898	97183	93430
	70	811292	372414	260085	208673	179194	160080	146682	136770	129139	123084
	80	1563000	591423	389166	301637	252788	221619	200002	184130	171982	162384
	90	3984000	985001	595837	442660	360759	309775	274980	249721	230550	215502
	100	-	1813000	950748	666061	524223	439282	382722	342355	312097	288574
	110	-	4350000	1643000	1046000	783920	636511	542067	476391	428074	391038
	120	-	251900000	3422000	1782000	1231000	954420	788162	677201	597883	538362
	130	-	-	15520000	3658000	2123000	1519000	1196000	994790	857626	758056
	140	-	-	-	16140000	4584000	2721000	1959000	1544000	1284000	1105000
150	-	-	-	-	34310000	6727000	3789000	2666000	2073000	1706000	
160	-	-	-	-	-	-	-	13150000	6006000	3932000	2944000

Tabla 15.18. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 50 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	-19970	-19982	-19992	-20001	-20009	-20015	-20021	-20026	-20031	-20035
	-10	-9695	-9726	-9751	-9774	-9793	-9809	-9824	-9837	-9849	-9860
	0	864,8	792,7	731,7	679,4	634,1	594,4	559,4	528,3	500,5	475,5
	10	11815	11669	11545	11440	11348	11267	11197	11134	11077	11027
	20	23493	23212	22974	22771	22595	22440	22304	22183	22075	21978
	30	36357	35842	35406	35033	34709	34427	34177	33955	33757	33579
	40	51083	50176	49409	48752	48184	47686	47248	46858	46510	46196
	50	68637	67096	65794	64680	63716	62873	62130	61470	60880	60349
	60	90372	87832	85690	83857	82273	80889	79669	78587	77620	76750
	70	118162	114082	110645	107711	105176	102964	101017	99290	97749	96363
	80	154609	148184	142785	138184	134216	130760	127722	125031	122630	120475
	90	203377	193398	185042	177943	171837	166529	161872	157754	154086	150798
	100	269762	254375	241555	230710	221416	213362	206316	200099	194574	189631
	110	361746	337998	318356	301840	287760	275612	265026	255717	247468	240108
	120	492048	454985	424652	399369	377972	359629	343729	329815	317537	306622
	130	682486	623173	575380	536048	503113	475131	451064	430143	411790	395559
	140	974297	874933	796745	733615	681575	637939	600824	568869	541068	516661
150	1457000	1276000	1140000	1032000	946685	875911	816703	766440	723237	685705	
160	2367000	1987000	1720000	1520000	1366000	1244000	1143000	1060000	990256	930275	

Tabla 15.19. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 50 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	-20039	-20042	-20045	-20048	-20051
	-10	-9869	-9878	-9886	-9893	-9900
	0	452,8	432,3	413,5	396,2	380,4
	10	10981	10939	10901	10866	10834
	20	21889	21809	21736	21669	21608
	30	33417	33271	33137	33014	32901
	40	45913	45655	45420	45205	45006
	50	59869	59433	59036	58671	58336
	60	75964	75250	74599	74003	73454
	70	95112	93976	92940	91992	91120
	80	118530	116766	115158	113687	112336
	90	147834	145148	142704	140469	138418
	100	185182	181158	177499	174159	171097
	110	233500	227535	222123	217191	212677
	120	296855	288064	280110	272879	266276
	130	381102	368144	356462	345877	336242
140	495061	475812	458548	442978	428865	
150	652795	623703	597802	574593	553678	
160	878389	833064	793130	757677	725993	

Tabla 15.20. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 60 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	-18213	-19164	-19481	-19639	-19734	-19798	-19843	-19877	-19903	-19924
	-10	-5230	-7649	-8453	-8855	-9097	-9257	-9372	-9458	-9525	-9579
	0	11493	5725	3812	2857	2285	1904	1631	1427	1269	1142
	10	33501	21695	17799	15858	14696	13922	13370	12956	12634	12376
	20	65710	42595	35036	31283	29040	27548	26484	25687	25067	24572
	30	115552	71758	57665	50709	46564	43813	41853	40387	39248	38338
	40	195913	114480	88988	76531	69147	64261	60789	58194	56182	54576
	50	330819	179350	134109	112359	99574	91160	85201	80760	77323	74583
	60	571054	281016	201102	163688	141993	127829	117856	110453	104740	100197
	70	1048000	446711	303415	239166	202697	179194	162785	150680	141381	134015
	80	2251000	734223	465335	353186	291658	252788	226006	206432	191501	179737
	90	8919000	1294000	736313	531843	425727	360759	316892	285282	261422	242773
	100	-	2688000	1237000	828574	636172	524223	450991	399352	360982	331350
	110	-	10410000	2362000	1374000	989167	783920	656425	569538	506522	458729
	120	-	-	6638000	2605000	1655000	1231000	990534	835687	727650	647985
	130	-	-	-	7387000	3257000	2123000	1593000	1285000	1085000	943655
	140	-	-	-	-	11300000	4584000	2915000	2157000	1725000	1445000
150	-	-	-	-	-	34310000	7750000	4426000	3125000	2431000	
160	-	-	-	-	-	-	-	22090000	8223000	5100000	

Tabla 15.21. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 60 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	-19942	-19956	-19968	-19979	-19988	-19995	-20002	-20009	-20014	-20019
	-10	-9622	-9659	-9690	-9716	-9739	-9759	-9777	-9793	-9807	-9819
	0	1038	951,3	878,1	815,3	760,9	713,4	671,4	634,1	600,7	570,6
	10	12166	11990	11842	11715	11605	11508	11423	11348	11280	11219
	20	24167	23830	23545	23300	23088	22903	22740	22595	22465	22348
	30	37595	36976	36452	36004	35615	35275	34976	34709	34471	34257
	40	53265	52173	51251	50461	49777	49179	48652	48184	47765	47388
	50	72348	70491	68922	67580	66419	65404	64510	63716	63006	62367
	60	96499	93430	90842	88630	86718	85048	83577	82273	81107	80059
	70	128035	123084	118917	115362	112293	109617	107263	105176	103313	101639
	80	170229	162384	155801	150198	145372	141172	137482	134216	131305	128693
	90	227795	215502	205232	196522	189043	182551	176862	171837	167365	163360
	100	307776	288574	272631	259183	247686	237745	229063	221416	214629	208565
	110	421236	391038	366195	345398	327733	312542	299340	287760	277520	268400
	120	586812	538362	499040	466488	439097	415729	395559	377972	362502	348788
	130	838892	758056	693790	641474	598057	561447	530160	503113	479499	458704
140	1249000	1105000	993534	905312	833639	774258	724256	681575	644716	612564	
150	2000000	1706000	1493000	1331000	1204000	1101000	1017000	946685	886819	835334	
160	3721000	2944000	2446000	2098000	1843000	1647000	1492000	1366000	1262000	1175000	

Tabla 15.22. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 60 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	-20024	-20028	-20032	-20035	-20038
	-10	-9831	-9841	-9851	-9860	-9868
	0	543,4	518,7	496,2	475,5	456,5
	10	11164	11114	11068	11027	10988
	20	22242	22146	22058	21978	21904
	30	34063	33887	33726	33579	33443
	40	47048	46738	46455	46196	45958
	50	61790	61266	60787	60349	59946
	60	79112	78253	77468	76750	76090
	70	100129	98757	97507	96363	95312
	80	126337	124200	122255	120475	118841
	90	159752	156485	153513	150798	148307
	100	203113	198187	193712	189631	185893
	110	260226	252859	246184	240108	234554
	120	336548	325556	315630	306622	298411
	130	440250	423765	408948	395559	383401
140	584271	559182	536782	516661	498487	
150	790585	751332	716620	685705	657996	
160	1100000	1035000	979618	930275	886545	

Tabla 15.23. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 70 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	-17895	-19006	-19375	-19560	-19671	-19745	-19798	-19837	-19868	-19893
	-10	-4422	-7246	-8185	-8654	-8936	-9123	-9257	-9358	-9436	-9498
	0	13425	6684	4449	3335	2667	2221	1904	1666	1480	1332
	10	37475	23651	19096	16828	15470	14567	13922	13439	13063	12762
	20	73564	46402	37548	33157	30535	28791	27548	26617	25893	25315
	30	130677	78897	62335	54179	49325	46105	43813	42098	40767	39704
	40	224845	127524	97399	82736	74062	68330	64261	61222	58866	56987
	50	387341	202888	148925	123163	108075	98166	91160	85943	81909	78696
	60	689140	323752	226959	182194	156395	139616	127829	119096	112366	107020
	70	1337000	526941	348855	270728	226844	198736	179194	164819	153802	145089
	80	3327000	897292	547687	407667	332228	285064	252788	229310	211465	197443
	90	93280000	1688000	896337	629322	495235	414596	360759	322266	293375	270892
	100	-	4174000	1596000	1016000	760806	616688	524223	459863	412484	376149
	110	-	-	3496000	1797000	1234000	952502	783920	671600	591404	531276
	120	-	-	21540000	3964000	2232000	1576000	1231000	1018000	874000	769676
	130	-	-	-	29770000	5398000	3022000	2123000	1650000	1359000	1162000
	140	-	-	-	-	-	9319000	4584000	3072000	2328000	1885000
150	-	-	-	-	-	-	34310000	8699000	5036000	3571000	
160	-	-	-	-	-	-	-	-	43300000	11220000	

Tabla 15.24. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 70 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	-19913	-19930	-19944	-19956	-19966	-19976	-19984	-19991	-19998	-20003
	-10	-9549	-9592	-9628	-9659	-9686	-9709	-9730	-9748	-9764	-9779
	0	1211	1110	1025	951,3	887,8	832,3	783,3	739,8	700,8	665,8
	10	12517	12312	12139	11990	11862	11749	11650	11562	11483	11412
	20	24842	24448	24115	23830	23583	23366	23176	23006	22854	22718
	30	38835	38111	37499	36976	36522	36125	35775	35464	35186	34936
	40	55452	54175	53097	52173	51374	50675	50059	49511	49022	48582
	50	76076	73900	72062	70491	69131	67943	66897	65968	65137	64391
	60	102672	99066	96026	93430	91186	89228	87504	85975	84609	83382
	70	138025	132183	127272	123084	119472	116324	113556	111103	108914	106949
	80	186134	176821	169017	162384	156676	151712	147356	143503	140070	136992
	90	252897	238170	225893	215502	206594	198873	192115	186152	180850	176107
	100	347399	324084	304796	288574	274741	262806	252403	243254	235147	227912
	110	484521	447123	416530	391038	369471	350986	334967	320951	308585	297594
	120	690738	628927	579213	538362	504198	475203	450286	428644	409670	392901
	130	1018000	910687	826091	758056	702153	655402	615726	581631	552018	526058
	140	1592000	1383000	1226000	1105000	1007000	928598	862640	806878	759117	717751
150	2782000	2289000	1951000	1706000	1519000	1373000	1255000	1157000	1076000	1006000	
160	6504000	4608000	3585000	2944000	2506000	2186000	1944000	1753000	1599000	1472000	

Tabla 15.25. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 70 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	-20009	-20013	-20018	-20022	-20026
	-10	-9793	-9805	-9816	-9826	-9835
	0	634,1	605,2	578,9	554,8	532,6
	10	11348	11289	11236	11187	11142
	20	22595	22482	22380	22286	22200
	30	34709	34504	34316	34144	33986
	40	48184	47822	47492	47189	46911
	50	63716	63102	62543	62031	61559
	60	82273	81266	80348	79507	78734
	70	105176	103566	102100	100758	99525
	80	134216	131701	129411	127318	125396
	90	171837	167973	164461	161253	158313
	100	221416	215551	210230	205381	200942
	110	287760	278909	270902	263623	256977
	120	377972	364597	352545	341629	331696
	130	503113	482687	464387	447898	432963
	140	681575	649671	621323	595970	573159
150	946685	894814	849294	809026	773151	
160	1366000	1276000	1198000	1131000	1071000	

Tabla 15.26. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 80 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	-17578	-18847	-19270	-19481	-19608	-19692	-19752	-19798	-19833	-19861
	-10	-3613	-6843	-7917	-8453	-8775	-8989	-9142	-9257	-9346	-9418
	0	15362	7643	5087	3812	3048	2539	2176	1904	1692	1523
	10	41469	25611	20394	17799	16246	15212	14475	13922	13492	13149
	20	81494	50227	40068	35036	32032	30036	28613	27548	26720	26059
	30	146078	86099	67033	57665	52095	48404	45777	43813	42288	41071
	40	254747	140772	105896	88988	79007	72421	67748	64261	61559	59404
	50	447344	227071	164003	134109	116664	105232	97161	91160	86521	82830
	60	821064	368516	253585	201102	171043	151567	137922	127829	120062	113899
	70	1699000	613842	396562	303415	251660	218722	195917	179194	166404	156308
	80	5248000	1085000	637009	465335	374613	318509	280383	252788	231889	215513
	90	-	2209000	1080000	736313	569776	471532	406722	360759	326467	299900
	100	-	7259000	2062000	1237000	900411	717722	602980	524223	466818	423117
	110	-	-	5551000	2362000	1530000	1147000	926951	783920	683546	609223
	120	-	-	-	6638000	3060000	2018000	1522000	1231000	1040000	905544
	130	-	-	-	-	10960000	4500000	2867000	2123000	1697000	1421000
	140	-	-	-	-	-	45830000	8240000	4584000	3203000	2476000
150	-	-	-	-	-	-	-	34310000	9583000	5623000	
160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	157100000	

Tabla 15.27. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 80 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	-19884	-19903	-19919	-19933	-19945	-19956	-19965	-19974	-19981	-19988
	-10	-9476	-9525	-9566	-9601	-9632	-9659	-9682	-9703	-9722	-9739
	0	1384	1269	1171	1087	1015	951,3	895,3	845,5	801	760,9
	10	12868	12634	12436	12266	12119	11990	11877	11776	11686	11605
	20	25518	25067	24686	24360	24077	23830	23612	23418	23245	23088
	30	40076	39248	38548	37949	37430	36976	36575	36219	35901	35615
	40	57645	56182	54947	53889	52973	52173	51468	50841	50281	49777
	50	79821	77323	75214	73412	71853	70491	69291	68226	67274	66419
	60	108891	104740	101243	98258	95680	93430	91450	89694	88126	86718
	70	148134	141381	135709	130877	126712	123084	119896	117072	114553	112293
	80	202335	191501	182438	174744	168130	162384	157345	152891	148926	145372
	90	278713	261422	247042	234896	224501	215502	207638	200705	194548	189043
	100	388737	360982	338107	318928	302616	288574	276358	265633	256143	247686
	110	551974	506522	469561	438915	413093	391038	371984	355355	340717	327733
	120	805225	727650	665873	615514	573675	538362	508159	482032	459208	439097
	130	1228000	1085000	974878	887664	816790	758056	708589	666357	629880	598057
	140	2029000	1725000	1505000	1339000	1209000	1105000	1018000	947016	886038	833639
150	4005000	3125000	2572000	2193000	1916000	1706000	1540000	1406000	1296000	1204000	
160	15490000	8223000	5630000	4299000	3489000	2944000	2553000	2258000	2028000	1843000	

Tabla 15.28. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 80 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	-19994	-19999	-20004	-20009	-20013
	-10	-9754	-9768	-9781	-9793	-9803
	0	724,7	691,7	661,6	634,1	608,7
	10	11531	11465	11404	11348	11296
	20	22947	22819	22702	22595	22496
	30	35356	35121	34906	34709	34528
	40	49322	48908	48530	48184	47865
	50	65646	64943	64303	63716	63176
	60	85445	84290	83237	82273	81387
	70	110253	108403	106718	105176	103759
	80	142170	139269	136629	134216	132003
	90	184092	179616	175548	171837	168436
	100	240102	233262	227062	221416	216253
	110	316137	305718	296305	287760	279967
	120	421244	405287	390941	377972	366192
	130	570051	545213	523036	503113	485117
	140	788127	748229	712966	681575	653451
150	1125000	1057000	998396	946685	900924	
160	1692000	1565000	1458000	1366000	1286000	

Tabla 15.29. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 90 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	-17260	-18689	-19164	-19402	-19544	-19639	-19707	-19758	-19798	-19829
	-10	-2803	-6440	-7649	-8252	-8614	-8855	-9028	-9157	-9257	-9338
	0	17303	8604	5725	4290	3430	2857	2449	2142	1904	1713
	10	45484	27576	21695	18771	17022	15858	15028	14405	13922	13535
	20	89502	54070	42595	36919	33533	31283	29680	28480	27548	26803
	30	161762	93365	71758	61165	54875	50709	47746	45531	43813	42441
	40	285668	154230	114480	95288	83983	76531	71250	67311	64261	61829
	50	511159	251927	179350	145197	125341	112359	103207	96409	91160	86984
	60	969411	415458	281016	220424	185943	163688	148135	136654	127829	120836
	70	2163000	708284	446711	337289	277173	239166	212965	193809	179194	167675
	80	9657000	1304000	734223	526479	418936	353186	308831	276888	252788	233957
	90	-	2927000	1294000	854279	649917	531843	454933	400857	360759	329841
	100	-	17520000	2688000	1498000	1058000	828574	687912	592812	524223	472416
	110	-	-	10410000	3155000	1897000	1374000	1089000	908126	783920	693195
	120	-	-	-	14320000	4349000	2605000	1879000	1482000	1231000	1058000
	130	-	-	-	-	61120000	7387000	3989000	2758000	2123000	1735000
	140	-	-	-	-	-	-	22630000	7562000	4584000	3312000
150	-	-	-	-	-	-	-	-	34310000	10400000	
160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla 15.30. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 90 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	-19855	-19877	-19895	-19911	-19924	-19936	-19947	-19956	-19964	-19972
	-10	-9403	-9458	-9504	-9544	-9579	-9609	-9635	-9659	-9680	-9699
	0	1557	1427	1317	1223	1142	1070	1007	951,3	901,2	856,1
	10	13219	12956	12733	12542	12376	12232	12104	11990	11889	11798
	20	26194	25687	25258	24890	24572	24294	24048	23830	23635	23459
	30	41320	40387	39598	38923	38338	37827	37376	36976	36617	36295
	40	59844	58194	56801	55608	54576	53674	52879	52173	51542	50974
	50	83583	80760	78379	76343	74583	73046	71692	70491	69417	68452
	60	115156	110453	106493	103115	100197	97653	95415	93430	91658	90067
	70	158363	150680	144232	138743	134015	129899	126284	123084	120231	117671
	80	218838	206432	196069	187282	179737	173189	167452	162384	157874	153836
	90	305273	285282	268698	254717	242773	232449	223437	215502	208462	202174
	100	431902	399352	372628	350294	331350	315079	300953	288574	277636	267902
	110	624023	569538	525512	489196	458729	432803	410472	391038	373972	358865
	120	931966	835687	759841	698548	647985	605562	569459	538362	511298	487529
	130	1473000	1285000	1143000	1032000	943655	870677	809726	758056	713697	675199
	140	2606000	2157000	1847000	1619000	1445000	1308000	1197000	1105000	1027000	961947
150	6186000	4426000	3461000	2851000	2431000	2124000	1890000	1706000	1557000	1434000	
160	-	22090000	10370000	6820000	5100000	4086000	3418000	2944000	2591000	2317000	

Tabla 15.31. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 90 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	-19979	-19985	-19990	-19995	-20000
	-10	-9716	-9732	-9746	-9759	-9771
	0	815,3	778,2	744,4	713,4	684,8
	10	11715	11640	11571	11508	11451
	20	23300	23156	23024	22903	22792
	30	36004	35739	35497	35275	35072
	40	50461	49995	49569	49179	48821
	50	67580	66788	66066	65404	64796
	60	88630	87325	86136	85048	84048
	70	115362	113268	111361	109617	108015
	80	150198	146905	143909	141172	138661
	90	196522	191416	186780	182551	178679
	100	259183	251328	244216	237745	231832
	110	345398	333318	322422	312542	303545
	120	466488	447732	430907	415729	401969
	130	641474	611685	585181	561447	540071
	140	905312	855987	812645	774258	740022
150	1331000	1243000	1167000	1101000	1043000	
160	2098000	1920000	1772000	1647000	1540000	

Tabla 15.32. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 100 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	-16943	-18530	-19058	-19323	-19481	-19587	-19662	-19718	-19762	-19798
	-10	-1993	-6037	-7380	-8051	-8453	-8721	-8913	-9056	-9168	-9257
	0	19249	9566	6364	4768	3812	3175	2721	2380	2116	1904
	10	49518	29546	22998	19745	17799	16504	15581	14889	14352	13922
	20	97588	57931	45131	38807	35036	32532	30748	29413	28376	27548
	30	177738	100695	76511	64681	57665	53021	49720	47254	45340	43813
	40	317661	167903	123153	101636	88988	80663	74767	70373	66972	64261
	50	579163	277483	194971	156431	134109	119546	109297	101692	95824	91160
	60	1137000	464739	309288	240173	201102	175982	158473	145571	135669	127829
	70	2782000	811292	499495	372414	303415	260085	230347	208673	192173	179194
	80	30240000	1563000	840423	591423	465335	389166	338169	301637	274179	252788
	90	-	3984000	1545000	985001	736313	595837	505563	442660	396319	360759
	100	-	-	3575000	1813000	1237000	950748	779774	666061	584970	524223
	110	-	-	36360000	4350000	2362000	1643000	1273000	1046000	893680	783920
	120	-	-	-	251900000	6638000	3422000	2331000	1782000	1452000	1231000
	130	-	-	-	-	-	15520000	5870000	3658000	2677000	2123000
	140	-	-	-	-	-	-	-	16140000	7096000	4584000
150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	34310000	
160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla 15.33. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 100 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	-19826	-19850	-19871	-19888	-19903	-19916	-19928	-19938	-19948	-19956
	-10	-9330	-9391	-9443	-9487	-9525	-9558	-9588	-9614	-9638	-9659
	0	1730	1586	1464	1359	1269	1189	1119	1057	1001	951,3
	10	13570	13278	13030	12818	12634	12473	12331	12205	12092	11990
	20	26870	26307	25830	25421	25067	24758	24485	24242	24025	23830
	30	42565	41527	40650	39899	39248	38679	38178	37732	37334	36976
	40	62050	60212	58659	57331	56182	55178	54293	53507	52805	52173
	50	87363	84212	81555	79285	77323	75609	74101	72762	71566	70491
	60	121469	116205	111777	108000	104740	101898	99398	97183	95206	93430
	70	168716	160080	152840	146682	141381	136770	132722	129139	125947	123084
	80	235653	221619	209914	200002	191501	184130	177678	171982	166917	162384
	90	332610	309775	290877	274980	261422	249721	239521	230550	222599	215502
	100	477019	439282	408425	382722	360982	342355	326215	312097	299642	288574
	110	701152	636511	584629	542067	506522	476391	450523	428074	408408	391038
	120	1073000	954420	862082	788162	727650	677201	634498	597883	566142	538362
	130	1767000	1519000	1336000	1196000	1085000	994790	920293	857626	804179	758056
	140	3406000	2721000	2274000	1959000	1725000	1544000	1401000	1284000	1187000	1105000
150	11180000	6727000	4836000	3789000	3125000	2666000	2330000	2073000	1870000	1706000	
160	-	-	33600000	13150000	8223000	6006000	4745000	3932000	3363000	2944000	

Tabla 15.34. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 100 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	-19963	-19970	-19977	-19982	-19988
	-10	-9678	-9695	-9711	-9726	-9739
	0	906	864,8	827,1	792,7	760,9
	10	11899	11815	11739	11669	11605
	20	23653	23493	23346	23212	23088
	30	36651	36357	36088	35842	35615
	40	51602	51083	50610	50176	49777
	50	69519	68637	67833	67096	66419
	60	91827	90372	89046	87832	86718
	70	120502	118162	116031	114082	112293
	80	158303	154609	151251	148184	145372
	90	209130	203377	198157	193398	189043
	100	278672	269762	261702	254375	247686
	110	375584	361746	349282	337998	327733
	120	513845	492048	472543	454985	439097
	130	717848	682486	651144	623173	598057
	140	1034000	974297	921464	874933	833639
150	1570000	1457000	1360000	1276000	1204000	
160	2622000	2367000	2159000	1987000	1843000	

Tabla 15.35. - Entalpía (en J/kg aire seco) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 0 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	5733	5535	5418	5336	5272	5219	5175	5137	5103	5073
	-10	5772	5573	5457	5375	5310	5258	5214	5176	5142	5112
	0	5810	5611	5495	5412	5348	5296	5251	5213	5179	5149
	10	5846	5647	5531	5448	5384	5332	5288	5249	5215	5185
	20	5881	5682	5566	5483	5419	5367	5323	5284	5250	5220
	30	5915	5716	5600	5517	5453	5401	5356	5318	5284	5254
	40	5948	5749	5632	5550	5486	5433	5389	5351	5317	5287
	50	5979	5780	5664	5581	5517	5465	5421	5382	5349	5318
	60	6010	5811	5695	5612	5548	5496	5451	5413	5379	5349
	70	6040	5841	5724	5642	5578	5525	5481	5443	5409	5379
	80	6069	5870	5753	5671	5607	5554	5510	5472	5438	5408
	90	6097	5898	5781	5699	5635	5582	5538	5500	5466	5436
	100	6124	5925	5809	5726	5662	5610	5566	5527	5493	5463
	110	6151	5952	5836	5753	5689	5637	5592	5554	5520	5490
	120	6177	5978	5862	5779	5715	5663	5618	5580	5546	5516
	130	6202	6003	5887	5804	5740	5688	5644	5605	5572	5541
	140	6227	6028	5912	5829	5765	5713	5669	5630	5596	5566
150	6251	6052	5936	5853	5789	5737	5693	5654	5621	5590	
160	6275	6076	5960	5877	5813	5761	5717	5678	5644	5614	

Tabla 15.36. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa



HR = 0 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	5045	5020	4997	4976	4956	4938	4920	4904	4888	4874
	-10	5084	5059	5036	5015	4995	4977	4959	4943	4927	4913
	0	5122	5097	5074	5052	5033	5014	4997	4980	4965	4950
	10	5158	5133	5110	5089	5069	5050	5033	5017	5001	4986
	20	5193	5168	5145	5124	5104	5085	5068	5051	5036	5021
	30	5227	5202	5179	5157	5138	5119	5102	5085	5070	5055
	40	5259	5234	5211	5190	5170	5152	5134	5118	5102	5088
	50	5291	5266	5243	5222	5202	5183	5166	5150	5134	5119
	60	5322	5297	5274	5252	5233	5214	5197	5180	5165	5150
	70	5351	5326	5303	5282	5262	5244	5226	5210	5195	5180
	80	5380	5355	5332	5311	5291	5273	5255	5239	5223	5209
	90	5408	5384	5361	5339	5319	5301	5284	5267	5252	5237
	100	5436	5411	5388	5367	5347	5328	5311	5295	5279	5264
	110	5463	5438	5415	5393	5374	5355	5338	5321	5306	5291
	120	5489	5464	5441	5419	5400	5381	5364	5347	5332	5317
	130	5514	5489	5466	5445	5425	5406	5389	5373	5357	5342
	140	5539	5514	5491	5470	5450	5431	5414	5397	5382	5367
150	5563	5538	5515	5494	5474	5456	5438	5422	5406	5391	
160	5587	5562	5539	5518	5498	5479	5462	5445	5430	5415	

Tabla 15.37. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 0 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	4860	4846	4834	4821	4810
	-10	4899	4885	4872	4860	4849
	0	4936	4923	4910	4898	4886
	10	4972	4959	4946	4934	4922
	20	5007	4994	4981	4969	4957
	30	5041	5028	5015	5003	4991
	40	5074	5060	5048	5035	5024
	50	5105	5092	5079	5067	5055
	60	5136	5123	5110	5098	5086
	70	5166	5152	5140	5127	5116
	80	5195	5181	5169	5156	5145
	90	5223	5210	5197	5185	5173
	100	5250	5237	5224	5212	5200
	110	5277	5264	5251	5239	5227
	120	5303	5290	5277	5265	5253
	130	5328	5315	5302	5290	5278
140	5353	5340	5327	5315	5303	
150	5377	5364	5351	5339	5327	
160	5401	5388	5375	5363	5351	

Tabla 15.38. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 10 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	5735	5535	5419	5336	5272	5219	5175	5137	5103	5073
	-10	5776	5575	5458	5375	5311	5259	5214	5176	5142	5112
	0	5818	5615	5497	5414	5350	5297	5253	5214	5180	5150
	10	5862	5655	5536	5452	5387	5335	5290	5251	5217	5187
	20	5911	5697	5576	5491	5425	5372	5327	5288	5254	5223
	30	5968	5742	5617	5530	5463	5409	5364	5325	5290	5259
	40	6039	5794	5662	5572	5504	5448	5402	5362	5327	5296
	50	6130	5855	5713	5618	5547	5490	5442	5401	5365	5333
	60	6254	5930	5774	5671	5595	5535	5485	5442	5405	5372
	70	6424	6027	5847	5733	5651	5586	5533	5488	5449	5415
	80	6663	6153	5939	5809	5717	5646	5588	5540	5499	5462
	90	7010	6321	6057	5903	5797	5717	5653	5600	5555	5516
	100	7525	6549	6210	6022	5896	5803	5731	5671	5621	5578
	110	8331	6864	6412	6174	6021	5911	5826	5757	5700	5651
	120	9697	7311	6684	6374	6181	6045	5943	5862	5796	5739
	130	12379	7968	7056	6637	6387	6216	6090	5992	5913	5846
	140	19666	8991	7581	6991	6656	6436	6277	6155	6058	5978
150	106093	10742	8350	7480	7016	6722	6515	6360	6239	6141	
160	-	14301	9554	8179	7507	7101	6825	6624	6469	6345	

Tabla 15.39. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 10 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	5045	5020	4997	4976	4956	4938	4920	4904	4888	4874
	-10	5084	5059	5036	5015	4995	4977	4959	4943	4927	4913
	0	5122	5097	5074	5053	5033	5015	4997	4981	4965	4951
	10	5159	5134	5111	5090	5070	5051	5034	5017	5002	4987
	20	5196	5170	5147	5126	5106	5087	5070	5053	5038	5023
	30	5231	5206	5183	5161	5141	5122	5105	5088	5072	5058
	40	5267	5242	5218	5196	5176	5157	5140	5123	5107	5092
	50	5304	5278	5254	5232	5212	5193	5175	5158	5142	5127
	60	5343	5316	5292	5269	5248	5229	5210	5193	5177	5162
	70	5384	5357	5331	5308	5287	5266	5248	5230	5214	5198
	80	5430	5401	5374	5350	5328	5307	5287	5269	5252	5236
	90	5481	5450	5422	5396	5372	5351	5330	5311	5293	5277
	100	5540	5506	5476	5448	5423	5399	5378	5358	5339	5321
	110	5609	5571	5538	5508	5480	5455	5431	5410	5389	5371
	120	5691	5649	5611	5577	5547	5519	5493	5469	5447	5427
	130	5790	5741	5698	5659	5625	5593	5565	5538	5514	5491
	140	5911	5853	5802	5757	5718	5681	5649	5619	5591	5566
150	6059	5989	5929	5876	5829	5787	5749	5714	5682	5653	
160	6243	6157	6083	6020	5963	5913	5869	5828	5791	5757	

Tabla 15.40. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 10 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	4860	4846	4834	4821	4810
	-10	4899	4885	4873	4860	4849
	0	4936	4923	4910	4898	4886
	10	4973	4960	4947	4935	4923
	20	5009	4995	4982	4970	4958
	30	5043	5030	5017	5005	4993
	40	5078	5064	5051	5039	5027
	50	5112	5099	5086	5073	5061
	60	5147	5133	5120	5107	5095
	70	5183	5169	5155	5143	5130
	80	5221	5206	5192	5179	5166
	90	5261	5246	5231	5218	5205
	100	5304	5288	5273	5259	5246
	110	5353	5336	5320	5305	5290
	120	5407	5389	5372	5356	5340
	130	5470	5450	5431	5413	5396
	140	5542	5520	5499	5479	5461
150	5626	5601	5578	5556	5535	
160	5726	5697	5670	5645	5621	

Tabla 15.41. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 20 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	5736	5536	5419	5336	5272	5220	5175	5137	5103	5073
	-10	5779	5577	5459	5376	5312	5259	5215	5176	5143	5112
	0	5826	5619	5500	5416	5351	5298	5254	5215	5181	5151
	10	5877	5663	5541	5456	5390	5337	5292	5253	5219	5188
	20	5939	5711	5585	5498	5431	5376	5331	5291	5257	5226
	30	6019	5767	5634	5543	5473	5418	5371	5331	5296	5264
	40	6127	5837	5691	5593	5521	5462	5414	5372	5336	5304
	50	6279	5926	5761	5653	5575	5513	5462	5418	5380	5347
	60	6501	6046	5849	5727	5640	5572	5517	5470	5430	5395
	70	6833	6211	5966	5821	5720	5644	5582	5531	5487	5449
	80	7347	6444	6123	5944	5823	5733	5663	5605	5556	5514
	90	8192	6778	6339	6107	5956	5848	5764	5697	5640	5592
	100	9721	7275	6640	6327	6132	5996	5893	5812	5745	5689
	110	13096	8052	7074	6631	6369	6192	6062	5960	5878	5810
	120	25674	9367	7723	7062	6694	6454	6283	6153	6049	5964
	130	-	11947	8754	7696	7152	6814	6580	6407	6272	6164
140	-	18952	10576	8681	7820	7319	6987	6748	6567	6424	
150	-	101988	14502	10366	8856	8060	7563	7220	6967	6771	
160	-	-	28582	13789	10623	9219	8417	7894	7523	7245	

Tabla 15.42. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 20 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	5045	5020	4997	4976	4956	4938	4920	4904	4888	4874
	-10	5085	5060	5037	5015	4996	4977	4960	4943	4928	4913
	0	5123	5098	5075	5054	5034	5015	4998	4981	4966	4951
	10	5161	5135	5112	5091	5071	5052	5035	5018	5003	4988
	20	5198	5173	5149	5128	5108	5089	5071	5055	5039	5024
	30	5236	5210	5186	5165	5144	5125	5108	5091	5075	5060
	40	5275	5249	5225	5202	5182	5163	5145	5128	5112	5096
	50	5317	5290	5265	5242	5221	5201	5183	5165	5149	5134
	60	5363	5335	5309	5285	5263	5242	5223	5205	5189	5173
	70	5415	5385	5358	5332	5309	5288	5268	5249	5231	5215
	80	5477	5444	5414	5387	5362	5339	5317	5297	5279	5261
	90	5550	5513	5480	5450	5423	5398	5374	5353	5333	5314
	100	5640	5598	5560	5526	5495	5467	5441	5418	5395	5375
	110	5752	5702	5658	5618	5583	5551	5521	5495	5470	5446
	120	5893	5832	5779	5732	5690	5653	5619	5587	5559	5532
	130	6074	5998	5932	5875	5824	5779	5738	5701	5667	5636
	140	6307	6210	6127	6055	5992	5936	5886	5842	5801	5764
150	6614	6486	6378	6285	6205	6135	6073	6017	5967	5921	
160	7027	6852	6707	6585	6480	6389	6310	6239	6175	6118	

Tabla 15.43. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 20 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	4860	4846	4834	4821	4810
	-10	4899	4886	4873	4861	4849
	0	4937	4923	4911	4898	4887
	10	4974	4960	4948	4935	4923
	20	5010	4996	4984	4971	4959
	30	5046	5032	5019	5007	4995
	40	5082	5068	5055	5043	5031
	50	5119	5105	5092	5079	5067
	60	5158	5143	5130	5117	5104
	70	5199	5184	5170	5157	5144
	80	5245	5229	5214	5200	5187
	90	5296	5279	5264	5249	5234
	100	5355	5337	5320	5304	5288
	110	5425	5405	5386	5368	5351
	120	5508	5485	5463	5443	5424
	130	5607	5581	5556	5533	5511
140	5729	5698	5668	5641	5616	
150	5880	5841	5806	5773	5743	
160	6067	6019	5976	5936	5899	

Tabla 15.44. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 30 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	5738	5537	5420	5337	5272	5220	5176	5137	5103	5073
	-10	5783	5579	5460	5377	5313	5260	5215	5177	5143	5113
	0	5833	5623	5502	5418	5353	5300	5255	5216	5182	5151
	10	5892	5670	5546	5460	5393	5339	5294	5255	5221	5190
	20	5967	5725	5594	5504	5436	5381	5335	5295	5260	5229
	30	6069	5792	5650	5555	5483	5426	5378	5337	5301	5269
	40	6215	5879	5719	5614	5537	5476	5426	5383	5345	5312
	50	6431	5998	5807	5688	5602	5536	5481	5435	5395	5361
	60	6763	6164	5925	5783	5684	5609	5548	5497	5454	5416
	70	7291	6403	6087	5910	5790	5701	5631	5574	5525	5483
	80	8188	6757	6315	6081	5930	5822	5738	5670	5613	5565
	90	9897	7301	6643	6320	6121	5981	5877	5794	5726	5668
	100	14063	8187	7129	6659	6383	6198	6062	5956	5871	5801
	110	36678	9787	7889	7156	6754	6496	6312	6173	6063	5974
	120	-	13327	9175	7920	7297	6917	6658	6468	6321	6203
	130	-	26834	11697	9191	8132	7537	7151	6878	6672	6511
	140	-	-	18545	11619	9528	8501	7884	7469	7167	6938
150	-	-	99710	17839	12234	10151	9051	8365	7894	7547	
160	-	-	-	65486	19455	13505	11131	9844	9030	8466	

Tabla 15.45. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 30 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	5046	5021	4998	4976	4956	4938	4921	4904	4889	4874
	-10	5085	5060	5037	5016	4996	4977	4960	4943	4928	4913
	0	5124	5099	5076	5054	5034	5016	4998	4982	4966	4951
	10	5162	5137	5113	5092	5072	5053	5036	5019	5003	4989
	20	5201	5175	5151	5130	5109	5091	5073	5056	5040	5025
	30	5240	5214	5190	5168	5148	5128	5110	5094	5078	5063
	40	5283	5256	5231	5208	5187	5168	5149	5132	5116	5100
	50	5329	5301	5275	5252	5230	5210	5191	5173	5156	5140
	60	5383	5353	5325	5300	5277	5256	5236	5217	5200	5183
	70	5446	5413	5383	5356	5331	5308	5287	5267	5249	5231
	80	5523	5486	5453	5423	5395	5370	5347	5325	5305	5286
	90	5619	5576	5538	5503	5472	5444	5418	5394	5372	5351
	100	5741	5689	5644	5604	5567	5535	5505	5477	5452	5428
	110	5899	5835	5779	5730	5687	5647	5612	5580	5550	5522
	120	6106	6024	5953	5892	5838	5790	5747	5708	5672	5639
	130	6381	6273	6181	6102	6033	5973	5919	5870	5826	5786
	140	6756	6608	6484	6379	6289	6210	6140	6078	6022	5972
150	7281	7070	6897	6752	6629	6523	6431	6349	6276	6211	
160	8051	7731	7476	7268	7094	6947	6819	6709	6611	6524	

Tabla 15.46. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 30 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	4860	4846	4834	4821	4810
	-10	4899	4886	4873	4861	4849
	0	4937	4924	4911	4899	4887
	10	4974	4961	4948	4936	4924
	20	5011	4998	4985	4972	4961
	30	5048	5034	5021	5009	4997
	40	5086	5072	5059	5046	5034
	50	5125	5111	5097	5085	5072
	60	5168	5153	5139	5126	5113
	70	5215	5199	5184	5170	5157
	80	5269	5252	5236	5221	5207
	90	5331	5313	5295	5279	5264
	100	5406	5385	5366	5348	5330
	110	5497	5473	5451	5430	5410
	120	5609	5581	5555	5530	5508
	130	5749	5715	5683	5654	5627
140	5926	5883	5845	5809	5776	
150	6152	6098	6049	6004	5962	
160	6446	6376	6312	6254	6201	

Tabla 15.47. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 40 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	5739	5537	5420	5337	5273	5220	5176	5137	5103	5073
	-10	5786	5580	5462	5378	5313	5260	5216	5177	5143	5113
	0	5841	5626	5505	5420	5354	5301	5256	5217	5183	5152
	10	5907	5677	5551	5463	5396	5342	5296	5257	5222	5191
	20	5994	5738	5603	5511	5441	5385	5338	5298	5263	5231
	30	6119	5816	5666	5567	5493	5434	5385	5343	5306	5274
	40	6304	5922	5746	5635	5554	5490	5437	5393	5354	5320
	50	6589	6070	5854	5722	5630	5558	5500	5452	5410	5374
	60	7045	6284	6002	5839	5728	5645	5579	5524	5478	5438
	70	7816	6605	6211	5999	5860	5759	5680	5616	5562	5516
	80	9265	7102	6517	6224	6040	5911	5813	5735	5671	5616
	90	12640	7915	6975	6547	6292	6119	5992	5893	5812	5745
	100	27472	9387	7698	7026	6653	6410	6237	6106	6001	5916
	110	-	12632	8936	7774	7188	6829	6582	6399	6258	6145
	120	-	24722	11402	9040	8027	7454	7080	6815	6615	6459
	130	-	-	18308	11523	9462	8448	7837	7426	7128	6900
	140	-	-	130985	18269	12357	10204	9077	8377	7897	7545
150	-	-	-	98238	20859	13993	11389	10005	9141	8547	
160	-	-	-	-	422394	27597	17018	13319	11421	10260	

Tabla 15.48. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 40 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	5046	5021	4998	4976	4957	4938	4921	4904	4889	4874
	-10	5085	5060	5037	5016	4996	4977	4960	4944	4928	4913
	0	5124	5099	5076	5055	5035	5016	4999	4982	4966	4952
	10	5163	5138	5115	5093	5073	5054	5036	5020	5004	4989
	20	5203	5177	5153	5132	5111	5092	5074	5058	5042	5027
	30	5245	5218	5194	5171	5151	5131	5113	5096	5080	5065
	40	5290	5262	5237	5214	5193	5173	5154	5137	5120	5105
	50	5341	5312	5286	5261	5239	5218	5199	5180	5163	5147
	60	5402	5370	5342	5315	5291	5269	5248	5229	5211	5194
	70	5476	5441	5409	5380	5353	5329	5307	5286	5266	5248
	80	5569	5528	5491	5458	5429	5401	5376	5353	5331	5311
	90	5688	5639	5596	5557	5522	5490	5461	5435	5410	5387
	100	5844	5783	5729	5682	5640	5602	5568	5537	5508	5481
	110	6051	5972	5904	5845	5793	5746	5704	5666	5631	5599
	120	6331	6226	6136	6059	5992	5932	5879	5831	5788	5749
	130	6720	6573	6450	6346	6256	6178	6109	6047	5992	5941
	140	7276	7061	6886	6740	6616	6509	6415	6333	6259	6194
150	8112	7779	7514	7298	7118	6965	6834	6720	6619	6530	
160	9473	8903	8469	8127	7850	7620	7426	7261	7117	6991	

Tabla 15.49. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 40 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	4860	4847	4834	4822	4810
	-10	4899	4886	4873	4861	4849
	0	4938	4924	4911	4899	4887
	10	4975	4962	4949	4936	4925
	20	5013	4999	4986	4974	4962
	30	5050	5037	5023	5011	4999
	40	5090	5076	5062	5049	5037
	50	5132	5117	5103	5090	5077
	60	5178	5163	5148	5134	5121
	70	5230	5214	5199	5184	5170
	80	5292	5274	5257	5241	5226
	90	5366	5346	5327	5309	5293
	100	5457	5434	5412	5392	5372
	110	5570	5542	5517	5493	5471
	120	5713	5679	5648	5619	5593
	130	5896	5854	5815	5780	5747
140	6134	6080	6031	5985	5943	
150	6450	6378	6313	6253	6199	
160	6879	6780	6690	6610	6536	

Tabla 15.50. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 50 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	5740	5538	5420	5337	5273	5220	5176	5137	5104	5073
	-10	5789	5582	5463	5379	5314	5261	5216	5178	5144	5113
	0	5848	5630	5507	5422	5356	5302	5257	5218	5183	5153
	10	5921	5684	5556	5467	5399	5344	5298	5259	5224	5193
	20	6022	5752	5612	5518	5447	5390	5342	5301	5266	5234
	30	6169	5840	5682	5579	5502	5442	5391	5349	5311	5278
	40	6395	5964	5774	5655	5570	5503	5449	5403	5363	5328
	50	6753	6142	5900	5757	5657	5581	5520	5469	5425	5387
	60	7350	6408	6079	5895	5772	5681	5610	5551	5502	5459
	70	8427	6819	6339	6090	5931	5816	5729	5658	5600	5550
	80	10709	7483	6730	6371	6153	6002	5889	5801	5728	5668
	90	17888	8650	7343	6789	6472	6262	6110	5994	5901	5824
	100	-	11056	8373	7437	6946	6637	6422	6262	6136	6035
	110	-	18277	10347	8520	7685	7198	6875	6642	6465	6325
	120	-	705140	15321	10580	8937	8088	7563	7204	6940	6736
	130	-	-	48510	15742	11393	9642	8686	8078	7655	7341
	140	-	-	-	49463	18068	12908	10760	9572	8813	8283
150	-	-	-	-	97250	23629	15668	12583	10932	9899	
160	-	-	-	-	-	-	40427	21441	15872	13193	

Tabla 15.51. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 50 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	5046	5021	4998	4976	4957	4938	4921	4904	4889	4874
	-10	5086	5061	5037	5016	4996	4978	4960	4944	4928	4913
	0	5125	5100	5077	5055	5035	5017	4999	4982	4967	4952
	10	5165	5139	5116	5094	5074	5055	5037	5021	5005	4990
	20	5205	5179	5155	5133	5113	5094	5076	5059	5043	5028
	30	5249	5222	5197	5175	5154	5134	5116	5099	5083	5067
	40	5297	5269	5243	5220	5198	5178	5159	5141	5124	5108
	50	5353	5323	5296	5271	5248	5226	5206	5188	5170	5154
	60	5421	5388	5358	5331	5305	5282	5261	5241	5222	5204
	70	5506	5468	5434	5403	5375	5349	5326	5304	5283	5264
	80	5616	5570	5530	5494	5462	5432	5405	5380	5357	5336
	90	5759	5703	5654	5611	5572	5537	5505	5476	5449	5424
	100	5950	5878	5817	5762	5714	5671	5632	5597	5565	5535
	110	6211	6115	6034	5963	5902	5847	5798	5754	5714	5677
	120	6574	6441	6330	6235	6153	6081	6017	5960	5908	5862
	130	7098	6904	6744	6610	6496	6398	6311	6235	6166	6105
	140	7891	7588	7345	7147	6981	6839	6717	6611	6517	6433
150	9188	8667	8268	7951	7693	7479	7297	7141	7006	6887	
160	11611	10562	9813	9251	8812	8459	8169	7925	7718	7539	

Tabla 15.52. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 50 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	4860	4847	4834	4822	4810
	-10	4899	4886	4873	4861	4849
	0	4938	4924	4912	4899	4888
	10	4976	4962	4949	4937	4925
	20	5014	5000	4987	4975	4963
	30	5053	5039	5025	5013	5001
	40	5093	5079	5066	5053	5040
	50	5138	5123	5109	5095	5083
	60	5188	5172	5157	5143	5129
	70	5246	5229	5213	5197	5183
	80	5315	5296	5279	5262	5246
	90	5401	5379	5359	5340	5321
	100	5508	5482	5458	5436	5415
	110	5643	5612	5583	5557	5531
	120	5819	5780	5744	5711	5680
	130	6050	5999	5953	5910	5871
140	6358	6290	6229	6172	6121	
150	6781	6687	6602	6525	6455	
160	7383	7245	7123	7013	6914	

Tabla 15.53. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 60 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	5742	5539	5421	5338	5273	5221	5176	5138	5104	5073
	-10	5792	5583	5464	5379	5314	5261	5217	5178	5144	5114
	0	5855	5634	5510	5423	5357	5303	5258	5219	5184	5154
	10	5935	5691	5560	5470	5402	5347	5300	5260	5225	5194
	20	6049	5765	5621	5524	5452	5394	5346	5305	5269	5237
	30	6220	5865	5698	5590	5511	5449	5398	5354	5317	5283
	40	6488	6007	5802	5676	5586	5517	5460	5413	5372	5336
	50	6925	6216	5947	5791	5684	5603	5539	5485	5440	5400
	60	7684	6537	6158	5952	5817	5718	5641	5578	5525	5480
	70	9152	7046	6472	6184	6003	5875	5778	5701	5637	5583
	80	12764	7910	6958	6526	6269	6095	5967	5867	5787	5719
	90	32299	9554	7754	7050	6662	6411	6233	6098	5991	5903
	100	-	13561	9193	7903	7267	6881	6618	6425	6276	6157
	110	-	35301	12367	9443	8263	7613	7197	6905	6686	6516
	120	-	-	24197	12855	10111	8854	8124	7643	7299	7040
	130	-	-	-	25879	14482	11290	9770	8872	8276	7849
	140	-	-	-	-	36077	17919	13336	11227	10005	9204
150	-	-	-	-	-	96604	26198	17276	13745	11841	
160	-	-	-	-	-	-	-	63735	27208	18907	

Tabla 15.54. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 60 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	5046	5021	4998	4977	4957	4938	4921	4904	4889	4874
	-10	5086	5061	5038	5016	4996	4978	4960	4944	4928	4914
	0	5126	5100	5077	5056	5036	5017	4999	4983	4967	4952
	10	5166	5140	5117	5095	5075	5056	5038	5021	5006	4991
	20	5208	5181	5157	5135	5115	5096	5077	5061	5045	5029
	30	5253	5226	5201	5178	5157	5137	5119	5101	5085	5070
	40	5304	5276	5250	5226	5203	5183	5163	5145	5128	5112
	50	5365	5334	5306	5280	5256	5234	5214	5195	5177	5160
	60	5441	5406	5374	5346	5319	5295	5273	5252	5233	5215
	70	5537	5496	5459	5427	5397	5370	5345	5322	5300	5280
	80	5662	5613	5569	5530	5495	5463	5434	5408	5383	5360
	90	5830	5767	5713	5665	5622	5584	5549	5517	5488	5461
	100	6059	5977	5906	5844	5790	5741	5698	5658	5622	5589
	110	6378	6265	6169	6086	6014	5951	5895	5844	5799	5757
	120	6837	6673	6536	6421	6322	6236	6161	6093	6033	5979
	130	7526	7273	7068	6899	6756	6634	6528	6435	6352	6278
	140	8636	8210	7878	7612	7393	7209	7052	6916	6798	6693
150	10644	9820	9215	8752	8384	8085	7837	7627	7447	7290	
160	15210	13109	11749	10795	10087	9540	9103	8746	8448	8196	

Tabla 15.55. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 60 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	4860	4847	4834	4822	4810
	-10	4900	4886	4873	4861	4849
	0	4938	4925	4912	4900	4888
	10	4976	4963	4950	4938	4926
	20	5015	5001	4988	4976	4964
	30	5055	5041	5028	5015	5003
	40	5097	5083	5069	5056	5043
	50	5144	5129	5115	5101	5088
	60	5198	5182	5166	5152	5138
	70	5261	5244	5227	5211	5196
	80	5339	5319	5300	5282	5265
	90	5436	5412	5390	5370	5350
	100	5559	5531	5505	5480	5457
	110	5719	5684	5651	5621	5593
	120	5929	5884	5843	5804	5769
	130	6212	6151	6097	6046	6000
140	6600	6517	6441	6373	6310	
150	7153	7031	6923	6825	6737	
160	7979	7790	7625	7478	7347	

Tabla 15.56. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 70 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	5743	5539	5421	5338	5273	5221	5176	5138	5104	5074
	-10	5795	5585	5465	5380	5315	5262	5217	5178	5144	5114
	0	5862	5637	5512	5425	5358	5304	5259	5220	5185	5154
	10	5950	5699	5565	5474	5405	5349	5302	5262	5227	5195
	20	6077	5778	5630	5531	5457	5399	5350	5308	5272	5239
	30	6271	5889	5714	5602	5521	5457	5405	5360	5322	5288
	40	6583	6049	5829	5696	5602	5530	5472	5423	5381	5344
	50	7106	6291	5995	5826	5711	5625	5558	5502	5455	5413
	60	8051	6670	6238	6010	5862	5755	5672	5605	5549	5501
	70	10029	7289	6610	6279	6076	5934	5828	5744	5675	5617
	80	15949	8393	7202	6687	6389	6191	6046	5935	5846	5772
	90	275813	10696	8217	7332	6864	6567	6360	6205	6084	5985
	100	-	17777	10214	8437	7621	7144	6826	6597	6423	6285
	110	-	-	15527	10623	8946	8084	7553	7190	6923	6718
	120	-	-	64927	16581	11694	9802	8785	8145	7702	7375
	130	-	-	-	86122	20272	13726	11208	9864	9022	8441
	140	-	-	-	-	-	30558	17808	13683	11627	10389
150	-	-	-	-	-	-	96224	28605	18831	14882	
160	-	-	-	-	-	-	-	-	119161	35054	

Tabla 15.57. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 70 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	5046	5021	4998	4977	4957	4938	4921	4904	4889	4874
	-10	5086	5061	5038	5017	4997	4978	4961	4944	4929	4914
	0	5126	5101	5078	5056	5036	5017	5000	4983	4968	4953
	10	5167	5141	5118	5096	5076	5057	5039	5022	5006	4991
	20	5210	5184	5159	5137	5116	5097	5079	5062	5046	5031
	30	5257	5230	5205	5181	5160	5140	5121	5104	5087	5072
	40	5312	5282	5256	5231	5209	5188	5168	5150	5133	5116
	50	5377	5345	5316	5289	5265	5242	5222	5202	5184	5167
	60	5460	5423	5390	5360	5333	5308	5285	5264	5244	5225
	70	5567	5523	5485	5450	5419	5390	5364	5340	5317	5296
	80	5709	5655	5608	5566	5529	5495	5464	5435	5409	5385
	90	5903	5833	5773	5720	5673	5631	5593	5559	5527	5498
	100	6172	6077	5997	5928	5867	5812	5764	5720	5681	5644
	110	6555	6421	6309	6214	6131	6059	5994	5937	5885	5839
	120	7123	6922	6757	6619	6502	6400	6311	6233	6163	6100
	130	8016	7689	7429	7217	7040	6890	6761	6649	6550	6462
	140	9558	8960	8507	8151	7864	7627	7427	7256	7108	6978
150	12736	11381	10446	9760	9234	8816	8477	8195	7957	7752	
160	22585	17533	14787	13056	11862	10988	10318	9787	9357	8999	

Tabla 15.58. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 70 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	4860	4847	4834	4822	4810
	-10	4900	4886	4873	4861	4849
	0	4939	4925	4912	4900	4888
	10	4977	4964	4951	4938	4926
	20	5016	5002	4989	4977	4965
	30	5057	5043	5030	5017	5004
	40	5101	5086	5072	5059	5047
	50	5150	5135	5120	5106	5093
	60	5208	5191	5175	5160	5146
	70	5277	5258	5241	5224	5208
	80	5362	5341	5321	5302	5285
	90	5471	5446	5422	5400	5379
	100	5611	5580	5552	5525	5500
	110	5796	5757	5720	5687	5656
	120	6043	5992	5944	5901	5861
	130	6383	6312	6248	6189	6135
140	6864	6762	6670	6588	6513	
150	7575	7419	7282	7159	7049	
160	8698	8440	8217	8021	7848	

Tabla 15.59. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 80 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	5744	5540	5422	5338	5274	5221	5176	5138	5104	5074
	-10	5799	5587	5466	5381	5316	5262	5218	5179	5145	5114
	0	5870	5641	5514	5427	5360	5306	5260	5220	5186	5155
	10	5964	5706	5570	5477	5407	5351	5304	5264	5228	5197
	20	6104	5792	5638	5537	5462	5403	5353	5311	5274	5242
	30	6323	5913	5729	5614	5530	5465	5411	5366	5327	5292
	40	6680	6093	5857	5717	5618	5543	5483	5433	5390	5352
	50	7296	6368	6042	5860	5738	5648	5577	5518	5469	5427
	60	8458	6808	6320	6068	5907	5791	5703	5632	5573	5523
	70	11116	7551	6753	6378	6151	5994	5878	5787	5713	5651
	80	21589	8945	7464	6856	6514	6289	6127	6004	5906	5825
	90	-	12191	8746	7640	7078	6731	6492	6316	6179	6068
	100	-	26455	11525	9058	8015	7429	7048	6779	6576	6417
	110	-	-	21208	12187	9767	8624	7950	7502	7179	6935
	120	-	-	-	23860	13953	11010	9580	8728	8158	7748
	130	-	-	-	-	35223	17710	13219	11142	9937	9145
	140	-	-	-	-	-	127262	27549	17727	13973	11978
150	-	-	-	-	-	-	-	96064	30882	20344	
160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	417129	

Tabla 15.60. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 80 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	5046	5021	4998	4977	4957	4938	4921	4904	4889	4874
	-10	5087	5061	5038	5017	4997	4978	4961	4944	4929	4914
	0	5127	5102	5078	5057	5037	5018	5000	4984	4968	4953
	10	5168	5143	5119	5097	5077	5058	5040	5023	5007	4992
	20	5212	5186	5161	5139	5118	5099	5081	5063	5047	5032
	30	5261	5234	5208	5185	5163	5143	5124	5106	5090	5074
	40	5319	5289	5262	5237	5214	5193	5173	5154	5137	5120
	50	5389	5356	5326	5299	5274	5251	5229	5209	5191	5173
	60	5479	5441	5406	5375	5347	5321	5297	5275	5255	5235
	70	5597	5551	5510	5474	5441	5411	5383	5358	5334	5312
	80	5757	5699	5648	5603	5562	5526	5493	5463	5435	5409
	90	5977	5900	5834	5776	5725	5679	5638	5600	5566	5535
	100	6288	6182	6091	6013	5945	5885	5832	5784	5740	5700
	110	6743	6586	6457	6347	6252	6170	6097	6033	5975	5922
	120	7437	7193	6995	6831	6692	6574	6470	6380	6299	6227
	130	8583	8162	7833	7569	7352	7170	7014	6880	6762	6658
	140	10735	9883	9261	8785	8409	8104	7850	7636	7452	7293
150	16002	13623	12115	11071	10305	9716	9249	8870	8554	8288	
160	46339	27138	20245	16686	14506	13030	11963	11155	10520	10007	

Tabla 15.61. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 80 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	4860	4847	4834	4822	4810
	-10	4900	4886	4874	4861	4850
	0	4939	4925	4913	4900	4888
	10	4978	4964	4951	4939	4927
	20	5017	5004	4990	4978	4966
	30	5059	5045	5031	5019	5006
	40	5105	5090	5076	5062	5050
	50	5156	5141	5126	5112	5098
	60	5217	5200	5184	5169	5154
	70	5292	5273	5255	5237	5221
	80	5385	5363	5342	5323	5304
	90	5506	5479	5454	5431	5409
	100	5664	5630	5599	5570	5543
	110	5875	5831	5791	5754	5720
	120	6162	6104	6050	6001	5955
	130	6566	6483	6408	6340	6277
	140	7153	7030	6920	6821	6731
150	8059	7861	7687	7534	7397	
160	9584	9229	8926	8665	8437	

Tabla 15.62. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 90 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	5745	5541	5422	5339	5274	5221	5177	5138	5104	5074
	-10	5802	5588	5467	5382	5316	5263	5218	5179	5145	5114
	0	5877	5644	5517	5429	5361	5307	5261	5221	5187	5156
	10	5978	5713	5574	5481	5410	5353	5306	5266	5230	5198
	20	6132	5805	5647	5544	5468	5407	5357	5314	5277	5244
	30	6375	5937	5745	5626	5539	5472	5418	5372	5332	5297
	40	6780	6136	5885	5737	5634	5557	5494	5443	5399	5360
	50	7497	6446	6091	5895	5766	5670	5596	5535	5484	5440
	60	8912	6951	6404	6127	5952	5829	5734	5659	5597	5544
	70	12502	7833	6903	6479	6227	6055	5929	5831	5751	5684
	80	34433	9584	7748	7035	6643	6390	6210	6074	5967	5879
	90	-	14242	9356	7977	7307	6904	6630	6430	6277	6154
	100	-	55092	13278	9790	8456	7740	7287	6971	6737	6556
	110	-	-	34570	14371	10779	9252	8397	7845	7457	7167
	120	-	-	-	44645	17454	12607	10556	9413	8679	8165
	130	-	-	-	-	168865	25450	16237	12856	11088	9995
	140	-	-	-	-	-	-	65685	25662	17671	14222
150	-	-	-	-	-	-	-	-	96095	33054	
160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla 15.63. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 90 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	5046	5021	4998	4977	4957	4938	4921	4905	4889	4874
	-10	5087	5062	5038	5017	4997	4978	4961	4944	4929	4914
	0	5128	5102	5079	5057	5037	5018	5001	4984	4968	4953
	10	5170	5144	5120	5098	5077	5058	5041	5024	5008	4993
	20	5215	5188	5163	5141	5120	5100	5082	5065	5049	5033
	30	5266	5237	5212	5188	5166	5146	5127	5109	5092	5076
	40	5326	5295	5268	5242	5219	5197	5177	5158	5141	5124
	50	5401	5367	5336	5308	5282	5259	5237	5216	5197	5179
	60	5498	5458	5422	5390	5361	5334	5310	5287	5266	5246
	70	5628	5579	5536	5497	5462	5431	5402	5376	5351	5328
	80	5805	5742	5687	5639	5596	5558	5523	5491	5461	5434
	90	6053	5968	5896	5832	5777	5727	5683	5643	5606	5572
	100	6410	6289	6188	6101	6026	5960	5901	5848	5800	5757
	110	6942	6761	6612	6486	6379	6286	6204	6132	6067	6009
	120	7784	7489	7252	7058	6896	6758	6638	6534	6442	6360
	130	9249	8706	8291	7963	7697	7476	7290	7130	6991	6869
	140	12291	11050	10184	9543	9049	8655	8333	8065	7838	7643
150	21826	17111	14506	12848	11698	10851	10201	9685	9265	8916	
160	-	63893	32914	23452	18852	16125	14316	13027	12060	11307	

Tabla 15.64. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 90 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	4860	4847	4834	4822	4810
	-10	4900	4887	4874	4861	4850
	0	4939	4926	4913	4901	4889
	10	4978	4965	4952	4939	4927
	20	5019	5005	4992	4979	4967
	30	5061	5047	5033	5020	5008
	40	5108	5093	5079	5066	5053
	50	5162	5146	5131	5117	5103
	60	5227	5210	5193	5177	5162
	70	5307	5287	5268	5251	5234
	80	5409	5385	5363	5343	5323
	90	5541	5513	5486	5461	5438
	100	5717	5681	5647	5616	5587
	110	5956	5908	5863	5823	5785
	120	6287	6220	6160	6104	6054
	130	6761	6664	6578	6499	6428
	140	7473	7324	7192	7074	6967
150	8622	8369	8150	7958	7788	
160	10703	10208	9793	9442	9139	

Tabla 15.65. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 100 %		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	5747	5541	5423	5339	5274	5221	5177	5138	5104	5074
	-10	5805	5590	5468	5383	5317	5264	5219	5180	5145	5115
	0	5884	5648	5519	5430	5363	5308	5262	5222	5187	5156
	10	5993	5720	5579	5484	5413	5356	5308	5267	5231	5200
	20	6159	5818	5656	5550	5473	5411	5361	5318	5280	5247
	30	6428	5962	5761	5637	5549	5480	5424	5377	5337	5301
	40	6883	6180	5913	5757	5651	5570	5506	5453	5407	5368
	50	7709	6526	6139	5930	5793	5693	5615	5551	5498	5453
	60	9423	7101	6490	6187	5999	5866	5766	5686	5621	5565
	70	14337	8138	7060	6583	6305	6117	5981	5875	5789	5719
	80	93991	10333	8056	7223	6778	6495	6295	6146	6029	5933
	90	-	17239	10070	8348	7552	7085	6774	6549	6378	6242
	100	-	-	15748	10668	8956	8081	7543	7176	6907	6700
	110	-	-	105303	17644	12056	9991	8903	8225	7759	7417
	120	-	-	-	682060	23637	14822	11784	10230	9281	8637
	130	-	-	-	-	-	47161	21284	15279	12584	11045
	140	-	-	-	-	-	-	-	48427	24380	17637
150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	96297	
160	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla 15.66. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 100 %		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	5046	5021	4998	4977	4957	4938	4921	4905	4889	4874
	-10	5087	5062	5039	5017	4997	4979	4961	4945	4929	4914
	0	5128	5103	5079	5058	5038	5019	5001	4984	4969	4954
	10	5171	5145	5121	5099	5078	5059	5041	5024	5009	4993
	20	5217	5190	5165	5143	5122	5102	5084	5066	5050	5035
	30	5270	5241	5215	5191	5169	5149	5129	5112	5095	5079
	40	5333	5302	5274	5248	5224	5202	5182	5163	5145	5128
	50	5413	5378	5346	5317	5291	5267	5244	5223	5204	5186
	60	5517	5476	5438	5405	5375	5347	5322	5298	5276	5256
	70	5659	5607	5561	5521	5484	5451	5421	5394	5368	5344
	80	5854	5786	5728	5676	5630	5589	5552	5518	5487	5459
	90	6131	6038	5959	5890	5830	5776	5729	5685	5646	5610
	100	6536	6401	6288	6192	6109	6036	5971	5914	5862	5815
	110	7155	6946	6775	6632	6511	6406	6315	6234	6162	6097
	120	8169	7813	7532	7304	7114	6954	6817	6697	6592	6499
	130	10045	9340	8815	8408	8082	7815	7591	7401	7238	7095
	140	14444	12574	11341	10466	9810	9299	8890	8554	8273	8034
150	35144	23285	18214	15389	13584	12329	11403	10691	10126	9666	
160	-	-	94757	40461	27299	21347	17946	15741	14192	13044	

Tabla 15.67. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



HR = 100 %		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Temperatura [°C]	-20	4860	4847	4834	4822	4810
	-10	4900	4887	4874	4862	4850
	0	4940	4926	4913	4901	4889
	10	4979	4965	4952	4940	4928
	20	5020	5006	4993	4980	4968
	30	5063	5049	5035	5022	5010
	40	5112	5097	5083	5069	5056
	50	5169	5152	5137	5122	5108
	60	5237	5219	5202	5186	5170
	70	5322	5302	5282	5264	5247
	80	5432	5408	5385	5363	5343
	90	5577	5547	5518	5492	5467
	100	5772	5733	5696	5663	5631
	110	6039	5986	5938	5893	5852
	120	6416	6342	6274	6212	6155
	130	6970	6858	6758	6668	6586
	140	7828	7649	7491	7350	7225
150	9283	8960	8683	8443	8233	
160	12157	11451	10875	10396	9990	

Tabla 15.68. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión, la temperatura y la humedad relativa (continuación)



$w = 0$		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-179,2	-164,7	-152,2	-141,4	-132,2	-124,1	-117	-110,6	-104,7	-99,34
	4800	-172,9	-154,1	-139	-126,7	-116,4	-107,6	-99,77	-92,77	-86,41	-80,57
	4900	-164,6	-141,3	-124	-110,4	-99,15	-89,52	-81,03	-73,41	-66,47	-60,09
	5000	-154	-126,5	-107,4	-92,58	-80,36	-69,86	-60,6	-52,26	-44,66	-37,66
	5100	-141,1	-110,2	-89,32	-73,2	-59,86	-48,37	-38,22	-29,06	-20,71	-13
	5200	-126,4	-92,39	-69,65	-52,03	-37,41	-24,79	-13,61	-3,533	5,679	14,18
	5300	-110	-72,99	-48,14	-28,81	-12,73	1,177	13,51	24,63	34,8	44,19
	5400	-92,19	-51,8	-24,53	-3,252	14,48	29,83	43,44	55,73	66,95	77,32
	5500	-72,78	-28,56	1,463	24,94	44,52	61,47	76,49	90,04	102,4	113,8
	5600	-51,57	-2,971	30,15	56,07	77,68	96,37	112,9	127,8	141,5	154
	5700	-28,3	25,25	61,81	90,42	114,2	134,8	153	169,4	184,3	198,1
	5800	-2,69	56,41	96,75	128,3	154,4	177	197	214,9	231,2	246,3
	5900	25,56	90,79	135,2	169,8	198,6	223,3	245,1	264,6	282,4	298,8
	6000	56,75	128,7	177,5	215,4	246,8	273,8	297,5	318,8	338,2	355,9
	6100	91,17	170,3	223,8	265,2	299,4	328,7	354,5	377,6	398,6	417,8
	6200	129,1	215,9	274,3	319,4	356,5	388,4	416,3	441,3	464	484,8
	6300	170,8	265,7	329,3	378,3	418,5	452,9	483,2	510,2	534,7	557,1
	6400	216,4	320	389	442	485,6	522,7	555,4	584,5	610,9	635,1
	6500	266,3	378,9	453,6	510,9	557,9	598,1	633,2	664,6	693,1	719,1
	6600	320,6	442,7	523,5	585,3	636	679,2	717,1	750,9	781,5	809,5
6700	379,5	511,7	598,9	665,5	720,1	766,6	807,3	843,7	876,6	906,8	
6800	443,4	586,1	680,1	751,8	810,5	860,6	904,4	943,5	978,9	1011	
6900	512,4	666,4	767,5	844,7	907,8	961,7	1009	1051	1089	1124	
7000	586,9	752,8	861,6	944,6	1012	1070	1121	1166	1207	1245	

Tabla 15.69. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta



$w = 0$		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-94,36	-89,72	-85,35	-81,24	-77,33	-73,62	-70,08	-66,69	-63,44	-60,31
	4800	-75,14	-70,08	-65,32	-60,82	-56,55	-52,49	-48,62	-44,9	-41,34	-37,9
	4900	-54,16	-48,61	-43,39	-38,46	-33,78	-29,32	-25,06	-20,97	-17,05	-13,27
	5000	-31,15	-25,05	-19,31	-13,88	-8,728	-3,813	0,8852	5,389	9,718	13,89
	5100	-5,826	0,8923	7,22	13,21	18,9	24,32	29,51	34,48	39,26	43,86
	5200	22,1	29,52	36,5	43,11	49,4	55,38	61,11	66,6	71,87	76,95
	5300	52,93	61,12	68,83	76,13	83,06	89,66	95,98	102	107,8	113,4
	5400	86,96	95,99	104,5	112,5	120,2	127,4	134,4	141	147,4	153,6
	5500	124,5	134,4	143,7	152,6	161	168,9	176,6	183,9	190,9	197,6
	5600	165,7	176,6	186,8	196,5	205,7	214,4	222,8	230,7	238,4	245,7
	5700	210,8	222,8	234	244,5	254,6	264,1	273,2	281,9	290,2	298,2
	5800	260,2	273,2	285,4	296,9	307,8	318,2	328,1	337,5	346,6	355,3
	5900	314	328,1	341,4	353,9	365,7	377	387,7	397,9	407,7	417,2
	6000	372,4	387,7	402,1	415,6	428,5	440,6	452,2	463,3	473,9	484,1
	6100	435,6	452,2	467,8	482,4	496,3	509,4	522	533,9	545,4	556,4
	6200	504,1	522	538,8	554,6	569,5	583,7	597,2	610,1	622,4	634,3
	6300	577,9	597,2	615,3	632,4	648,5	663,8	678,3	692,2	705,5	718,2
	6400	657,5	678,3	697,8	716,2	733,5	749,9	765,6	780,5	794,8	808,6
	6500	743,2	765,6	786,6	806,3	825	842,7	859,5	875,6	891	905,7
	6600	835,4	859,5	882,1	903,3	923,4	942,4	960,5	977,8	994,3	1010
6700	934,6	960,6	984,8	1008	1029	1050	1069	1088	1105	1123	
6800	1041	1069	1095	1120	1143	1165	1186	1206	1225	1243	
6900	1156	1186	1214	1240	1265	1289	1311	1333	1353	1373	
7000	1279	1311	1341	1370	1397	1422	1446	1469	1491	1513	

Tabla 15.70. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-57,3	-54,39	-51,57	-48,85	-46,2
	4800	-34,59	-31,4	-28,31	-25,31	-22,4
	4900	-9,626	-6,104	-2,696	0,6074	3,814
	5000	17,91	21,79	25,56	29,2	32,74
	5100	48,3	52,59	56,75	60,77	64,68
	5200	81,85	86,58	91,16	95,6	99,91
	5300	118,8	124	129,1	134	138,7
	5400	159,5	165,2	170,7	176,1	181,3
	5500	204,1	210,3	216,4	222,3	227,9
	5600	252,8	259,7	266,3	272,7	278,9
	5700	305,9	313,4	320,6	327,5	334,2
	5800	363,7	371,7	379,5	387,1	394,4
	5900	426,2	435	443,4	451,5	459,4
	6000	493,9	503,3	512,4	521,2	529,7
	6100	566,9	577,1	586,9	596,4	605,6
	6200	645,7	656,6	667,2	677,4	687,3
	6300	730,5	742,3	753,7	764,7	775,3
	6400	821,7	834,4	846,7	858,5	870
	6500	919,9	933,6	946,7	959,5	971,8
	6600	1025	1040	1054	1068	1081
6700	1139	1155	1170	1185	1199	
6800	1261	1278	1294	1310	1325	
6900	1392	1410	1428	1445	1461	
7000	1533	1552	1571	1590	1607	

Tabla 15.71. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,005$		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-117,7	-119,6	-119,8	-88,86
	4900	-	-	-	-	-107,6	-97,55	-89,13	-81,68	-74,94	-68,76
	5000	-	-	-115,7	-100,4	-88,47	-78,31	-69,37	-61,35	-54,05	-47,32
	5100	-	-117,9	-97,23	-81,65	-68,82	-57,78	-48,03	-39,25	-31,25	-23,86
	5200	-	-100,3	-78,38	-61,46	-47,44	-35,35	-24,65	-15	-6,185	1,95
	5300	-117,4	-81,74	-57,9	-39,39	-24	-10,7	1,084	11,71	21,43	30,4
	5400	-100,3	-61,58	-35,48	-15,14	1,797	16,45	29,45	41,18	51,89	61,79
	5500	-81,86	-39,52	-10,85	11,56	30,24	46,4	60,74	73,67	85,48	96,39
	5600	-61,7	-15,29	16,29	41	61,61	79,43	95,23	109,5	122,5	134,5
	5700	-39,65	11,4	46,23	73,48	96,18	115,8	133,2	148,8	163,1	176,2
	5800	-15,43	40,83	79,24	109,3	134,2	155,8	174,8	192	207,6	221,9
	5900	11,25	73,29	115,6	148,6	176	199,6	220,4	239,1	256,2	271,8
	6000	40,66	109	155,5	191,7	221,7	247,4	270,1	290,5	309	326,1
	6100	73,1	148,4	199,3	238,9	271,5	299,6	324,2	346,4	366,5	384,9
	6200	108,8	191,5	247,2	290,2	325,7	356,2	382,9	406,9	428,6	448,5
	6300	148,1	238,6	299,3	346	384,5	417,5	446,4	472,3	495,8	517,3
	6400	191,2	289,9	355,8	406,5	448,2	483,8	515	542,9	568,2	591,4
	6500	238,3	345,7	417,1	471,9	516,9	555,3	588,9	619	646,2	671,1
	6600	289,6	406,2	483,4	542,5	591	632,3	668,5	700,7	730	756,7
6700	345,4	471,6	554,9	618,5	670,6	715	753,9	788,5	819,7	848,3	
6800	405,8	542,1	631,8	700,3	756,2	803,8	845,3	882,3	915,7	946,1	
6900	471,2	618,1	714,5	788	847,8	898,6	942,9	982,2	1018	1050	
7000	541,7	699,8	803,3	881,8	945,5	999,5	1046	1088	1125	1158	

Tabla 15.72. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,005$		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-112,6	-90,27	-86,12	-82,29	-78,7	-75,31	-72,08	-68,99
	4800	-83,45	-78,45	-73,79	-69,41	-65,27	-61,33	-57,58	-54	-50,56	-47,25
	4900	-63,04	-57,69	-52,67	-47,92	-43,42	-39,14	-35,04	-31,12	-27,35	-23,73
	5000	-41,07	-35,22	-29,71	-24,51	-19,57	-14,86	-10,35	-6,037	-1,89	2,103
	5100	-16,99	-10,55	-4,496	1,236	6,682	11,87	16,84	21,6	26,17	30,57
	5200	9,521	16,61	23,29	29,62	35,62	41,35	46,82	52,07	57,12	61,98
	5300	38,76	46,58	53,95	60,92	67,55	73,86	79,89	85,68	91,24	96,59
	5400	71	79,62	87,75	95,43	102,7	109,7	116,3	122,7	128,8	134,7
	5500	106,5	116	125	133,4	141,4	149	156,3	163,3	170	176,5
	5600	145,6	156	165,8	175,1	183,9	192,2	200,2	207,8	215,2	222,2
	5700	188,4	199,8	210,6	220,7	230,3	239,4	248,1	256,4	264,4	272,1
	5800	235,3	247,7	259,4	270,4	280,9	290,8	300,3	309,3	318	326,4
	5900	286,3	299,9	312,6	324,6	335,9	346,7	357	366,8	376,2	385,2
	6000	341,8	356,5	370,3	383,3	395,6	407,2	418,3	429	439,1	448,9
	6100	401,9	417,9	432,8	446,8	460,1	472,7	484,7	496,2	507,1	517,7
	6200	467	484,2	500,3	515,4	529,7	543,3	556,3	568,6	580,5	591,8
	6300	537,2	555,7	573	589,3	604,8	619,4	633,3	646,6	659,3	671,5
	6400	612,8	632,7	651,4	668,9	685,5	701,2	716,2	730,4	744,1	757,2
	6500	694,1	715,5	735,5	754,3	772,1	789	805	820,3	834,9	848,9
	6600	781,3	804,3	825,7	845,8	864,8	882,8	899,9	916,2	931,8	946,7
6700	874,7	899,2	922	943,4	963,6	982,7	1001	1018	1035	1050	
6800	974,1	1000	1024	1047	1068	1088	1107	1125	1143	1159	
6900	1079	1107	1132	1156	1178	1199	1218	1237	1255	1272	
7000	1189	1218	1244	1268	1291	1312	1332	1351	1369	1386	

Tabla 15.73. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,005$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-66,03	-63,18	-60,43	-57,77	-55,2
	4800	-44,06	-40,98	-38	-35,12	-32,32
	4900	-20,23	-16,85	-13,58	-10,41	-7,338
	5000	5,955	9,678	13,28	16,77	20,16
	5100	34,82	38,93	42,9	46,76	50,49
	5200	66,66	71,19	75,57	79,82	83,94
	5300	101,7	106,7	111,6	116,2	120,8
	5400	140,3	145,8	151,1	156,2	161,2
	5500	182,7	188,7	194,5	200,1	205,5
	5600	229	235,5	241,9	248	253,9
	5700	279,5	286,6	293,5	300,2	306,6
	5800	334,4	342,1	349,6	356,8	363,8
	5900	393,9	402,3	410,4	418,2	425,8
	6000	458,3	467,4	476,1	484,5	492,7
	6100	527,8	537,6	547	556,1	564,9
	6200	602,7	613,2	623,4	633,2	642,6
	6300	683,3	694,6	705,5	716	726,1
	6400	769,7	781,8	793,5	804,8	815,7
	6500	862,3	875,2	887,7	899,7	911,3
	6600	960,9	974,7	987,9	1001	1013
6700	1065	1080	1094	1107	1120	
6800	1175	1190	1204	1218	1231	
6900	1288	1303	1318	1332	1345	
7000	1402	1418	1432	1446	1460	

Tabla 15.74. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,010		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-85,14	-78,08
	5000	-	-	-	-	-	-87,07	-77,79	-69,76	-62,57	-55,99
	5100	-	-	-107,7	-89,77	-76,95	-66,16	-56,7	-48,22	-40,49	-33,37
	5200	-	-108,9	-86,26	-69,78	-56,24	-44,59	-34,29	-25,02	-16,55	-8,732
	5300	-	-89,53	-66,46	-48,64	-33,85	-21,08	-9,768	0,433	9,755	18,36
	5400	-134,9	-70,15	-45,06	-25,54	-9,29	4,76	17,22	28,46	38,73	48,21
	5500	-89,83	-49,11	-21,62	-0,1478	17,74	33,23	46,95	59,34	70,66	81,1
	5600	-70,59	-26,07	4,17	27,82	47,54	64,6	79,72	93,35	105,8	117,3
	5700	-49,6	-0,7266	32,58	58,64	80,36	99,14	115,8	130,8	144,4	157
	5800	-26,59	27,18	63,88	92,58	116,5	137,1	155,4	171,8	186,7	200,5
	5900	-1,302	57,94	98,36	129,9	156,1	178,7	198,7	216,6	233	248
	6000	26,55	91,82	136,2	170,8	199,5	224,2	246	265,5	283,3	299,7
	6100	57,25	129,1	177,8	215,6	246,9	273,8	297,5	318,7	338	355,7
	6200	91,05	169,9	223,2	264,4	298,5	327,7	353,4	376,4	397,2	416,4
	6300	128,2	214,6	272,7	317,5	354,5	386,1	413,9	438,7	461,3	481,9
	6400	169	263,3	326,5	375,1	415	449,2	479,2	506	530,3	552,6
	6500	213,6	316,3	384,8	437,3	480,5	517,3	549,6	578,5	604,6	628,5
	6600	262,3	373,8	447,8	504,5	551	590,6	625,4	656,3	684,4	710
6700	315,2	435,9	515,8	576,8	626,8	669,4	706,6	739,8	769,7	797,1	
6800	372,5	503	589	654,6	708,2	753,7	793,5	828,8	860,7	889,7	
6900	434,5	575,2	667,6	737,9	795,2	843,7	885,9	923,2	956,8	987,3	
7000	501,5	652,9	751,9	826,8	887,6	938,9	983,3	1022	1057	1089	

Tabla 15.75. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,010		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-90,74	-76,65	-71,84	-67,61	-63,73	-60,11	-56,69
	4900	-72,01	-66,53	-61,48	-56,76	-52,31	-48,1	-44,1	-40,27	-36,6	-33,08
	5000	-49,91	-44,23	-38,91	-33,87	-29,1	-24,56	-20,22	-16,06	-12,06	-8,216
	5100	-26,76	-20,56	-14,74	-9,224	-3,988	1,002	5,772	10,34	14,74	18,97
	5200	-1,462	5,348	11,76	17,83	23,6	29,09	34,35	39,39	44,23	48,89
	5300	26,37	33,87	40,94	47,63	53,99	60,04	65,83	71,38	76,72	81,85
	5400	57,04	65,31	73,1	80,46	87,46	94,13	100,5	106,6	112,5	118,1
	5500	90,82	99,92	108,5	116,6	124,3	131,6	138,6	145,3	151,7	157,9
	5600	128	138	147,4	156,2	164,7	172,7	180,4	187,7	194,7	201,5
	5700	168,7	179,7	190	199,7	208,9	217,6	226	234	241,7	249,1
	5800	213,3	225,2	236,5	247,1	257,1	266,6	275,7	284,4	292,8	300,8
	5900	261,9	274,9	287,1	298,6	309,5	319,9	329,8	339,2	348,3	357
	6000	314,8	328,9	342,1	354,6	366,4	377,7	388,4	398,6	408,4	417,8
	6100	372,1	387,4	401,7	415,2	428	440,1	451,7	462,7	473,3	483,4
	6200	434,1	450,6	466,1	480,7	494,4	507,5	520	531,8	543,2	554,1
	6300	501	518,8	535,5	551,2	566	580,1	593,5	606,3	618,5	630,2
	6400	573,1	592,3	610,2	627	643	658,1	672,4	686,1	699,2	711,8
	6500	650,6	671,1	690,4	708,4	725,5	741,6	757	771,6	785,6	799
	6600	733,6	755,6	776,1	795,4	813,6	830,8	847,1	862,7	877,5	891,7
6700	822,3	845,7	867,5	887,9	907,2	925,3	942,6	958,9	974,5	989,4	
6800	916,4	941	964	985,4	1006	1025	1042	1059	1076	1091	
6900	1015	1041	1065	1087	1108	1127	1145	1163	1179	1195	
7000	1117	1144	1168	1191	1211	1231	1249	1267	1283	1298	

Tabla 15.76. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,010$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-73,82	-68,83
	4800	-53,44	-50,33	-47,34	-44,47	-41,69
	4900	-29,69	-26,41	-23,25	-20,18	-17,21
	5000	-4,508	-0,9244	2,543	5,904	9,166
	5100	23,05	27	30,82	34,52	38,11
	5200	53,39	57,74	61,95	66,02	69,98
	5300	86,81	91,59	96,22	100,7	105,1
	5400	123,6	128,8	133,9	138,8	143,6
	5500	163,9	169,6	175,2	180,6	185,8
	5600	208	214,3	220,4	226,3	232
	5700	256,2	263	269,6	276	282,2
	5800	308,5	316	323,2	330,1	336,8
	5900	365,3	373,4	381,2	388,7	396
	6000	426,8	435,5	443,9	452	459,9
	6100	493,1	502,5	511,6	520,4	528,8
	6200	564,6	574,7	584,5	593,9	603
	6300	641,5	652,3	662,8	672,9	682,7
	6400	723,9	735,5	746,7	757,5	767,9
	6500	811,9	824,3	836,2	847,7	858,8
	6600	905,4	918,4	931	943,1	954,8
6700	1004	1017	1030	1043	1055	
6800	1106	1120	1133	1146	1158	
6900	1209	1224	1237	1250	1262	
7000	1313	1326	1340	1352	1364	

Tabla 15.77. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,015		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-89,11	-73,14	-65,72
	5100	-	-	-	-	-100,7	-75,17	-65,42	-56,95	-49,34	-42,38
	5200	-	-	-108,9	-78,11	-64,63	-53,25	-43,26	-34,29	-26,11	-18,58
	5300	-	-116,9	-74,56	-57,22	-42,93	-30,62	-19,73	-9,919	-0,9557	7,318
	5400	-	-78,15	-53,87	-35,08	-19,45	-5,954	6,01	16,8	26,67	35,78
	5500	-97,38	-57,93	-31,48	-10,87	6,302	21,16	34,33	46,21	57,07	67,1
	5600	-78,76	-35,94	-6,93	15,75	34,65	51,01	65,51	78,59	90,54	101,6
	5700	-58,72	-11,83	20,08	45,05	65,86	83,86	99,81	114,2	127,3	139,4
	5800	-36,82	14,69	49,83	77,31	100,2	120	137,5	153,2	167,6	180,8
	5900	-12,79	43,89	82,57	112,8	137,9	159,6	178,7	196	211,6	226,1
	6000	13,64	76,04	118,6	151,7	179,2	202,9	223,8	242,6	259,6	275,3
	6100	42,74	111,4	158	194,3	224,3	250,1	272,9	293,3	311,8	328,8
	6200	74,78	150,2	201,2	240,7	273,4	301,5	326,1	348,2	368,3	386,7
	6300	110	192,6	248,3	291,3	326,7	357,1	383,8	407,7	429,4	449,3
	6400	148,6	238,9	299,5	346,1	384,5	417,3	446,2	471,9	495,3	516,7
	6500	191	289,3	355	405,4	446,9	482,3	513,4	541,1	566,2	589,3
	6600	237,1	344	415	469,5	514,1	552,2	585,6	615,4	642,4	667
6700	287,3	403,1	479,8	538,4	586,4	627,4	663,1	695	723,8	750,1	
6800	341,8	467	549,5	612,5	664	707,8	746	780	810,5	838,4	
6900	400,8	535,7	624,4	691,9	746,9	793,5	834	869,9	902,1	931,3	
7000	464,5	609,7	704,7	776,7	835	884,2	926,7	964,2	997,6	1028	

Tabla 15.78. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,015		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-71,56	-64,57	-59,37	-54,82	-50,66	-46,79	-43,13
	5000	-59,3	-53,49	-48,13	-43,12	-38,4	-33,93	-29,68	-25,62	-21,73	-17,98
	5100	-35,94	-29,93	-24,28	-18,95	-13,89	-9,071	-4,467	-0,05568	4,182	8,261
	5200	-11,57	-5,014	1,16	7,002	12,55	17,84	22,89	27,74	32,4	36,88
	5300	15,02	22,23	29,02	35,45	41,55	47,38	52,94	58,28	63,4	68,34
	5400	44,25	52,19	59,67	66,74	73,46	79,87	85,99	91,86	97,5	102,9
	5500	76,43	85,16	93,39	101,2	108,6	115,6	122,3	128,8	134,9	140,9
	5600	111,8	121,4	130,4	139	147,1	154,8	162,1	169,2	175,9	182,5
	5700	150,6	161,1	171	180,4	189,2	197,6	205,7	213,4	220,8	227,9
	5800	193,1	204,6	215,4	225,6	235,2	244,4	253,1	261,5	269,6	277,3
	5900	239,5	252	263,7	274,8	285,3	295,2	304,8	313,8	322,6	330,9
	6000	289,9	303,5	316,2	328,2	339,6	350,4	360,7	370,5	380	389
	6100	344,6	359,3	373,1	386,1	398,4	410,1	421,2	431,8	442	451,8
	6200	403,8	419,7	434,6	448,6	461,9	474,5	486,4	497,9	508,9	519,4
	6300	467,7	484,8	500,9	516	530,3	543,8	556,7	569	580,8	592,1
	6400	536,5	555	572,2	588,4	603,8	618,3	632,1	645,3	658	670,1
	6500	610,5	630,3	648,8	666,2	682,6	698,1	712,9	727	740,5	753,4
	6600	689,8	710,9	730,7	749,2	766,7	783,2	798,9	813,9	828,2	841,8
6700	774,4	796,8	817,8	837,4	855,9	873,4	889,9	905,6	920,6	934,9	
6800	864	887,7	909,7	930,3	949,6	967,8	984,9	1001	1017	1031	
6900	958	982,6	1005	1027	1046	1065	1083	1099	1115	1129	
7000	1055	1080	1103	1125	1145	1163	1180	1197	1212	1227	

Tabla 15.79. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,015$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-58,2
	4900	-39,66	-36,34	-33,15	-30,09	-27,13
	5000	-14,38	-10,9	-7,541	-4,285	-1,128
	5100	12,19	16	19,68	23,24	26,7
	5200	41,21	45,39	49,44	53,36	57,17
	5300	73,1	77,7	82,15	86,47	90,65
	5400	108,2	113,2	118,1	122,8	127,4
	5500	146,6	152,2	157,5	162,7	167,7
	5600	188,7	194,8	200,6	206,3	211,8
	5700	234,7	241,3	247,7	253,8	259,8
	5800	284,7	291,9	298,8	305,5	312
	5900	339	346,7	354,2	361,5	368,5
	6000	397,7	406,1	414,2	422	429,6
	6100	461,1	470,2	478,9	487,4	495,5
	6200	529,5	539,2	548,6	557,7	566,5
	6300	602,9	613,4	623,5	633,2	642,6
	6400	681,7	692,9	703,6	714,1	724,1
	6500	765,7	777,6	789,1	800,2	810,8
	6600	854,9	867,5	879,6	891,2	902,4
6700	948,5	961,6	974,2	986,3	997,9	
6800	1045	1059	1072	1084	1096	
6900	1143	1157	1170	1182	1193	
7000	1240	1253	1266	1278	1289	

Tabla 15.80. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,020$		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-68,03	-59,34	-51,99
	5200	-	-	-	-	-74,2	-62,18	-52,14	-43,28	-35,28	-27,94
	5300	-	-	-83,48	-65,64	-51,59	-39,62	-29,08	-19,6	-10,95	-2,971
	5400	-	-86,3	-62,22	-43,99	-28,92	-15,91	-4,394	5,991	15,48	24,24
	5500	-106,2	-66,19	-40,65	-20,81	-4,301	9,976	22,63	34,05	44,49	54,12
	5600	-86,48	-45,11	-17,21	4,568	22,72	38,42	52,35	64,91	76,38	86,97
	5700	-67,19	-22,11	8,519	32,47	52,44	69,72	85,02	98,82	111,4	123
	5800	-46,29	3,135	36,82	63,17	85,13	104,1	120,9	136	149,8	162,6
	5900	-23,41	30,9	67,96	96,92	121	141,8	160,2	176,8	191,8	205,7
	6000	1,711	61,45	102,2	133,9	160,3	183,1	203,2	221,2	237,6	252,7
	6100	29,34	95,03	139,7	174,5	203,3	228,1	250	269,6	287,4	303,8
	6200	59,73	131,9	180,8	218,7	250,1	277,1	300,8	322,1	341,4	359,1
	6300	93,15	172,2	225,6	266,9	301	330,2	355,9	378,9	399,8	418,9
	6400	129,8	216,3	274,4	319,2	356,1	387,7	415,4	440,2	462,7	483,4
	6500	170	264,2	327,2	375,7	415,6	449,7	479,6	506,3	530,5	552,7
	6600	213,8	316,3	384,5	436,8	479,8	516,5	548,6	577,3	603,3	627,1
6700	261,5	372,6	446,3	502,7	548,9	588,3	622,7	653,4	681,2	706,5	
6800	313,4	433,4	512,8	573,4	623	665,1	701,9	734,6	764,1	791	
6900	369,5	499	584,3	649,2	702,2	747	786,1	820,7	851,7	879,9	
7000	430,1	569,5	660,9	730,2	786,4	833,8	874,8	910,9	943,2	972,2	

Tabla 15.81. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,020		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-62,56	-55,38	-49,77	-44,81	-40,26	-36,02	-32,02	-28,22
	5100	-45,41	-39,37	-33,76	-28,5	-23,53	-18,82	-14,33	-10,03	-5,909	-1,948
	5200	-21,14	-14,79	-8,811	-3,165	2,195	7,301	12,18	16,86	21,35	25,67
	5300	4,447	11,39	17,93	24,12	30	35,61	40,96	46,1	51,03	55,78
	5400	32,39	40,02	47,22	54,02	60,48	66,64	72,53	78,18	83,6	88,82
	5500	63,09	71,48	79,39	86,87	93,97	100,7	107,2	113,4	119,3	125,1
	5600	96,82	106	114,7	122,9	130,7	138,1	145,2	152	158,5	164,8
	5700	133,8	143,9	153,4	162,4	170,9	179,1	186,8	194,2	201,3	208,1
	5800	174,4	185,4	195,8	205,6	214,9	223,7	232,1	240,2	247,9	255,4
	5900	218,6	230,6	241,9	252,6	262,7	272,3	281,5	290,2	298,6	306,7
	6000	266,7	279,8	292,1	303,7	314,6	325	334,9	344,4	353,5	362,2
	6100	319	333,2	346,4	359	370,8	382,1	392,8	403	412,8	422,3
	6200	375,6	390,9	405,2	418,7	431,5	443,7	455,2	466,3	476,8	487
	6300	436,6	453,1	468,6	483,2	496,9	510	522,4	534,3	545,7	556,6
	6400	502,5	520,2	536,8	552,5	567,3	581,3	594,6	607,3	619,5	631,2
	6500	573,2	592,2	610,1	626,8	642,7	657,6	671,9	685,5	698,5	710,9
	6600	649	669,4	688,4	706,3	723,1	739,1	754,3	768,7	782,5	795,7
6700	729,9	751,6	771,8	790,7	808,6	825,4	841,4	856,5	871	884,8	
6800	815,7	838,5	859,8	879,6	898,3	915,8	932,4	948,1	963,1	977,3	
6900	905,7	929,5	951,5	972	991,1	1009	1026	1042	1057	1071	
7000	998,7	1023	1045	1066	1085	1103	1120	1136	1150	1165	

Tabla 15.82. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,020$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-51,85	-45,45	-41,24
	5000	-24,6	-21,12	-17,77	-14,54	-11,42
	5100	1,869	5,554	9,118	12,57	15,92
	5200	29,84	33,87	37,77	41,55	45,22
	5300	60,37	64,79	69,08	73,23	77,26
	5400	93,86	98,72	103,4	108	112,4
	5500	130,6	135,9	141,1	146,1	150,9
	5600	170,8	176,6	182,3	187,7	193
	5700	214,7	221,1	227,2	233,2	238,9
	5800	262,5	269,4	276,1	282,6	288,8
	5900	314,4	321,9	329,2	336,1	342,9
	6000	370,6	378,7	386,5	394,1	401,4
	6100	431,3	440	448,5	456,6	464,5
	6200	496,7	506,1	515,2	523,9	532,4
	6300	567	577,1	586,8	596,2	605,3
	6400	642,4	653,2	663,6	673,6	683,3
	6500	722,9	734,4	745,4	756,1	766,4
	6600	808,3	820,4	832,1	843,3	854,1
6700	898	910,6	922,8	934,4	945,6	
6800	990,8	1004	1016	1028	1039	
6900	1085	1098	1110	1122	1133	
7000	1178	1190	1202	1214	1225	

Tabla 15.83. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,025$		Presión [Pa]																			
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000										
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-63,04	-53,18	-44,87	-37,46	-	-	-	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-75,9	-60,6	-48,55	-38,15	-28,88	-20,47	-12,73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5400	-	-	-70,71	-52,59	-37,9	-25,3	-14,17	-4,148	5,001	13,44	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5500	-	-74,28	-49,31	-30,13	-14,21	-0,464	11,72	22,71	32,75	42,02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5600	-117,5	-53,7	-26,81	-5,851	11,6	26,7	40,09	52,16	63,19	73,38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5700	-75,16	-31,69	-2,248	20,76	39,95	56,54	71,25	84,51	96,62	107,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5800	-55,12	-7,619	24,72	50,01	71,09	89,32	105,5	120	133,3	145,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5900	-33,3	18,82	54,36	82,15	105,3	125,3	142,9	158,9	173,4	186,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6000	-9,384	47,88	86,93	117,4	142,8	164,6	183,9	201,3	217,1	231,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6100	16,88	79,81	122,7	156	183,7	207,6	228,6	247,5	264,6	280,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6200	45,76	114,9	161,8	198,2	228,4	254,3	277,1	297,6	316,2	333,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6300	77,49	153,2	204,5	244,1	276,9	305	329,8	351,9	372	390,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6400	112,3	195,2	250,9	294	329,5	359,9	386,6	410,6	432,3	452,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6500	150,5	240,8	301,4	348	386,4	419,2	448	473,8	497,1	518,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6600	192,1	290,4	356	406,3	447,7	483	514	541,7	566,7	589,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6700	237,5	344,1	414,9	469,2	513,7	551,7	584,9	614,5	641,3	665,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6800	286,8	402,1	478,5	536,8	584,5	625,2	660,7	692,3	720,7	746,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
6900	340,2	464,7	546,7	609,3	660,3	703,6	741,3	774,8	804,8	832,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
7000	398	531,9	619,9	686,7	740,9	786,8	826,4	861,4	892,7	921	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Tabla 15.84. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,025$		Presión [Pa]																		
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000									
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-47,77
	5100	-61,62	-51,88	-45,19	-39,4	-34,14	-29,27	-24,69	-20,36	-16,24	-12,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-12,3
	5200	-30,69	-24,41	-18,55	-13,03	-7,799	-2,83	1,912	6,45	10,81	15	-	-	-	-	-	-	-	-	15
	5300	-5,552	1,166	7,487	13,46	19,14	24,54	29,71	34,67	39,42	44,01	-	-	-	-	-	-	-	-	44,01
	5400	21,3	28,65	35,58	42,13	48,35	54,29	59,96	65,4	70,62	75,65	-	-	-	-	-	-	-	-	75,65
	5500	50,64	58,72	66,33	73,53	80,36	86,87	93,1	99,06	104,8	110,3	-	-	-	-	-	-	-	-	110,3
	5600	82,85	91,72	100,1	108	115,5	122,6	129,4	136	142,2	148,3	-	-	-	-	-	-	-	-	148,3
	5700	118,2	127,9	137	145,7	153,9	161,7	169,2	176,3	183,1	189,7	-	-	-	-	-	-	-	-	189,7
	5800	156,9	167,5	177,5	186,9	195,9	204,4	212,5	220,3	227,7	234,9	-	-	-	-	-	-	-	-	234,9
	5900	199,1	210,7	221,6	231,8	241,6	250,8	259,7	268,1	276,2	284	-	-	-	-	-	-	-	-	284
	6000	245,1	257,7	269,5	280,7	291,2	301,3	310,8	320	328,7	337,2	-	-	-	-	-	-	-	-	337,2
	6100	295,1	308,7	321,5	333,6	345	355,9	366,2	376,1	385,5	394,6	-	-	-	-	-	-	-	-	394,6
	6200	349,1	363,9	377,7	390,8	403,1	414,8	426	436,6	446,8	456,6	-	-	-	-	-	-	-	-	456,6
	6300	407,6	423,5	438,4	452,4	465,7	478,3	490,3	501,8	512,7	523,3	-	-	-	-	-	-	-	-	523,3
	6400	470,5	487,7	503,7	518,8	533,1	546,6	559,5	571,8	583,5	594,8	-	-	-	-	-	-	-	-	594,8
	6500	538,2	556,6	573,8	590	605,3	619,8	633,5	646,7	659,2	671,2	-	-	-	-	-	-	-	-	671,2
	6600	610,8	630,5	648,9	666,1	682,4	697,8	712,5	726,5	739,8	752,5	-	-	-	-	-	-	-	-	752,5
6700	688,3	709,2	728,8	747,1	764,4	780,7	796,1	810,8	824,8	838,2	-	-	-	-	-	-	-	-	838,2	
6800	770,6	792,7	813,3	832,5	850,6	867,6	883,7	899	913,5	927,3	-	-	-	-	-	-	-	-	927,3	
6900	857,1	880,1	901,5	921,4	940	957,5	973,9	989,4	1004	1018	-	-	-	-	-	-	-	-	1018	
7000	946,7	970,3	992	1012	1031	1048	1065	1080	1095	1108	-	-	-	-	-	-	-	-	1108	

Tabla 15.85. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,025$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-
	5000	-39,95	-35,15	-31,03	-27,29	-23,81
	5100	-8,516	-4,88	-1,373	2,015	5,296
	5200	19,03	22,94	26,71	30,37	33,91
	5300	48,42	52,69	56,83	60,83	64,72
	5400	80,5	85,18	89,71	94,11	98,37
	5500	115,6	120,8	125,7	130,5	135,2
	5600	154,1	159,7	165,1	170,4	175,5
	5700	196,1	202,2	208,1	213,8	219,4
	5800	241,8	248,5	254,9	261,1	267,2
	5900	291,5	298,7	305,7	312,4	318,9
	6000	345,3	353,1	360,6	367,9	375
	6100	403,4	411,8	419,9	427,8	435,4
	6200	466	475,1	483,8	492,3	500,5
	6300	533,4	543,1	552,5	561,6	570,4
	6400	605,6	616	626,1	635,8	645,2
	6500	682,8	693,9	704,6	714,9	724,9
	6600	764,7	776,5	787,8	798,7	809,2
6700	851	863,2	875	886,3	897,2	
6800	940,4	953	965,1	976,6	987,7	
6900	1031	1044	1056	1067	1078	
7000	1121	1134	1145	1157	1167	

Tabla 15.86. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,030		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-49,82
	5300	-	-	-	-	-	-59,03	-47,83	-38,38	-29,98	-22,35
	5400	-	-	-88,56	-61,64	-46,8	-34,39	-23,54	-13,81	-4,942	3,223
	5500	-	-83,64	-57,77	-39,01	-23,58	-10,3	1,457	12,05	21,73	30,66
	5600	-	-61,94	-35,84	-15,63	1,188	15,72	28,61	40,23	50,85	60,65
	5700	-82,93	-40,68	-12,32	9,815	28,26	44,22	58,37	71,12	82,78	93,53
	5800	-63,42	-17,67	13,41	37,72	57,98	75,5	91,02	105	117,8	129,5
	5900	-42,54	7,534	41,67	68,36	90,59	109,8	126,8	142,1	156,1	168,9
	6000	-19,74	35,21	72,69	102	126,3	147,3	165,9	182,6	197,8	211,8
	6100	5,266	65,61	106,7	138,8	165,4	188,3	208,6	226,7	243,3	258,5
	6200	32,73	98,97	144	179	208	233	255	274,7	292,6	309,1
	6300	62,89	135,5	184,7	222,8	254,4	281,4	305,3	326,6	346	363,8
	6400	95,99	175,4	229	270,4	304,6	333,9	359,7	382,7	403,6	422,8
	6500	132,2	218,9	277,1	322	359	390,6	418,3	443,2	465,7	486,3
	6600	171,9	266,2	329,2	377,7	417,6	451,6	481,5	508,2	532,4	554,5
6700	215,1	317,4	385,6	437,8	480,7	517,3	549,3	577,9	603,8	627,4	
6800	262	372,8	446,2	502,5	548,5	587,7	621,9	652,5	680	705,1	
6900	312,9	432,5	511,5	571,8	621	662,8	699,3	731,7	760,8	787,2	
7000	367,9	496,7	581,5	645,9	698,3	742,6	781,1	815,1	845,5	873	

Tabla 15.87. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,030		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-41,34	-34,68	-29,51	-24,95
	5200	-41,89	-35,11	-29	-23,36	-18,1	-13,14	-8,431	-3,949	0,3374	4,449
	5300	-15,3	-8,739	-2,583	3,227	8,735	13,98	18,99	23,78	28,39	32,82
	5400	10,81	17,92	24,6	30,93	36,93	42,65	48,13	53,37	58,41	63,25
	5500	38,97	46,75	54,08	61,02	67,6	73,88	79,88	85,62	91,15	96,46
	5600	69,77	78,31	86,35	93,95	101,2	108	114,6	120,9	127	132,8
	5700	103,5	112,9	121,7	130	137,9	145,4	152,6	159,5	166,1	172,5
	5800	140,5	150,7	160,3	169,4	178,1	186,3	194,1	201,6	208,8	215,7
	5900	180,9	192	202,5	212,4	221,8	230,7	239,2	247,4	255,2	262,7
	6000	224,8	237	248,4	259,1	269,3	279	288,2	297	305,5	313,6
	6100	272,6	285,8	298,1	309,7	320,8	331,2	341,2	350,8	359,9	368,7
	6200	324,4	338,6	351,9	364,5	376,4	387,7	398,5	408,8	418,6	428,1
	6300	380,3	395,6	410	423,6	436,4	448,6	460,1	471,2	481,8	492
	6400	440,6	457,1	472,6	487,1	500,9	514	526,4	538,3	549,7	560,6
	6500	505,4	523,1	539,7	555,4	570,1	584,1	597,4	610,1	622,3	633,9
	6600	574,9	593,9	611,7	628,4	644,1	659,1	673,2	686,7	699,7	712
6700	649,2	669,5	688,4	706,1	722,8	738,6	753,6	767,9	781,5	794,5	
6800	728,3	749,7	769,6	788,3	805,8	822,4	838	852,9	867	880,5	
6900	811,5	833,9	854,7	874,1	892,2	909,3	925,3	940,5	954,9	968,5	
7000	898,1	921,1	942,3	962,1	980,4	997,6	1014	1029	1043	1057	

Tabla 15.88. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,030$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-
	5100	-20,77	-16,86	-13,16	-9,635	-6,262
	5200	8,404	12,22	15,9	19,46	22,92
	5300	37,09	41,22	45,21	49,08	52,83
	5400	67,93	72,45	76,82	81,06	85,17
	5500	101,6	106,5	111,3	116	120,5
	5600	138,4	143,8	149	154,1	159
	5700	178,6	184,5	190,2	195,7	201,1
	5800	222,3	228,8	235	241	246,8
	5900	269,9	276,9	283,6	290,1	296,4
	6000	321,4	329	336,3	343,3	350,1
	6100	377,1	385,3	393,1	400,7	408,1
	6200	437,2	445,9	454,4	462,6	470,5
	6300	501,7	511,2	520,2	529	537,5
	6400	571	581,1	590,8	600,2	609,3
	6500	645,1	655,8	666,2	676,2	685,8
	6600	723,8	735,2	746,2	756,7	766,9
6700	806,9	818,8	830,3	841,3	851,9	
6800	893,3	905,6	917,4	928,6	939,5	
6900	981,5	993,9	1006	1017	1028	
7000	1069	1082	1093	1104	1115	

Tabla 15.89. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,035		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-	-	-	-	-50,73	-40,92	-32,78
	5400	-	-	-	-	-56,92	-43,85	-32,93	-23,31	-14,62	-6,652
	5500	-	-	-66,99	-47,82	-32,64	-19,7	-8,304	1,949	11,3	19,93
	5600	-	-70,33	-44,51	-24,89	-8,637	5,388	17,81	29,01	39,24	48,69
	5700	-108,8	-49,21	-21,8	-0,4656	17,3	32,66	46,28	58,56	69,78	80,14
	5800	-71,33	-27,1	2,814	26,2	45,68	62,54	77,47	90,94	103,2	114,6
	5900	-51,22	-3,032	29,78	55,43	76,81	95,29	111,6	126,4	139,8	152,2
	6000	-29,44	23,36	59,36	87,5	110,9	131,1	149	165,1	179,8	193,2
	6100	-5,601	52,32	91,81	122,6	148,2	170,3	189,8	207,3	223,2	237,9
	6200	20,55	84,1	127,3	161	188,9	212,9	234,1	253,1	270,4	286,3
	6300	49,25	118,9	166,1	202,8	233,2	259,3	282,2	302,8	321,5	338,7
	6400	80,73	156,9	208,4	248,3	281,2	309,4	334,3	356,5	376,7	395,2
	6500	115,2	198,4	254,4	297,6	333,2	363,7	390,4	414,4	436,1	456
	6600	152,9	243,5	304,2	350,9	389,3	422,1	450,9	476,7	500	521,4
6700	194	292,4	358	408,3	449,7	485	515,9	543,5	568,5	591,3	
6800	238,8	345,3	416	470,1	514,5	552,4	585,5	615	641,6	665,9	
6900	287,2	402,3	478,4	536,5	584	624,4	659,7	691	719,3	745	
7000	339,7	463,7	545,3	607,5	658,2	701,1	738,4	771,4	801	827,8	

Tabla 15.90. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,035		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-38,53	-31,44	-25,62	-20,43	-15,65	-11,17	-6,937
	5300	-25,53	-18,91	-12,77	-7,017	-1,59	3,557	8,458	13,14	17,63	21,95
	5400	0,7317	7,629	14,11	20,24	26,05	31,59	36,88	41,95	46,82	51,5
	5500	27,95	35,46	42,53	49,22	55,57	61,63	67,41	72,96	78,29	83,41
	5600	57,48	65,71	73,45	80,78	87,74	94,37	100,7	106,8	112,6	118,2
	5700	89,77	98,78	107,3	115,3	122,9	130,2	137,1	143,7	150,1	156,2
	5800	125,1	135	144,2	153	161,3	169,2	176,8	184	190,9	197,6
	5900	163,7	174,5	184,6	194,1	203,2	211,8	220	227,9	235,4	242,6
	6000	205,8	217,5	228,5	238,8	248,7	258	266,9	275,4	283,6	291,4
	6100	251,5	264,2	276,1	287,3	298	308,1	317,7	326,9	335,8	344,2
	6200	301	314,8	327,6	339,8	351,3	362,2	372,6	382,5	392	401,2
	6300	354,6	369,4	383,3	396,4	408,8	420,5	431,7	442,4	452,6	462,5
	6400	412,3	428,3	443,2	457,3	470,6	483,3	495,3	506,8	517,7	528,3
	6500	474,4	491,6	507,6	522,7	537	550,5	563,4	575,7	587,5	598,7
	6600	541,1	559,5	576,7	592,8	608	622,5	636,2	649,3	661,8	673,8
6700	612,4	632	650,3	667,5	683,7	699	713,6	727,4	740,6	753,2	
6800	688,3	709,1	728,5	746,6	763,7	779,7	795	809,5	823,2	836,4	
6900	768,5	790,3	810,6	829,5	847,2	863,8	879,6	894,4	908,5	921,9	
7000	852,2	874,7	895,6	914,9	932,9	949,8	965,6	980,6	994,7	1008	

Tabla 15.91. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,035$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-
	5200	-2,911	0,94	4,636	8,195	11,63
	5300	26,11	30,12	34	37,75	41,39
	5400	56,02	60,39	64,61	68,7	72,67
	5500	88,36	93,13	97,76	102,2	106,6
	5600	123,6	128,8	133,9	138,8	143,5
	5700	162,1	167,8	173,3	178,7	183,8
	5800	204	210,2	216,2	222	227,7
	5900	249,6	256,3	262,8	269,1	275,2
	6000	299	306,3	313,3	320,1	326,7
	6100	352,4	360,3	367,8	375,2	382,3
	6200	410	418,4	426,6	434,5	442,2
	6300	471,9	481	489,8	498,3	506,5
	6400	538,4	548,2	557,6	566,6	575,4
	6500	609,5	619,9	630	639,7	649
	6600	685,3	696,3	706,9	717,2	727,1
6700	765,3	776,9	788,1	798,8	809,1	
6800	848,9	860,9	872,4	883,5	894,1	
6900	934,7	946,8	958,5	969,6	980,2	
7000	1021	1033	1044	1055	1065	

Tabla 15.92. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,040		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5400	-	-	-	-	-	-57,6	-43,76	-33,5	-24,63	-16,64
	5500	-	-	-	-57,72	-41,9	-29	-17,81	-7,801	1,294	9,664
	5600	-	-90,5	-53,18	-33,83	-18,02	-4,432	7,58	18,4	28,28	37,39
	5700	-	-57,51	-30,8	-10,18	6,964	21,78	34,9	46,74	57,55	67,53
	5800	-79,23	-36,02	-7,156	15,37	34,13	50,36	64,74	77,71	89,55	100,5
	5900	-59,43	-12,96	18,62	43,3	63,87	81,65	97,4	111,6	124,5	136,5
	6000	-38,55	12,24	46,86	73,92	96,45	115,9	133,1	148,6	162,7	175,7
	6100	-15,79	39,87	77,81	107,4	132,1	153,3	172,1	189	204,3	218,5
	6200	9,134	70,16	111,7	144,1	170,9	194,1	214,5	232,8	249,5	264,8
	6300	36,47	103,3	148,7	184	213,3	238,4	260,5	280,4	298,4	315
	6400	66,44	139,6	189,1	227,5	259,2	286,4	310,3	331,8	351,3	369,2
	6500	99,27	179,2	233	274,6	308,9	338,3	364,1	387,3	408,2	427,5
	6600	135,2	222,2	280,6	325,5	362,6	394,3	422,1	446,9	469,5	490,1
6700	174,3	268,9	332	380,5	420,4	454,5	484,3	511	535,2	557,3	
6800	216,9	319,3	387,5	439,7	482,5	519,1	551,1	579,6	605,4	628,9	
6900	263,2	373,8	447,2	503,2	549,1	588,2	622,3	652,7	680	705	
7000	313,2	432,5	511,2	571,3	620,3	661,8	698	730	758,8	784,9	

Tabla 15.93. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,040		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5300	-40,38	-31,64	-24,65	-18,47	-12,81	-7,532	-2,569	2,133	6,611	10,9
	5400	-9,326	-2,535	3,82	9,807	15,48	20,87	26,01	30,93	35,66	40,2
	5500	17,44	24,71	31,55	38,02	44,16	50,01	55,6	60,95	66,1	71,05
	5600	45,87	53,81	61,29	68,36	75,07	81,47	87,58	93,44	99,06	104,5
	5700	76,82	85,51	93,69	101,4	108,8	115,8	122,4	128,8	135	140,9
	5800	110,6	120,1	129,1	137,5	145,5	153,2	160,5	167,4	174,1	180,6
	5900	147,6	157,9	167,7	176,9	185,6	193,9	201,9	209,5	216,7	223,7
	6000	187,8	199,1	209,7	219,7	229,2	238,2	246,8	255,1	263	270,5
	6100	231,6	243,8	255,3	266,2	276,5	286,2	295,5	304,4	313	321,2
	6200	279	292,3	304,7	316,5	327,6	338,1	348,2	357,8	367	375,8
	6300	330,4	344,7	358,1	370,7	382,7	394,1	404,9	415,2	425,1	434,6
	6400	385,7	401,1	415,6	429,2	442	454,2	465,9	477	487,6	497,8
	6500	445,3	461,8	477,3	491,9	505,7	518,8	531,3	543,2	554,6	565,5
	6600	509,2	527	543,6	559,2	574	587,9	601,2	613,9	626	637,7
6700	577,7	596,6	614,3	631	646,7	661,6	675,7	689,1	701,9	714,2	
6800	650,6	670,8	689,5	707,2	723,7	739,4	754,2	768,3	781,8	794,6	
6900	727,9	749,1	768,8	787,2	804,5	820,8	836,2	850,7	864,6	877,7	
7000	808,8	830,8	851,2	870,2	887,9	904,5	920,1	934,9	948,8	962	

Tabla 15.94. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,040$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-
	5200	-19,76	-14,41	-9,865	-5,746	-1,919
	5300	15,01	18,96	22,78	26,46	30,03
	5400	44,58	48,81	52,91	56,87	60,71
	5500	75,83	80,44	84,9	89,23	93,42
	5600	109,7	114,7	119,6	124,3	128,9
	5700	146,6	152,1	157,4	162,6	167,6
	5800	186,8	192,8	198,6	204,2	209,6
	5900	230,5	237	243,3	249,3	255,2
	6000	277,8	284,9	291,7	298,3	304,6
	6100	329,1	336,7	344	351,1	358
	6200	384,3	392,5	400,4	408	415,4
	6300	443,8	452,6	461,1	469,3	477,2
	6400	507,6	517	526,1	534,9	543,4
	6500	575,9	586	595,7	605,1	614,2
	6600	648,8	659,5	669,8	679,8	689,4
6700	726	737,2	748,1	758,6	768,6	
6800	806,8	818,6	829,8	840,7	851,1	
6900	890,3	902,2	913,7	924,7	935,2	
7000	974,5	986,4	997,7	1009	1019	

Tabla 15.95. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,045		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5400	-	-	-	-	-	-	-	-	-37,48	-28,21
	5500	-	-	-	-	-53,48	-39,07	-27,58	-17,58	-8,6	-0,3897
	5600	-	-	-63,25	-42,9	-27,21	-13,92	-2,236	8,26	17,83	26,65
	5700	-	-66,24	-39,53	-19,44	-2,847	11,47	24,14	35,57	46	55,63
	5800	-101,8	-44,54	-16,59	5,149	23,24	38,88	52,75	65,25	76,66	87,2
	5900	-67,35	-22,31	8,113	31,89	51,7	68,82	84	97,67	110,2	121,7
	6000	-47,14	1,79	35,1	61,14	82,83	101,6	118,2	133,1	146,7	159,3
	6100	-25,37	28,16	64,66	93,17	116,9	137,3	155,4	171,7	186,5	200,2
	6200	-1,58	57,06	97,01	128,2	154	176,3	196	213,7	229,8	244,6
	6300	24,48	88,7	132,4	166,3	194,5	218,7	240,1	259,2	276,6	292,7
	6400	53,03	123,3	170,9	207,9	238,4	264,7	287,8	308,5	327,3	344,6
	6500	84,3	161	212,8	252,9	286	314,4	339,3	361,6	381,9	400,5
	6600	118,5	202,1	258,3	301,7	337,4	368	394,8	418,9	440,6	460,6
6700	155,8	246,7	307,5	354,3	392,8	425,7	454,5	480,3	503,6	525	
6800	196,4	294,9	360,6	411	452,3	487,6	518,5	546,1	571,1	593,9	
6900	240,5	347	417,7	471,8	516,2	553,9	586,9	616,3	642,9	667,1	
7000	288,3	403,2	479,1	537,1	584,4	624,7	659,7	690,8	718,8	744,3	

Tabla 15.96. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,045		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-	-	-23,96	-17,12	-11,5	-6,47	-1,831
	5400	-20,37	-13,35	-6,903	-0,8984	4,743	10,08	15,15	19,98	24,62	29,06
	5500	7,204	14,29	20,94	27,22	33,18	38,85	44,27	49,46	54,44	59,24
	5600	34,85	42,52	49,74	56,57	63,06	69,24	75,14	80,8	86,23	91,46
	5700	64,59	72,97	80,87	88,33	95,42	102,2	108,6	114,8	120,7	126,4
	5800	96,99	106,2	114,8	122,9	130,7	138	145,1	151,8	158,3	164,5
	5900	132,4	142,4	151,8	160,7	169,1	177,1	184,8	192,1	199,1	205,9
	6000	170,9	181,8	192	201,7	210,9	219,6	227,9	235,8	243,5	250,8
	6100	212,8	224,7	235,8	246,2	256,2	265,6	274,6	283,2	291,4	299,4
	6200	258,3	271,1	283,1	294,4	305,2	315,4	325,1	334,4	343,3	351,8
	6300	307,5	321,3	334,3	346,5	358,1	369	379,5	389,5	399,1	408,3
	6400	360,6	375,4	389,4	402,6	415	426,8	438,1	448,8	459,1	469
	6500	417,7	433,7	448,7	462,8	476,2	488,8	500,9	512,4	523,4	534
	6600	479	496,2	512,3	527,4	541,7	555,2	568,1	580,4	592,2	603,4
6700	544,8	563,1	580,3	596,4	611,6	626,1	639,8	652,8	665,3	677,2	
6800	614,9	634,4	652,7	669,8	685,9	701,1	715,6	729,3	742,4	754,9	
6900	689,3	710	729,2	747,1	764	779,9	795	809,2	822,8	835,7	
7000	767,6	789,1	809,1	827,7	845,1	861,4	876,8	891,3	905	918,1	

Tabla 15.97. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,045$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-
	5300	2,518	6,636	10,56	14,32	17,93
	5400	33,34	37,47	41,46	45,32	49,06
	5500	63,86	68,32	72,64	76,82	80,88
	5600	96,51	101,4	106,1	110,7	115,1
	5700	131,9	137,3	142,4	147,4	152,2
	5800	170,5	176,3	181,9	187,3	192,6
	5900	212,4	218,7	224,8	230,6	236,3
	6000	257,8	264,7	271,2	277,6	283,8
	6100	307	314,4	321,5	328,3	335
	6200	360	368	375,6	383	390,2
	6300	417,1	425,6	433,9	441,8	449,5
	6400	478,5	487,6	496,4	504,9	513,2
	6500	544,1	553,9	563,3	572,4	581,2
	6600	614,2	624,6	634,7	644,3	653,7
6700	688,6	699,6	710,2	720,4	730,2	
6800	766,9	778,3	789,4	800	810,2	
6900	848	859,8	871,1	881,9	892,2	
7000	930,5	942,3	953,6	964,3	974,6	

Tabla 15.98. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,050		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5500	-	-	-	-	-	-	-39,73	-28,48	-19,11	-10,77
	5600	-	-	-	-53,68	-36,82	-23,44	-11,9	-1,619	7,712	16,29
	5700	-	-	-48,41	-28,48	-12,28	1,616	13,89	24,94	35,03	44,34
	5800	-	-52,93	-25,6	-4,549	12,93	28,03	41,41	53,47	64,49	74,65
	5900	-75,37	-31,19	-1,807	21,12	40,21	56,72	71,35	84,54	96,58	107,7
	6000	-55,31	-8,06	24,03	49,11	70	88,06	104	118,4	131,6	143,7
	6100	-34,39	17,15	52,28	79,72	102,6	122,3	139,7	155,4	169,7	182,9
	6200	-11,66	44,75	83,18	113,2	138,1	159,6	178,6	195,6	211,2	225,4
	6300	13,21	74,95	117	149,7	176,8	200,2	220,8	239,3	256,1	271,5
	6400	40,43	108	153,8	189,4	218,8	244,2	266,5	286,5	304,6	321,3
	6500	70,24	144	193,9	232,5	264,4	291,8	315,9	337,4	357	375
	6600	102,8	183,2	237,4	279,2	313,6	343,1	369,1	392,3	413,4	432,7
6700	138,4	225,8	284,4	329,6	366,7	398,5	426,3	451,3	473,8	494,5	
6800	177,1	271,9	335,2	383,8	423,8	457,9	487,7	514,4	538,6	560,7	
6900	219,2	321,8	389,9	442,2	485	521,5	553,4	581,9	607,6	631,1	
7000	264,8	375,5	448,7	504,7	550,5	589,5	623,4	653,7	680,9	705,6	

Tabla 15.99. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,050		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5400	-	-29,52	-20,62	-13,65	-7,493	-1,862	3,381	8,318	13	17,46
	5500	-3,181	3,84	10,4	16,56	22,39	27,93	33,22	38,27	43,12	47,78
	5600	24,25	31,69	38,69	45,31	51,59	57,57	63,28	68,75	74,01	79,07
	5700	52,99	61,09	68,71	75,92	82,77	89,29	95,52	101,5	107,2	112,7
	5800	84,1	92,95	101,3	109,1	116,6	123,7	130,5	137	143,3	149,3
	5900	118	127,7	136,7	145,3	153,5	161,2	168,6	175,7	182,5	189
	6000	154,9	165,5	175,3	184,7	193,5	201,9	210	217,7	225	232,1
	6100	195,1	206,5	217,3	227,4	237	246,1	254,8	263,1	271,1	278,8
	6200	238,7	251,1	262,7	273,6	284	293,9	303,3	312,2	320,8	329,1
	6300	285,9	299,2	311,8	323,6	334,8	345,4	355,5	365,2	374,5	383,4
	6400	336,8	351,2	364,7	377,4	389,4	400,9	411,8	422,1	432,1	441,7
	6500	391,6	407,1	421,6	435,3	448,2	460,4	472,1	483,3	493,9	504,2
	6600	450,5	467,1	482,7	497,3	511,1	524,3	536,8	548,7	560,1	571
6700	513,6	531,4	548	563,7	578,4	592,4	605,7	618,4	630,5	642,1	
6800	581,1	600	617,7	634,3	650	664,8	678,8	692,2	705	717,1	
6900	652,8	672,8	691,5	709	725,4	741	755,7	769,6	782,9	795,6	
7000	728,4	749,4	768,9	787,1	804,2	820,2	835,3	849,6	863,2	876,1	

Tabla 15.100. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,050$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-11,12	-3,713	1,298
	5400	21,73	25,83	29,78	33,59	37,28
	5500	52,27	56,6	60,79	64,85	68,79
	5600	83,94	88,65	93,21	97,62	101,9
	5700	118,1	123,2	128,2	133	137,6
	5800	155,1	160,7	166,1	171,3	176,4
	5900	195,3	201,4	207,3	213	218,5
	6000	238,9	245,5	251,9	258	264
	6100	286,1	293,2	300,1	306,8	313,2
	6200	337,1	344,7	352,1	359,3	366,2
	6300	391,9	400,2	408,1	415,8	423,3
	6400	450,8	459,7	468,2	476,5	484,5
	6500	514	523,5	532,6	541,4	550
	6600	581,5	591,6	601,3	610,7	619,7
6700	653,2	663,9	674,2	684,1	693,6	
6800	728,8	740	750,8	761,2	771,2	
6900	807,7	819,2	830,3	841	851,2	
7000	888,4	900,1	911,2	921,9	932,1	

Tabla 15.101. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,055		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5500	-	-	-	-	-	-	-	-	-34,64	-23,5
	5600	-	-	-	-	-50,06	-34,04	-22,01	-11,66	-2,395	6,052
	5700	-	-	-59,23	-37,77	-21,61	-7,972	3,997	14,74	24,52	33,54
	5800	-	-61,91	-34,39	-13,85	3,101	17,71	30,65	42,3	52,94	62,76
	5900	-96,17	-39,73	-11,23	10,92	29,35	45,29	59,4	72,12	83,74	94,46
	6000	-63,23	-17,38	13,57	37,76	57,9	75,31	90,73	104,6	117,3	129
	6100	-42,93	6,772	40,6	67,04	89,06	108,1	124,9	140	153,8	166,6
	6200	-21,15	33,15	70,15	99,04	123,1	143,8	162,1	178,6	193,6	207,4
	6300	2,602	61,99	102,4	133,9	160,1	182,6	202,5	220,4	236,6	251,6
	6400	28,59	93,53	137,6	171,9	200,4	224,8	246,3	265,6	283,2	299,3
	6500	57,02	127,9	176	213,2	244	270,4	293,7	314,5	333,4	350,8
	6600	88,1	165,4	217,6	257,9	291,2	319,7	344,7	367,2	387,5	406,2
6700	122	206,1	262,6	306,2	342	372,7	399,6	423,7	445,6	465,6	
6800	159	250,2	311,2	358,2	396,7	429,7	458,6	484,4	507,8	529,2	
6900	199,2	297,9	363,6	414,1	455,5	490,8	521,7	549,3	574,2	597	
7000	242,7	349,3	420	474,1	518,4	556,1	589	618,3	644,8	668,9	

Tabla 15.102. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,055		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5400	-	-	-	-	-	-	-16,29	-7,958	-1,985	3,218
	5500	-15,02	-7,587	-0,8363	5,413	11,26	16,78	22,02	27	31,77	36,35
	5600	13,85	21,12	27,95	34,38	40,49	46,3	51,84	57,15	62,25	67,15
	5700	41,92	49,76	57,13	64,11	70,73	77,04	83,06	88,83	94,38	99,71
	5800	71,89	80,43	88,48	96,08	103,3	110,2	116,7	123	129,1	134,9
	5900	104,4	113,7	122,5	130,8	138,7	146,2	153,3	160,2	166,7	173
	6000	139,8	150	159,5	168,6	177,1	185,2	193	200,4	207,6	214,4
	6100	178,4	189,4	199,8	209,5	218,8	227,6	236	244,1	251,8	259,2
	6200	220,2	232,1	243,3	253,9	263,9	273,5	282,6	291,3	299,6	307,6
	6300	265,4	278,3	290,4	301,9	312,7	323	332,8	342,1	351,1	359,7
	6400	314,3	328,2	341,3	353,6	365,2	376,3	386,8	396,9	406,5	415,8
	6500	366,9	381,9	395,9	409,1	421,7	433,5	444,8	455,6	466	475,9
	6600	423,5	439,5	454,6	468,8	482,2	494,9	507	518,5	529,6	540,2
6700	484,1	501,3	517,4	532,6	546,9	560,5	573,3	585,6	597,4	608,7	
6800	548,9	567,3	584,5	600,6	615,8	630,2	643,9	656,9	669,3	681,2	
6900	618	637,5	655,6	672,7	688,7	703,9	718,2	731,9	744,9	757,3	
7000	691	711,5	730,6	748,4	765,1	780,8	795,7	809,8	823,1	835,8	

Tabla 15.103. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,055$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-	-
	5400	7,965	12,39	16,57	20,54	24,33
	5500	40,75	44,99	49,09	53,05	56,89
	5600	71,88	76,44	80,85	85,13	89,28
	5700	104,9	109,8	114,6	119,3	123,8
	5800	140,5	145,9	151,1	156,2	161,1
	5900	179,1	185	190,7	196,2	201,5
	6000	221	227,4	233,6	239,5	245,3
	6100	266,4	273,2	279,9	286,3	292,6
	6200	315,3	322,7	329,9	336,8	343,5
	6300	368	376	383,7	391,2	398,4
	6400	424,7	433,2	441,5	449,5	457,3
	6500	485,4	494,6	503,4	512	520,3
	6600	550,3	560,1	569,6	578,7	587,5
6700	619,5	629,9	639,9	649,5	658,9	
6800	692,6	703,5	714	724,2	733,9	
6900	769,1	780,5	791,4	801,8	811,9	
7000	847,9	859,5	870,6	881,2	891,3	

Tabla 15.104. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



w = 0,060		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5500	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	5600	-	-	-	-	-	-	-35,4	-23,15	-13,32	-4,667
	5700	-	-	-	-49,23	-31,48	-17,67	-5,814	4,732	14,29	23,08
	5800	-	-	-43,43	-22,98	-6,399	7,809	20,35	31,64	41,94	51,43
	5900	-	-48,19	-20,26	1,214	19,04	34,43	48,07	60,36	71,58	81,93
	6000	-71,33	-26,25	3,674	27,01	46,45	63,25	78,13	91,54	103,8	115,1
	6100	-51,08	-3,038	29,58	55,07	76,3	94,64	110,9	125,5	138,8	151,1
	6200	-30,12	22,2	57,85	85,7	108,9	128,8	146,5	162,4	176,9	190,2
	6300	-7,396	49,78	88,72	119,1	144,3	166,1	185,3	202,5	218,2	232,6
	6400	17,42	79,91	122,4	155,5	182,9	206,5	227,3	245,9	262,9	278,5
	6500	44,56	112,8	159,1	195	224,7	250,2	272,7	292,8	311,1	327,9
	6600	74,22	148,6	198,9	237,8	269,9	297,4	321,7	343,3	363	381,1
6700	106,6	187,5	242	284	318,7	348,3	374,4	397,7	418,8	438,2	
6800	141,9	229,7	288,6	333,9	371,2	403	431	456	478,6	499,3	
6900	180,2	275,4	338,8	387,5	427,5	461,7	491,6	518,3	542,5	564,6	
7000	221,8	324,6	392,8	445,1	487,9	524,4	556,3	584,8	610,4	633,9	

Tabla 15.105. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,060$		Presión [Pa]													
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000				
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	4900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	5500	-	-	-16,68	-8,619	-1,931	4,057	9,575	14,74	19,61	24,24	29,17	34,24	39,44	44,77
	5600	3,179	10,42	17,16	23,5	29,49	35,18	40,6	45,78	50,74	55,52	60,11	64,56	68,87	73,04
	5700	31,22	38,84	46	52,76	59,18	65,29	71,12	76,71	82,08	87,25	92,14	96,78	101,18	105,44
	5800	60,26	68,53	76,3	83,66	90,64	97,28	103,6	109,7	115,6	121,2	126,5	131,6	136,4	141,0
	5900	91,56	100,6	109	117	124,6	131,9	138,8	145,4	151,8	157,9	163,8	169,4	174,8	180,0
	6000	125,5	135,4	144,6	153,3	161,6	169,4	176,9	184,1	191	197,7	204,1	210,2	216,1	221,8
	6100	162,5	173,2	183,2	192,6	201,6	210,1	218,3	226,1	233,5	240,7	247,7	254,4	260,8	267,0
	6200	202,6	214,2	225	235,3	245	254,2	263	271,4	279,5	287,2	294,6	301,7	308,5	315,1
	6300	246	258,5	270,2	281,3	291,8	301,7	311,2	320,3	329	337,3	345,2	352,8	360,1	367,1
	6400	292,9	306,4	319	331	342,2	352,9	363,1	372,9	382,2	391,2	399,8	408,1	416,1	423,8
	6500	343,5	358	371,6	384,4	396,5	408	418,9	429,4	439,4	449	458,6	467,9	476,9	485,6
	6600	397,8	413,4	428	441,7	454,7	467	478,7	489,9	500,6	510,9	520,7	530,1	539,1	547,8
6700	456,1	472,8	488,4	503,1	516,9	530,1	542,6	554,5	566	576,9	586,6	596,1	605,2	614,0	
6800	518,5	536,3	552,9	568,6	583,3	597,3	610,6	623,3	635,4	646,9	657,7	668,1	678,1	687,7	
6900	584,9	603,9	621,5	638,1	653,7	668,5	682,5	695,8	708,5	720,6	732,1	743,1	753,6	763,6	
7000	655,4	675,4	694	711,4	727,7	743,1	757,7	771,5	784,7	797,2	809,1	820,6	831,6	842,1	

Tabla 15.106. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



$w = 0,060$		Presión [Pa]				
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000
Entropía [J/(kg*K)]	4700	-	-	-	-	-
	4800	-	-	-	-	-
	4900	-	-	-	-	-
	5000	-	-	-	-	-
	5100	-	-	-	-	-
	5200	-	-	-	-	-
	5300	-	-	-	-	-
	5400	-	-	-	-	-
	5500	28,66	32,91	36,98	40,91	44,71
	5600	60,12	64,56	68,84	73	77,03
	5700	92,23	97,03	101,7	106,2	110,6
	5800	126,6	131,8	136,9	141,8	146,5
	5900	163,8	169,5	175	180,3	185,4
	6000	204	210,2	216,2	221,9	227,5
	6100	247,6	254,3	260,7	266,9	273
	6200	294,7	301,8	308,8	315,5	322
	6300	345,3	353,1	360,6	367,8	374,8
	6400	399,8	408,1	416,2	423,9	431,4
	6500	458,3	467,2	475,7	484	492,1
	6600	520,8	530,3	539,4	548,3	556,9
6700	587,4	597,5	607,2	616,6	625,7	
6800	658	668,7	679	688,8	698,4	
6900	732,2	743,4	754	764,3	774,2	
7000	809,1	820,5	831,5	842	852	

Tabla 15.107. – Temperatura (en °C) en función de la presión, la entropía y la humedad absoluta (continuación)



		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	253308	253118	252929	252740	252550	252361	252171	251982	251792	251603
	-10	263353	263175	262996	262818	262639	262460	262282	262103	261925	261746
	0	273401	273232	273063	272895	272726	272557	272389	272220	272052	271883
	10	283451	283291	283131	282972	282812	282652	282493	282333	282174	282015
	20	293504	293352	293201	293049	292898	292747	292596	292445	292294	292143
	30	303561	303417	303273	303129	302986	302842	302699	302555	302412	302269
	40	313622	313485	313349	313212	313075	312939	312803	312667	312530	312394
	50	323689	323559	323428	323298	323168	323039	322909	322779	322650	322521
	60	333762	333637	333513	333389	333266	333142	333018	332895	332772	332648
	70	343841	343723	343604	343486	343368	343250	343132	343015	342897	342780
	80	353928	353815	353702	353589	353477	353364	353251	353139	353027	352915
	90	364024	363916	363808	363700	363592	363485	363377	363270	363162	363055
	100	374129	374025	373922	373819	373716	373613	373510	373407	373305	373202
	110	384244	384145	384046	383947	383848	383750	383651	383553	383455	383357
	120	394369	394274	394180	394085	393990	393896	393802	393708	393614	393520
	130	404507	404416	404325	404234	404143	404053	403963	403872	403782	403692
	140	414657	414569	414482	414395	414308	414221	414135	414048	413962	413875
150	424820	424736	424652	424569	424485	424402	424319	424236	424153	424070	
160	434997	434916	434836	434756	434675	434595	434516	434436	434356	434277	

Tabla 15.108. – Entalpía (en J/kg) en función de la presión y la temperatura



		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	251413	251223	251034	250844	250655	250465	250275	250086	249896	249706
	-10	261568	261389	261211	261032	260854	260676	260497	260319	260140	259962
	0	271715	271546	271378	271210	271041	270873	270705	270537	270369	270201
	10	281855	281696	281537	281378	281219	281060	280901	280743	280584	280425
	20	291992	291841	291691	291540	291390	291239	291089	290939	290789	290639
	30	302126	301983	301840	301697	301555	301412	301270	301127	300985	300843
	40	312259	312123	311987	311852	311716	311581	311446	311311	311176	311041
	50	322391	322262	322133	322004	321876	321747	321618	321490	321362	321233
	60	332525	332402	332280	332157	332034	331912	331790	331667	331545	331423
	70	342662	342545	342428	342311	342194	342077	341961	341844	341728	341612
	80	352803	352691	352579	352468	352356	352245	352134	352023	351912	351801
	90	362948	362842	362735	362628	362522	362416	362309	362203	362097	361992
	100	373100	372998	372896	372794	372692	372591	372489	372388	372287	372186
	110	383259	383161	383064	382966	382869	382772	382675	382578	382481	382384
	120	393426	393333	393239	393146	393053	392960	392867	392774	392681	392589
	130	403603	403513	403423	403334	403245	403156	403067	402978	402889	402801
	140	413789	413703	413618	413532	413446	413361	413276	413191	413105	413021
150	423987	423905	423823	423740	423658	423576	423495	423413	423331	423250	
160	434198	434118	434039	433960	433882	433803	433725	433646	433568	433490	

Tabla 15.109. – Entalpía (en J/kg) en función de la presión y la temperatura (continuación)



		Presión [Pa]									
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000	1300000	1350000	1400000	1450000	1500000
Temperatura [°C]	-20	249516	249327	249137	248947	248757	248568	248378	248188	247998	247808
	-10	259784	259605	259427	259249	259071	258893	258715	258536	258358	258180
	0	270033	269865	269697	269529	269362	269194	269026	268859	268691	268524
	10	280267	280108	279950	279792	279633	279475	279317	279159	279001	278843
	20	290489	290339	290189	290039	289890	289740	289591	289442	289293	289143
	30	300701	300559	300417	300275	300134	299992	299851	299710	299568	299427
	40	310906	310771	310637	310502	310368	310234	310100	309966	309832	309698
	50	321105	320977	320850	320722	320594	320467	320340	320212	320085	319958
	60	331301	331180	331058	330937	330815	330694	330573	330452	330331	330211
	70	341496	341380	341264	341149	341033	340918	340802	340687	340572	340457
	80	351690	351580	351469	351359	351249	351139	351029	350919	350810	350700
	90	361886	361781	361675	361570	361465	361360	361255	361151	361046	360942
	100	372085	371984	371883	371783	371683	371582	371482	371382	371283	371183
	110	382288	382192	382095	381999	381903	381808	381712	381616	381521	381426
	120	392497	392404	392312	392220	392129	392037	391946	391854	391763	391672
	130	402712	402624	402536	402448	402360	402272	402185	402097	402010	401923
	140	412936	412851	412767	412682	412598	412514	412430	412347	412263	412179
150	423169	423088	423007	422926	422845	422765	422684	422604	422524	422444	
160	433412	433334	433256	433179	433101	433024	432947	432870	432793	432716	

Tabla 15.110. – Entalpía (en J/kg) en función de la presión y la temperatura (continuación)



		Presión [Pa]									
		1550000	1600000	1650000	1700000	1750000	1800000	1850000	1900000	1950000	2000000
Temperatura [°C]	-20	247619	247429	247239	247049	246860	246670	246480	246290	246101	245911
	-10	258002	257824	257646	257468	257291	257113	256935	256757	256580	256402
	0	268356	268189	268022	267854	267687	267520	267353	267186	267019	266853
	10	278686	278528	278370	278213	278055	277898	277741	277584	277426	277269
	20	288994	288846	288697	288548	288399	288251	288102	287954	287806	287658
	30	299286	299145	299005	298864	298723	298583	298443	298302	298162	298022
	40	309564	309431	309297	309164	309031	308898	308765	308632	308500	308367
	50	319831	319705	319578	319452	319325	319199	319073	318947	318821	318696
	60	330090	329970	329849	329729	329609	329489	329369	329250	329130	329011
	70	340343	340228	340114	339999	339885	339771	339657	339543	339430	339316
	80	350591	350482	350373	350264	350155	350046	349938	349830	349721	349613
	90	360837	360733	360629	360525	360422	360318	360215	360111	360008	359905
	100	371083	370984	370885	370785	370686	370588	370489	370390	370292	370194
	110	381331	381236	381141	381046	380952	380857	380763	380669	380575	380481
	120	391581	391490	391399	391309	391218	391128	391038	390948	390858	390768
	130	401836	401749	401662	401575	401489	401402	401316	401230	401144	401058
	140	412096	412013	411930	411847	411764	411681	411599	411516	411434	411352
150	422364	422284	422204	422125	422045	421966	421887	421808	421729	421651	
160	432640	432563	432487	432411	432335	432259	432183	432107	432032	431956	

Tabla 15.111. – Entalpía (en J/kg) en función de la presión y la temperatura (continuación)



		Presión [Pa]					
		2050000	2100000	2150000	2200000	2250000	2300000
Temperatura [°C]	-20	245721	245532	245342	245152	244963	244773
	-10	256224	256047	255869	255692	255515	255337
	0	266686	266519	266353	266186	266020	265853
	10	277113	276956	276799	276642	276486	276329
	20	287510	287362	287214	287066	286919	286771
	30	297882	297743	297603	297464	297324	297185
	40	308235	308102	307970	307838	307706	307574
	50	318570	318445	318319	318194	318069	317944
	60	328892	328773	328654	328535	328416	328297
	70	339203	339089	338976	338863	338750	338638
	80	349505	349398	349290	349182	349075	348968
	90	359802	359699	359597	359494	359392	359290
	100	370095	369997	369900	369802	369704	369607
	110	380387	380293	380200	380107	380013	379920
	120	390679	390589	390500	390411	390322	390233
	130	400972	400887	400802	400716	400631	400546
	140	411270	411188	411106	411025	410943	410862
150	421572	421494	421415	421337	421259	421181	
160	431881	431806	431731	431656	431581	431506	

Tabla 15.112. – Entalpía (en J/kg) en función de la presión y la temperatura (continuación)



		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Temperatura [°C]	-20	6899	6699	6582	6499	6434	6381	6336	6298	6263	6232
	-10	6938	6738	6621	6538	6473	6421	6376	6337	6302	6272
	0	6975	6776	6659	6576	6511	6458	6413	6375	6340	6309
	10	7011	6812	6695	6612	6547	6495	6450	6411	6377	6346
	20	7046	6847	6730	6647	6582	6530	6485	6446	6412	6381
	30	7080	6881	6764	6681	6616	6563	6519	6480	6446	6415
	40	7113	6913	6797	6714	6649	6596	6552	6513	6479	6448
	50	7144	6945	6828	6745	6681	6628	6583	6545	6510	6480
	60	7175	6976	6859	6776	6712	6659	6614	6576	6541	6511
	70	7205	7006	6889	6806	6741	6689	6644	6605	6571	6541
	80	7234	7035	6918	6835	6771	6718	6673	6635	6600	6570
	90	7262	7063	6946	6863	6799	6746	6702	6663	6629	6598
	100	7290	7090	6974	6891	6826	6774	6729	6690	6656	6626
	110	7316	7117	7000	6917	6853	6800	6756	6717	6683	6653
	120	7342	7143	7026	6944	6879	6827	6782	6743	6709	6679
	130	7368	7169	7052	6969	6905	6852	6808	6769	6735	6704
	140	7393	7193	7077	6994	6930	6877	6833	6794	6760	6729
150	7417	7218	7101	7018	6954	6901	6857	6818	6784	6754	
160	7441	7242	7125	7042	6978	6925	6881	6842	6808	6778	

Tabla 15.113. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión y la temperatura



		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Temperatura [°C]	-20	6204	6179	6155	6133	6113	6094	6075	6058	6042	6027
	-10	6244	6218	6195	6173	6152	6133	6115	6098	6082	6067
	0	6282	6256	6232	6211	6190	6171	6153	6136	6120	6105
	10	6318	6293	6269	6247	6227	6208	6190	6173	6157	6142
	20	6353	6328	6304	6283	6262	6243	6225	6209	6193	6177
	30	6387	6362	6338	6317	6296	6278	6260	6243	6227	6212
	40	6420	6395	6371	6350	6330	6311	6293	6276	6260	6245
	50	6452	6427	6403	6382	6362	6343	6325	6308	6292	6277
	60	6483	6458	6434	6413	6393	6374	6356	6339	6323	6308
	70	6513	6488	6464	6443	6423	6404	6386	6369	6353	6338
	80	6542	6517	6494	6472	6452	6433	6415	6399	6383	6368
	90	6571	6545	6522	6500	6480	6461	6444	6427	6411	6396
	100	6598	6573	6550	6528	6508	6489	6471	6455	6439	6424
	110	6625	6600	6577	6555	6535	6516	6498	6482	6466	6451
	120	6651	6626	6603	6581	6561	6542	6525	6508	6492	6477
	130	6677	6652	6628	6607	6587	6568	6550	6534	6518	6503
	140	6702	6677	6653	6632	6612	6593	6575	6559	6543	6528
150	6726	6701	6678	6656	6636	6618	6600	6583	6567	6553	
160	6750	6725	6702	6680	6660	6641	6624	6607	6591	6576	

Tabla 15.114. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión y la temperatura (continuación)



		Presión [Pa]									
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000	1300000	1350000	1400000	1450000	1500000
Temperatura [°C]	-20	6012	5998	5985	5972	5960	5948	5936	5925	5915	5904
	-10	6052	6038	6025	6012	6000	5988	5977	5966	5955	5945
	0	6091	6077	6063	6051	6038	6027	6015	6004	5994	5983
	10	6127	6114	6100	6088	6075	6064	6052	6041	6031	6021
	20	6163	6149	6136	6123	6111	6099	6088	6077	6067	6056
	30	6197	6184	6170	6158	6146	6134	6123	6112	6101	6091
	40	6230	6217	6204	6191	6179	6167	6156	6145	6135	6124
	50	6263	6249	6236	6223	6211	6199	6188	6177	6167	6157
	60	6294	6280	6267	6254	6242	6231	6219	6209	6198	6188
	70	6324	6310	6297	6285	6273	6261	6250	6239	6229	6219
	80	6353	6340	6327	6314	6302	6290	6279	6268	6258	6248
	90	6382	6368	6355	6343	6331	6319	6308	6297	6287	6277
	100	6410	6396	6383	6370	6358	6347	6336	6325	6315	6305
	110	6437	6423	6410	6397	6385	6374	6363	6352	6342	6332
	120	6463	6449	6436	6424	6412	6400	6389	6379	6368	6358
	130	6489	6475	6462	6450	6438	6426	6415	6404	6394	6384
	140	6514	6500	6487	6475	6463	6451	6440	6430	6419	6409
150	6538	6525	6512	6499	6487	6476	6465	6454	6444	6434	
160	6562	6549	6536	6523	6511	6500	6489	6478	6468	6458	

Tabla 15.115. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión y la temperatura (continuación)



		Presión [Pa]									
		1550000	1600000	1650000	1700000	1750000	1800000	1850000	1900000	1950000	2000000
Temperatura [°C]	-20	5894	5884	5875	5866	5857	5848	5840	5831	5823	5815
	-10	5935	5925	5915	5906	5897	5889	5880	5872	5864	5856
	0	5973	5964	5954	5945	5936	5928	5919	5911	5903	5895
	10	6011	6001	5992	5983	5974	5965	5957	5949	5941	5933
	20	6047	6037	6028	6019	6010	6001	5993	5985	5977	5969
	30	6081	6072	6062	6053	6045	6036	6028	6020	6012	6004
	40	6115	6105	6096	6087	6078	6070	6061	6053	6045	6038
	50	6147	6138	6128	6119	6111	6102	6094	6086	6078	6070
	60	6178	6169	6160	6151	6142	6134	6125	6117	6110	6102
	70	6209	6199	6190	6181	6173	6164	6156	6148	6140	6133
	80	6238	6229	6220	6211	6202	6194	6186	6178	6170	6162
	90	6267	6258	6248	6240	6231	6223	6214	6206	6199	6191
	100	6295	6286	6276	6268	6259	6251	6242	6234	6227	6219
	110	6322	6313	6304	6295	6286	6278	6270	6262	6254	6246
	120	6349	6339	6330	6321	6313	6304	6296	6288	6281	6273
	130	6374	6365	6356	6347	6339	6330	6322	6314	6307	6299
	140	6400	6390	6381	6372	6364	6355	6347	6339	6332	6324
150	6424	6415	6406	6397	6388	6380	6372	6364	6357	6349	
160	6448	6439	6430	6421	6413	6404	6396	6388	6381	6373	

Tabla 15.116. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión y la temperatura (continuación)



		Presión [Pa]					
		2050000	2100000	2150000	2200000	2250000	2300000
Temperatura [°C]	-20	5808	5800	5793	5785	5778	5771
	-10	5849	5841	5834	5826	5819	5813
	0	5888	5880	5873	5866	5859	5852
	10	5925	5918	5911	5904	5897	5890
	20	5962	5954	5947	5940	5933	5926
	30	5997	5989	5982	5975	5968	5961
	40	6030	6023	6016	6009	6002	5995
	50	6063	6056	6049	6042	6035	6028
	60	6095	6087	6080	6073	6066	6060
	70	6125	6118	6111	6104	6097	6090
	80	6155	6148	6141	6134	6127	6120
	90	6184	6177	6169	6163	6156	6149
	100	6212	6205	6198	6191	6184	6177
	110	6239	6232	6225	6218	6211	6205
	120	6266	6259	6252	6245	6238	6231
	130	6292	6284	6277	6271	6264	6257
	140	6317	6310	6303	6296	6289	6283
150	6342	6335	6328	6321	6314	6308	
160	6366	6359	6352	6345	6338	6332	

Tabla 15.117. – Entropía (en J/(kg*K)) en función de la presión y la temperatura (continuación)



		Presión [Pa]									
		50000	100000	150000	200000	250000	300000	350000	400000	450000	500000
Entropía [J/(kg*K)]	5800	-187,9	-169	-156,1	-145,9	-137,4	-130,1	-123,5	-117,6	-112,1	-107,1
	5900	-179,1	-158,4	-144,1	-132,9	-123,6	-115,5	-108,3	-101,8	-95,78	-90,26
	6000	-169,4	-146,5	-130,9	-118,5	-108,2	-99,3	-91,36	-84,19	-77,63	-71,56
	6100	-158,7	-133,4	-116,1	-102,6	-91,21	-81,37	-72,64	-64,74	-57,52	-50,84
	6200	-146,8	-118,9	-99,84	-84,87	-72,37	-61,53	-51,9	-43,21	-35,25	-27,9
	6300	-133,6	-102,9	-81,82	-65,31	-51,52	-39,57	-28,96	-19,38	-10,62	-2,522
	6400	-119,1	-85,12	-61,89	-43,67	-28,46	-15,29	-3,601	6,955	16,61	25,52
	6500	-103	-65,49	-39,85	-19,76	-2,986	11,54	24,42	36,05	46,68	56,49
	6600	-85,15	-43,79	-15,5	6,665	25,15	41,16	55,35	68,15	79,85	90,64
	6700	-65,48	-19,82	11,4	35,84	56,21	73,83	89,45	103,5	116,4	128,2
	6800	-43,74	6,656	41,09	68,02	90,45	109,8	127	142,4	156,6	169,5
	6900	-19,73	35,88	73,83	103,5	128,1	149,4	168,2	185,2	200,6	214,8
	7000	6,789	68,11	109,9	142,5	169,5	192,8	213,4	232	248,8	264,3
	7100	36,06	103,6	149,5	185,3	214,9	240,4	262,9	283	301,4	318,3
	7200	68,33	142,7	193	232,1	264,5	292,2	316,7	338,7	358,6	376,9
	7300	103,9	185,5	240,6	283,3	318,5	348,7	375,3	399	420,6	440,5
	7400	143	232,4	292,6	339	377,2	409,9	438,7	464,4	487,8	509,2
7500	185,9	283,6	349,1	399,4	440,8	476,2	507,3	535,1	560,3	583,3	

Tabla 15.118. – Temperatura (en °C) en función de la presión y la entropía



		Presión [Pa]									
		550000	600000	650000	700000	750000	800000	850000	900000	950000	1000000
Entropía [J/(kg*K)]	5800	-102,4	-98,04	-93,9	-89,97	-86,23	-82,66	-79,24	-75,96	-72,81	-69,77
	5900	-85,12	-80,29	-75,74	-71,43	-67,33	-63,41	-59,67	-56,07	-52,61	-49,28
	6000	-65,91	-60,6	-55,6	-50,86	-46,36	-42,06	-37,94	-33,99	-30,2	-26,54
	6100	-44,62	-38,78	-33,28	-28,07	-23,12	-18,39	-13,87	-9,533	-5,362	-1,343
	6200	-21,05	-14,63	-8,576	-2,845	2,603	7,8	12,77	17,54	22,12	26,54
	6300	5,018	12,09	18,75	25,05	31,05	36,76	42,23	47,47	52,51	57,36
	6400	33,82	41,6	48,93	55,87	62,46	68,74	74,75	80,51	86,04	91,37
	6500	65,62	74,18	82,24	89,86	97,1	104	110,6	116,9	123	128,8
	6600	100,7	110,1	118,9	127,3	135,2	142,8	150	157	163,6	170
	6700	139,3	149,6	159,3	168,4	177,2	185,4	193,4	200,9	208,2	215,2
	6800	181,6	192,9	203,5	213,6	223,1	232,1	240,8	249	257	264,6
	6900	228	240,4	252	262,9	273,3	283,1	292,5	301,5	310,1	318,4
	7000	278,7	292,2	304,8	316,7	327,9	338,6	348,9	358,6	368	377
	7100	333,9	348,5	362,2	375,1	387,3	398,9	410	420,6	430,7	440,4
	7200	393,9	409,7	424,5	438,5	451,7	464,2	476,2	487,6	498,5	509
	7300	458,8	475,9	491,9	507	521,2	534,8	547,7	560	571,8	583,1
7400	529	547,4	564,7	580,9	596,3	610,9	624,8	638	650,7	662,9	
7500	604,7	624,5	643,1	660,6	677,2	692,9	707,8	722,1	735,7	748,8	

Tabla 15.119. – Temperatura (en °C) en función de la presión y la entropía (continuación)



		Presión [Pa]									
		1050000	1100000	1150000	1200000	1250000	1300000	1350000	1400000	1450000	1500000
Entropía [J/(kg*K)]	5800	-66,83	-63,99	-61,24	-58,57	-55,97	-53,45	-50,99	-48,6	-46,26	-43,98
	5900	-46,06	-42,94	-39,93	-37	-34,16	-31,4	-28,7	-26,08	-23,53	-21,03
	6000	-23,01	-19,59	-16,28	-13,07	-9,954	-6,923	-3,973	-1,098	1,705	4,441
	6100	2,537	6,288	9,922	13,44	16,87	20,19	23,43	26,58	29,66	32,66
	6200	30,8	34,92	38,91	42,78	46,54	50,19	53,74	57,2	60,58	63,87
	6300	62,04	66,57	70,95	75,2	79,32	83,33	87,22	91,02	94,72	98,33
	6400	96,51	101,5	106,3	110,9	115,5	119,9	124,1	128,3	132,3	136,3
	6500	134,5	139,9	145,2	150,3	155,3	160,1	164,7	169,3	173,7	178
	6600	176,2	182,2	187,9	193,5	198,9	204,2	209,3	214,3	219,1	223,8
	6700	221,9	228,4	234,7	240,8	246,7	252,5	258	263,5	268,7	273,9
	6800	271,9	279	285,9	292,5	298,9	305,2	311,2	317,1	322,8	328,4
	6900	326,4	334,1	341,6	348,7	355,7	362,5	369	375,4	381,6	387,7
	7000	385,6	394	402	409,8	417,3	424,7	431,8	438,7	445,4	451,9
	7100	449,8	458,8	467,5	475,9	484,1	492	499,6	507,1	514,3	521,4
	7200	519,1	528,9	538,2	547,3	556,1	564,6	572,9	580,9	588,7	596,3
	7300	594	604,5	614,6	624,3	633,8	643	651,9	660,5	668,9	677,1
	7400	674,6	685,9	696,8	707,3	717,5	727,3	736,9	746,2	755,2	764
7500	761,4	773,6	785,3	796,6	807,5	818,1	828,4	838,4	848,1	857,5	

Tabla 15.120. – Temperatura (en °C) en función de la presión y la entropía (continuación)



		Presión [Pa]									
		1550000	1600000	1650000	1700000	1750000	1800000	1850000	1900000	1950000	2000000
Entropía [J/(kg*K)]	5800	-41,75	-39,57	-37,44	-35,35	-33,31	-31,3	-29,33	-27,4	-25,51	-23,64
	5900	-18,59	-16,2	-13,87	-11,59	-9,349	-7,154	-5,003	-2,891	-0,8175	1,219
	6000	7,114	9,728	12,28	14,79	17,24	19,64	22	24,31	26,58	28,81
	6100	35,59	38,46	41,26	44	46,69	49,32	51,9	54,44	56,92	59,37
	6200	67,08	70,23	73,3	76,31	79,25	82,14	84,97	87,74	90,47	93,14
	6300	101,9	105,3	108,7	112	115,2	118,3	121,4	124,5	127,5	130,4
	6400	140,2	143,9	147,6	151,2	154,8	158,2	161,6	164,9	168,2	171,4
	6500	182,3	186,4	190,4	194,4	198,2	202	205,7	209,3	212,9	216,4
	6600	228,4	232,9	237,3	241,6	245,8	249,9	254	257,9	261,8	265,6
	6700	278,9	283,8	288,6	293,2	297,8	302,3	306,6	310,9	315,1	319,3
	6800	333,9	339,2	344,3	349,4	354,4	359,2	364	368,6	373,2	377,7
	6900	393,6	399,3	404,9	410,4	415,8	421	426,2	431,2	436,1	441
	7000	458,3	464,5	470,6	476,5	482,3	487,9	493,5	498,9	504,2	509,4
	7100	528,2	534,9	541,5	547,9	554,1	560,2	566,2	572	577,8	583,4
	7200	603,7	610,9	618	624,8	631,6	638,1	644,6	650,8	657	663,1
	7300	685	692,8	700,4	707,8	715	722,1	729	735,7	742,4	748,9
7400	772,6	780,9	789,1	797	804,8	812,4	819,8	827,1	834,2	841,2	
7500	866,7	875,7	884,4	893	901,3	909,5	917,5	925,3	933	940,5	

Tabla 15.121. – Temperatura (en °C) en función de la presión y la entropía (continuación)



		Presión [Pa]					
		2050000	2100000	2150000	2200000	2250000	2300000
Entropía [J/(kg*K)]	5800	-21,81	-20,01	-18,24	-16,5	-14,79	-13,1
	5900	3,22	5,188	7,123	9,027	10,9	12,75
	6000	31	33,15	35,27	37,35	39,4	41,42
	6100	61,76	64,12	66,44	68,72	70,97	73,18
	6200	95,77	98,35	100,9	103,4	105,8	108,3
	6300	133,3	136,1	138,9	141,6	144,3	146,9
	6400	174,5	177,6	180,6	183,6	186,6	189,4
	6500	219,8	223,2	226,5	229,7	232,9	236,1
	6600	269,3	273	276,6	280,1	283,6	287
	6700	323,3	327,3	331,2	335	338,8	342,5
	6800	382	386,3	390,6	394,7	398,8	402,8
	6900	445,7	450,3	454,9	459,4	463,8	468,1
	7000	514,5	519,6	524,5	529,3	534,1	538,7
	7100	588,9	594,3	599,6	604,8	609,9	614,9
	7200	669	674,8	680,5	686,1	691,6	697
	7300	755,2	761,5	767,6	773,6	779,5	785,4
7400	848	854,7	861,3	867,8	874,2	880,4	
7500	947,8	955	962,1	969,1	975,9	982,6	

Tabla 15.122. – Temperatura (en °C) en función de la presión y la entropía (continuación)



16.- ANEXO II: HOJA DE ESTADO DE FUNCIONAMIENTO

En las siguientes figuras se muestran un ejemplo de una de las hojas de estado de funcionamiento del sistema creadas por el programa diseñado.



Figura 16.1. – Hoja de estado de funcionamiento

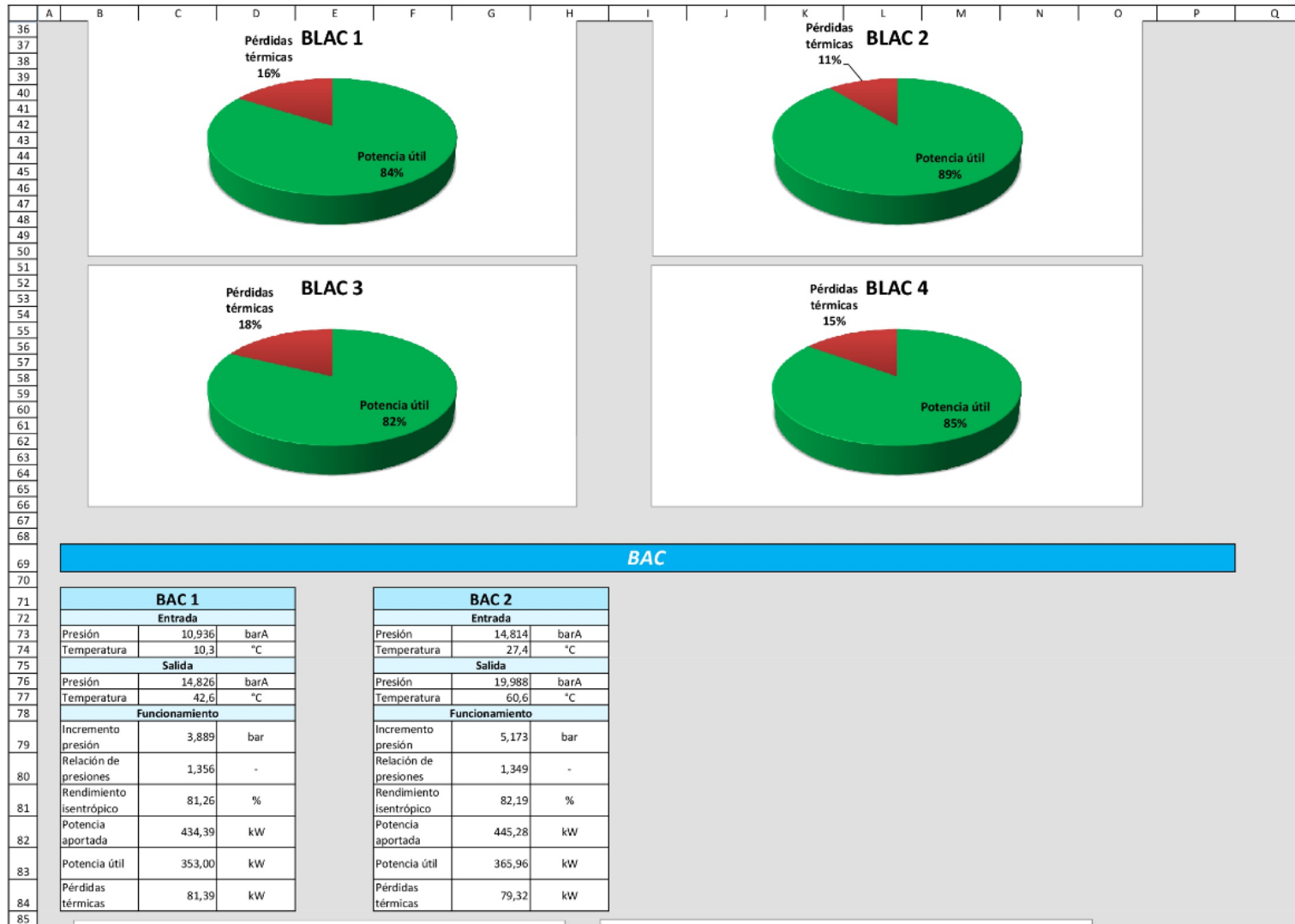


Figura 16.2. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)

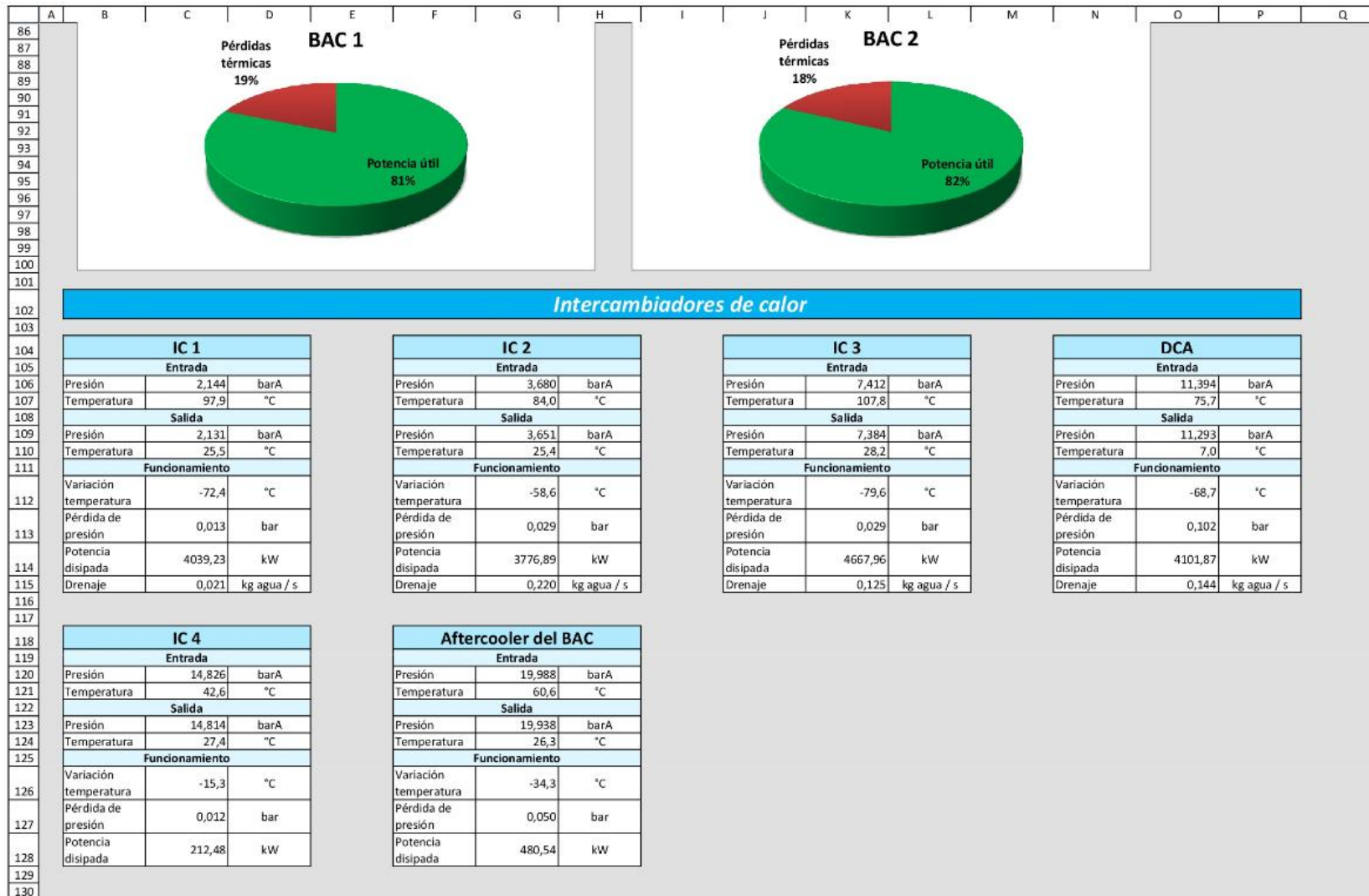


Figura 16.3. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q						
131	Otros elementos																						
132																							
133																							
134	Filtro de aspiración del BLAC						Prepurificadores y Filtro de polvo						Prepurificador 1			Prepurificador 2							
135	Entrada						Entrada						Este prepurificador está trabajando			Este prepurificador está regenerándose							
136	Presión	1,013	barA				Presión	11,293	barA				Salida			Salida							
137	Temperatura	14,2	°C				Temperatura	7,0	°C				Presión	11,175	barA	Presión	1,124	barA					
138	Salida						Salida						Temperatura	9,4	°C	Temperatura	15,5	°C					
139	Presión	1,007	barA				Presión	11,083	barA				Funcionamiento			Funcionamiento							
140	Temperatura	14,2	°C				Temperatura	10,3	°C				Variación temperatura	0,0	°C	Variación temperatura	3,3	°C					
141	Funcionamiento						Funcionamiento						Pérdida de presión	0,006	bar	Pérdida de presión	0,210	bar					
142	Variación temperatura	0,0	°C				Variación temperatura	3,3	°C				Potencia disipada	3,06	kW	Potencia disipada	100,50	kW					
143	Pérdida de presión	0,006	bar				Pérdida de presión	0,210	bar														
144	Potencia disipada	3,06	kW				Potencia disipada	100,50	kW														
145																							
146																							
147																							
148	Filtro de aspiración del BAC																						
149	Entrada																						
150	Presión	11,083	barA																				
151	Temperatura	10,3	°C																				
152	Salida																						
153	Presión	10,936	barA																				
154	Temperatura	10,3	°C																				
155	Funcionamiento																						
156	Variación temperatura	0,0	°C																				
157	Pérdida de presión	0,147	bar																				
158	Potencia disipada	-0,63	kW																				
159																							
160																							

Figura 16.4. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)

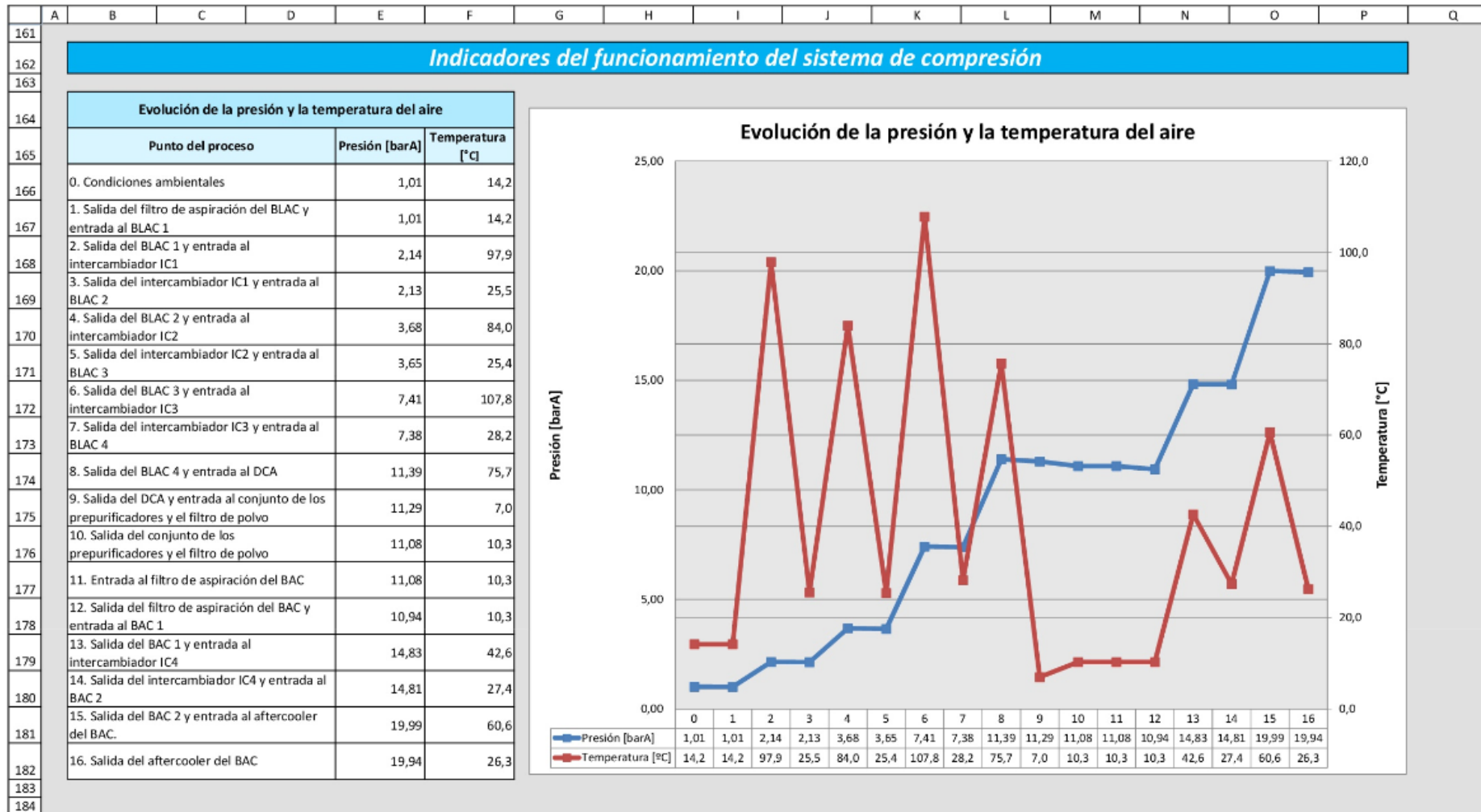


Figura 16.5. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)

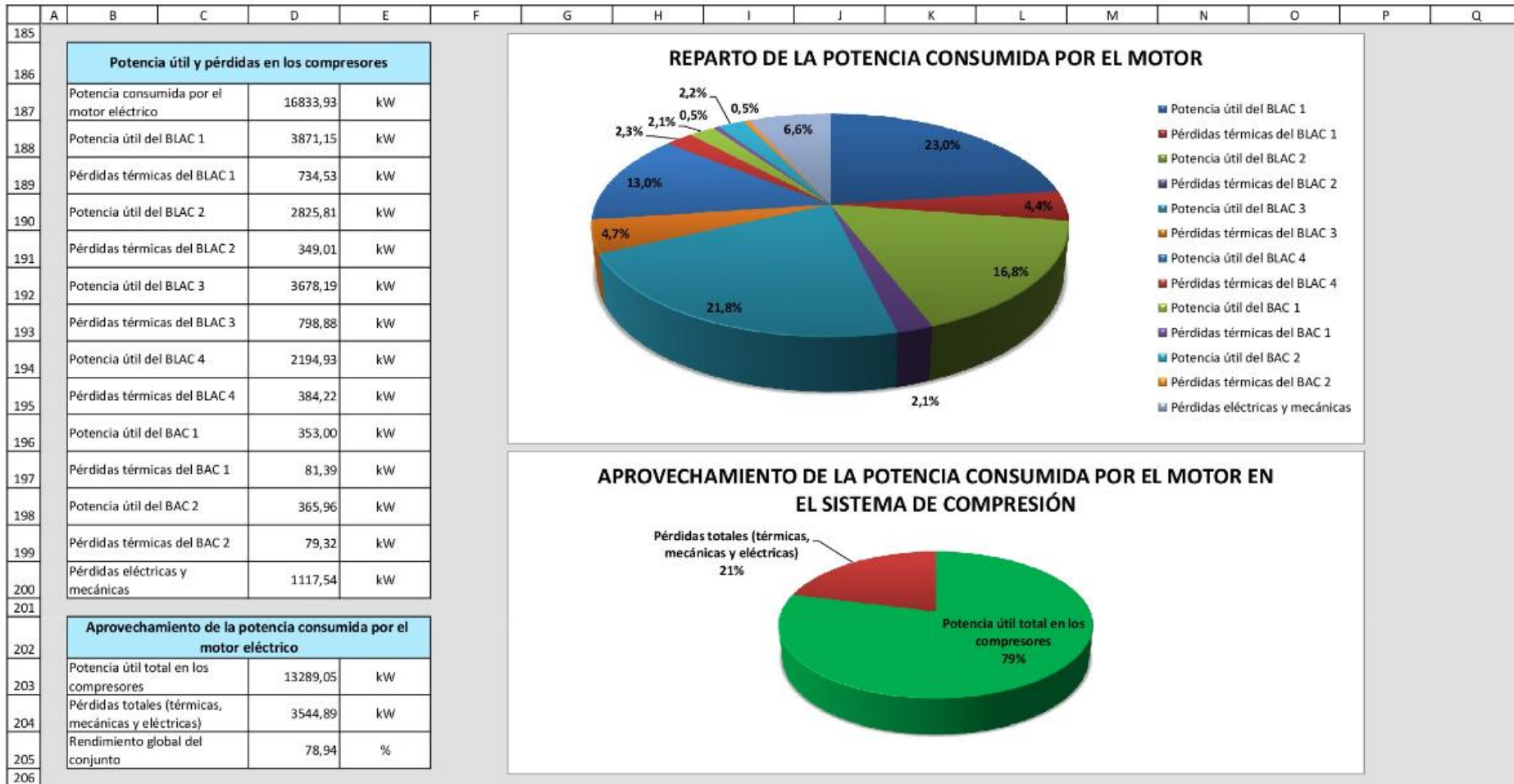


Figura 16.6. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)

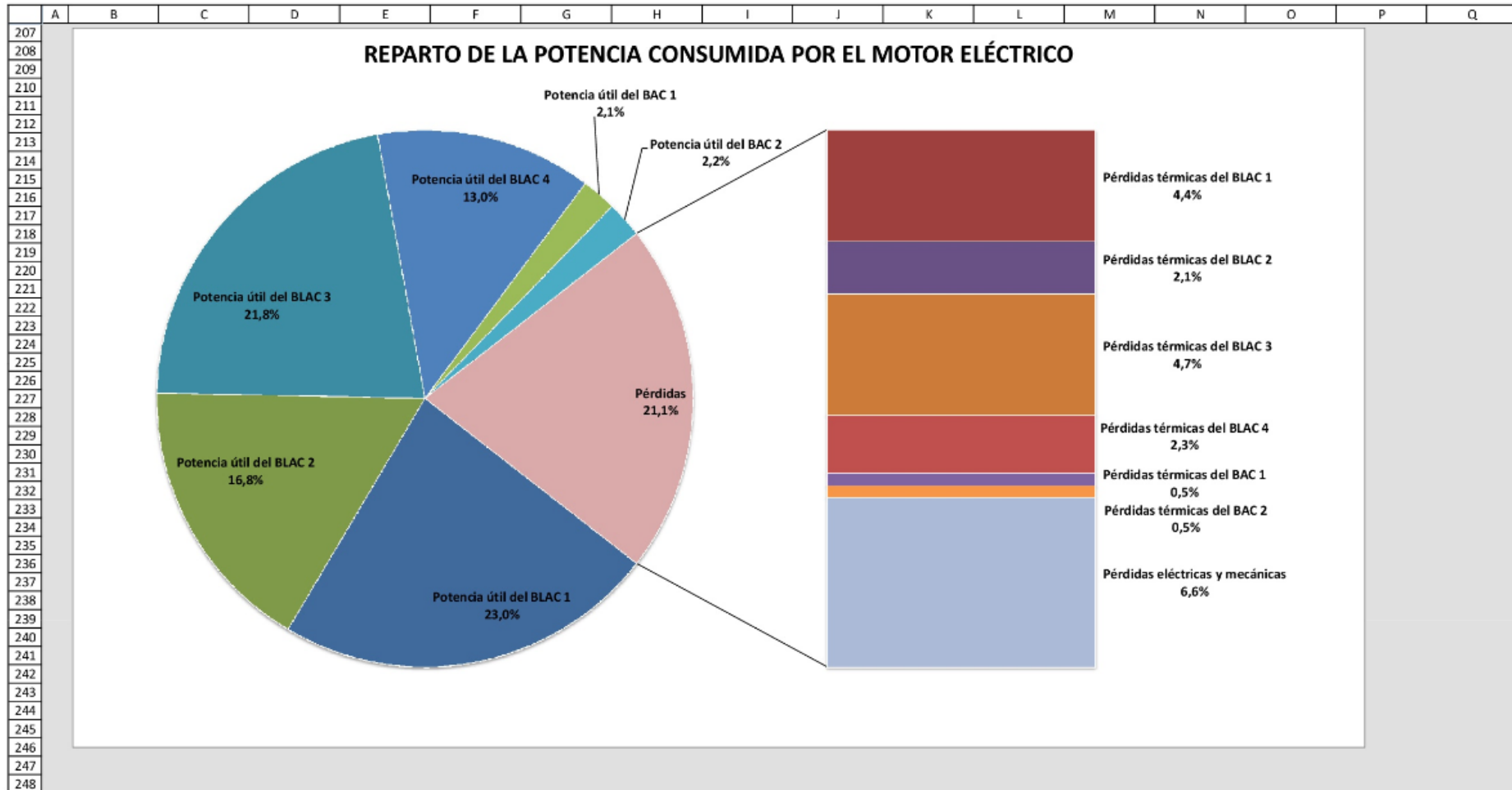


Figura 16.7. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)

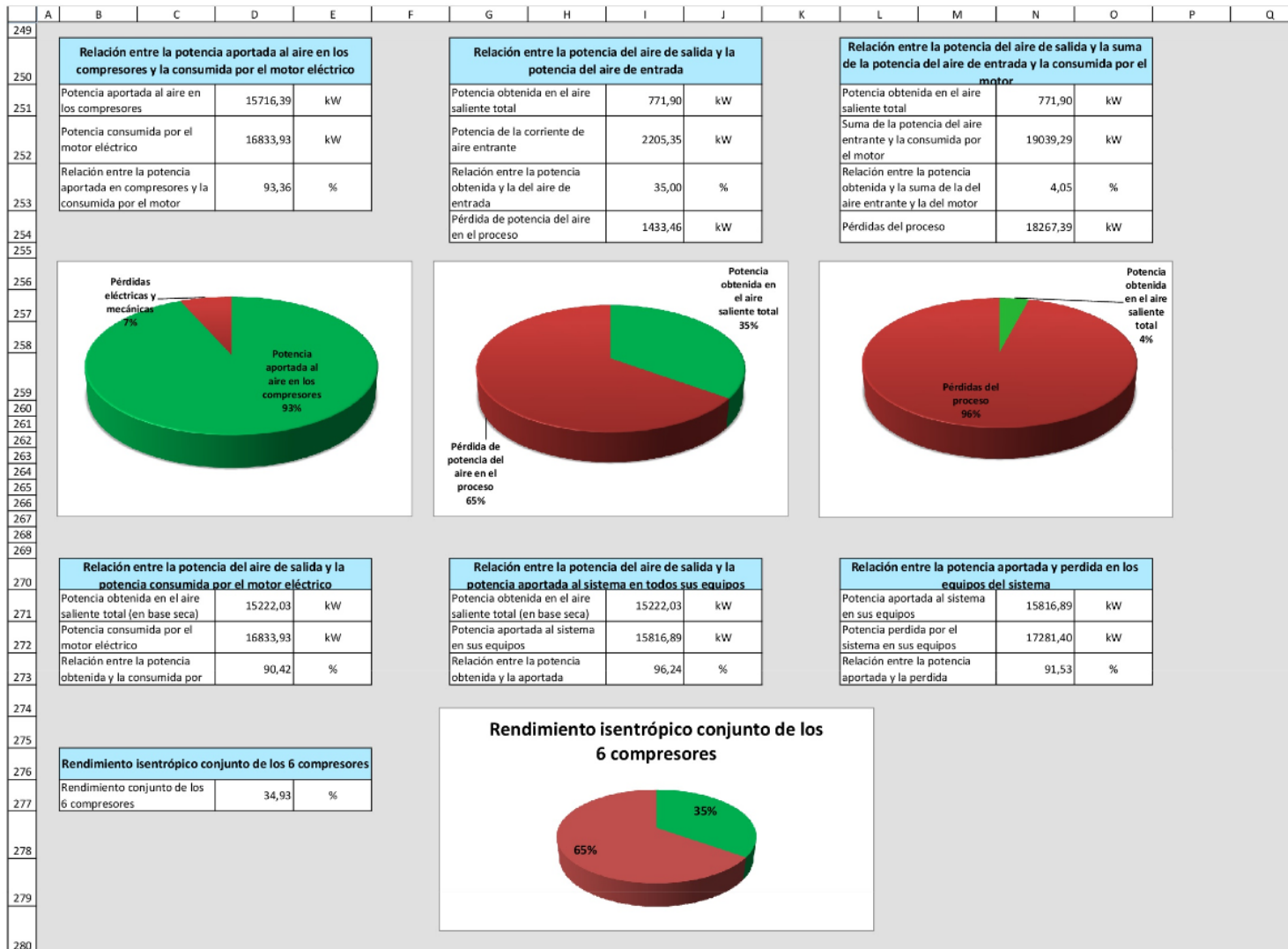


Figura 16.8. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
281	Balance global del sistema de compresión																
282																	
283																	
284	Potencia del aire entrante al sistema (en base húmeda)					Potencia del aire saliente del sistema (en base húmeda)					Potencia del aire saliente del sistema (en base seca)						
285	Potencia de la corriente de aire entrante		2205,35	kW		Potencia de la corriente de aire a baja presión		413,60	kW		Potencia de la corriente de aire a baja presión		11233,25	kW			
286						Potencia de la corriente de aire a alta presión		358,30	kW		Potencia de la corriente de aire a alta presión		3988,78	kW			
287																	
288																	
289	Potencia aportada por los equipos al sistema					Potencia disipada por los equipos en el sistema					Balance global del sistema de compresión de aire						
290	Potencia aportada al aire por el BLAC 1		4605,69	kW		Potencia perdida en el filtro de aspiración BLAC		3,06	kW		Potencia entrante		18022,25	kW			
291	Potencia aportada al aire por el BLAC 2		3174,82	kW		Potencia perdida en el intercambiador 1		4039,23	kW		Potencia saliente		18053,30	kW			
292	Potencia aportada al aire por el BLAC 3		4477,07	kW		Potencia perdida en el intercambiador 2		3776,89	kW		Error diferencial		31,05	kW			
293	Potencia aportada al aire por el BLAC 4		2579,15	kW		Potencia perdida en el intercambiador 3		4667,96	kW		Error relativo		0,17	%			
294	Potencia aportada en los prepurificadores y el filtro		100,50	kW		Potencia perdida en el DCA		4101,87	kW								
295	Potencia aportada al aire por el BAC 1		434,39	kW		Potencia perdida en el filtro de aspiración del BAC		-0,63	kW								
296	Potencia aportada al aire por el BAC 2		445,28	kW		Potencia perdida en el intercambiador 4		212,48	kW								
297	Total		15816,89	kW		Potencia perdida en el aftercooler del BAC		480,54	kW								
298						Total		17281,40	kW								

Figura 16.9. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)

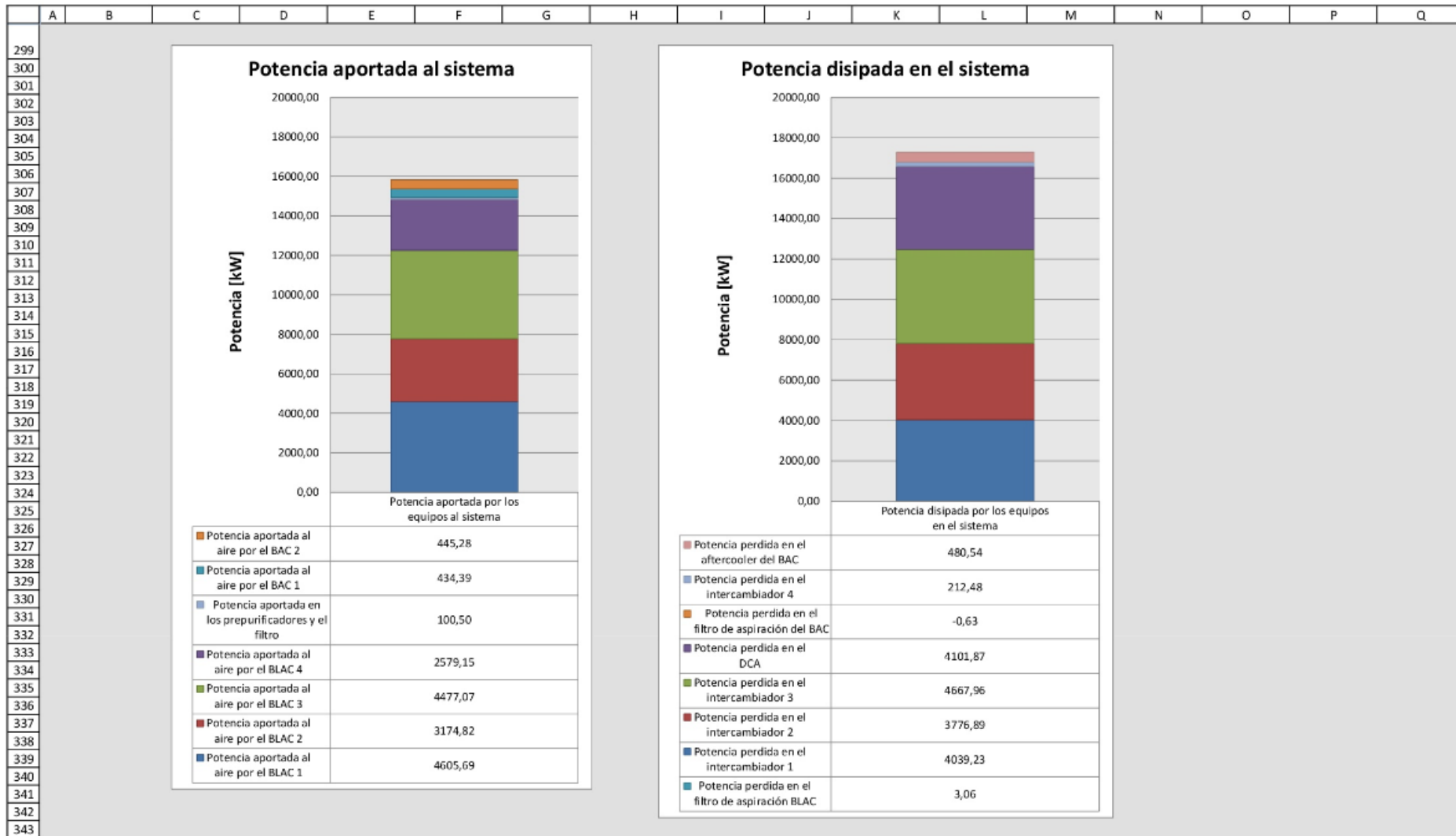


Figura 16.10. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
344	Evolución de la potencia que lleva el aire en cada punto (en base húmeda)																
345						Variación de potencia	Potencia del aire en ese punto	Unidades	Variación respecto a la entrada	Porcentaje respecto a la entrada	Unidades						
346							2205,35	kW		100,00	%						
347						-3,06		kW	-0,14		%						
348							2202,30	kW		99,86	%						
349						4605,69		kW	208,84		%						
350							6807,98	kW		308,70	%						
351						-4039,23		kW	-183,16		%						
352							2768,75	kW		125,55	%						
353						3174,82		kW	143,96		%						
354							5943,57	kW		269,51	%						
355						-3776,89		kW	-171,26		%						
356							2166,68	kW		98,25	%						
357						4477,07		kW	203,01		%						
358							6643,75	kW		301,26	%						
359						-4667,96		kW	-211,66		%						
360							1975,79	kW		89,59	%						
361						2579,15		kW	116,95		%						
362							4554,94	kW		206,54	%						
363						-4101,87		kW	-186,00		%						
364							453,07	kW		20,54	%						
365						100,50		kW	4,56		%						
366							553,57	kW		25,10	%						
367						-382,55		kW	-17,35		%						
368							171,02	kW		7,75	%						
369						0,63		kW	0,03		%						
370							171,65	kW		7,78	%						
371						434,39		kW	19,70		%						
372							606,04	kW		27,48	%						
373						-212,48		kW	-9,63		%						
374							393,56	kW		17,85	%						
375						445,28		kW	20,19		%						
376							838,84	kW		38,04	%						
377						-480,54		kW	-21,79		%						
378							358,30	kW		16,25	%						
379																	

Figura 16.11. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)

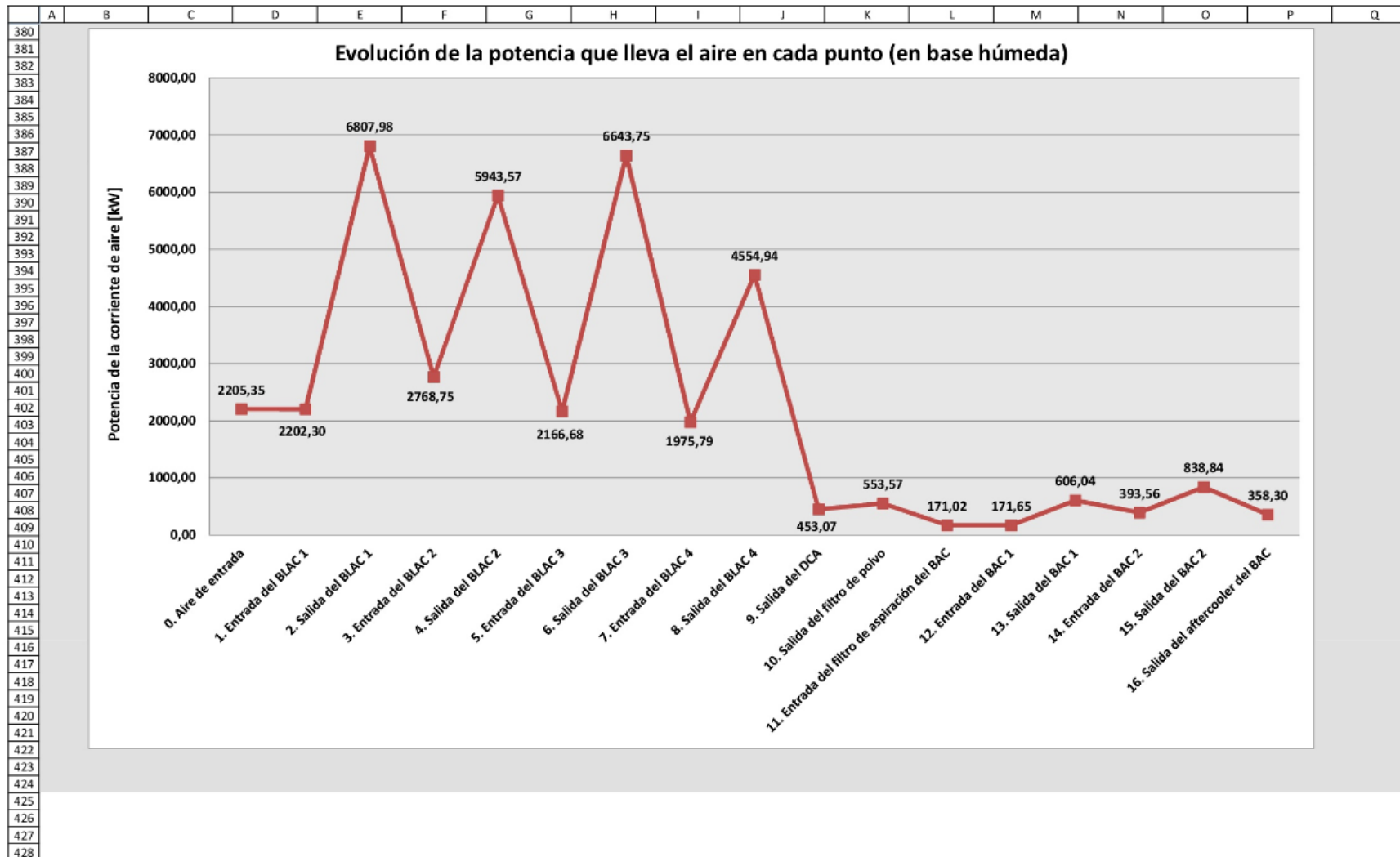


Figura 16.12. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
429	Lectura de los sensores																
430																	
431																	
432																	
433	Instante de lectura de los sensores: 12/06/2017 10:00																
434																	
435	Sensores del BLAC																
436																	
437																	
438																	
439	Sensores de presión						Sensores de temperatura										
440	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad del sensor	Valor en unidades del SI	Unidad del SI	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad							
441	PDT 500	GIJON3.PDI500.F_CV	66,23931885	mmca	648,64	Pa	TE 500	GIJON3.TI500.F_CV	14,164	°C							
442	PT 502	GIJON3.PI502.F_CV	1,117948771	barg	213119,88	Pa	TE 502	GIJON3.TI502.F_CV	97,924	°C							
443	PDT 502	GIJON3.PDI502.F_CV	0,013284493	bard	1328,45	Pa	TE 503	GIJON3.TI503.F_CV	25,519	°C							
444	PT 504	GIJON3.PI504.F_CV	2,637362719	barg	365061,27	Pa	TE 504	GIJON3.TI504.F_CV	84,005	°C							
445	PDT 504	GIJON3.PDI504.F_CV	0,02891331	bard	2891,33	Pa	TE 505	GIJON3.TI505.F_CV	25,397	°C							
446	PT 506	GIJON3.PI506.F_CV	6,370696068	barg	738394,61	Pa	TE 506	GIJON3.TI506.F_CV	107,814	°C							
447	PDT 506	GIJON3.PDI506.F_CV	0,028522588	bard	2852,26	Pa	TE 507	GIJON3.TI507.F_CV	28,205	°C							
448	PT 510	GIJON3.PIC510.F_CV	10,38095284	barg	1139420,28	Pa	TE 510	GIJON3.TI510.F_CV	75,702	°C							
449																	
450																	
451	Sensores del DCA y los prepurificadores																
452																	
453																	
454	Sensores de presión						Sensores de temperatura										
455	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad del sensor	Valor en unidades del SI	Unidad del SI	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad							
456	PT 534	GIJON3.PI534.F_CV	10,27936554	barg	1129261,55	Pa	TE 534	GIJON3.TI534.F_CV	6,960	°C							
457	PT 556	GIJON3.PI556.F_CV	10,16190434	barg	1117515,43	Pa	TE 560	GIJON3.TI560.F_CV	9,402	°C							
458	PT 566	GIJON3.PI566.F_CV	0,111111112	barg	112436,11	Pa	TE 570	GIJON3.TI570.F_CV	15,507	°C							
459	PT 580	GIJON3.PI580.F_CV	10,06984138	barg	1108309,14	Pa	TE 581	GIJON3.TI581.F_CV	10,256	°C							
460																	
461																	
462	Sensores de caudal																
463	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad del sensor	Valor en unidades del SI	Unidad del SI											
464	FE 580	GIJON3.FIC580.F_CV	149,2014618	mil m ³ /h	41,44485	m ³ /s											
465																	
466																	
467																	

Figura 16.13. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
468	Sensores del BAC																
469																	
470																	
471	Sensores de presión						Sensores de temperatura										
472	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad del sensor	Valor en unidades del SI	Unidad del SI	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad							
473	PT 593	GIJON3.PI593.F_CV	13,8012207	barg	1481447,07	Pa	TE 592	GUON3.TI592.F_CV	42,613	°C							
474	PDT 593	GIJON3.PDI593.F_CV	0,011526251	bard	1152,63	Pa	TE 593	GIJON3.TI593.F_CV	27,350	°C							
475	PT 594	GIJON3.PI594.F_CV	18,92453003	barg	1993778,00	Pa	TE 595	GUON3.TI595.F_CV	60,562	°C							
476	PDT 594	GIJON3.PDI594.F_CV	9,051281929	bard	905128,19	Pa	TE 598	GIJON3.TI598.F_CV	26,252	°C							
477																	
478																	
479	Sensores de caudal																
480	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad del sensor	Valor en unidades del SI	Unidad del SI											
481	FE 598A	GUON3.FI598.F_CV	37,72527313	ml m ³ /h	10,47924	m ³ /s											
482																	
483																	
484																	
485	Sensores auxiliares																
486																	
487																	
488	Sensores de presión						Sensores de humedad										
489	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad del sensor	Valor en unidades del SI	Unidad del SI	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad del sensor	Valor en unidades del SI	Unidad del SI					
490	P_amb	-	1,01325	bar	101325,00	Pa	MI 501	GUON3.MI501.F_CV	100	%	1,00000	p.u.					
491	PI 594	-	9,923	barg	1093649,81	Pa											
492																	
493																	
494	Sensores de potencia																
495	TAG del sensor en el P&ID	Código del TAG en el Historian	Valor del sensor	Unidad del sensor	Valor en unidades del SI	Unidad del SI											
496	JT 500	GUON3.JIC500.F_CV	16,83393478	MW	16833934,8	W											
497																	
498																	

Figura 16.14. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q																	
515	Cálculos																																	
516																																		
517																																		
518																																		
519																																		
520																																		
521																		Cálculos de los flujos másicos																
522																																		
523																																		
524																		Condiciones normales																
525	P	101325	Pa																															
526	T	0	°C																															
527	ρ	1,294	kg/m ³																															
528																																		
529																																		
530																																		
531	FE 580			Caudal saliente del BLAC																														
532	P_580	1108309,1	Pa	w_8	0,00324	kg agua / kg aire seco																												
533	T_580	10,26	°C	m_8	53,803	kg/s																												
534	V_580	41,44485	m ³ /s	x_8	53,630	kg aire seco / s																												
535	ρ_{580}	1,294	kg/m ³	y_8	0,174	kg agua / s																												
536	m_580	53,630	kg/s																															
537																																		
538																																		
539	FE 598A			Caudal saliente del BAC																														
540	P_598A	1993778,0	Pa	w_15	0,00000	kg agua / kg aire seco																												
541	T_598A	26,25	°C	m_15	13,560	kg/s																												
542	V_598A	10,47924	m ³ /s	x_15	13,560	kg aire seco / s																												
543	ρ_{598A}	1,294	kg/m ³	y_15	0,000	kg agua / s																												
544	m_598A	13,560	kg/s																															
545																																		
546																																		
547																																		
548																																		
549	Cálculos de las propiedades del aire húmedo																																	
550																																		
551																																		
552	Punto 0. Condiciones ambientales																																	
553																																		
554	Condiciones ambientales																																	
555	P_0	101325,0	Pa																															
556	T_0	14,16	°C																															
557	T_0 [K]	287,31	K																															
558	HR_0	1,000	tanto por uno																															
559	P_w,sat_0	1613,41	Pa																															
560	w_0	0,01006	kg agua / kg aire seco																															
561	h_0	41121,92	J / kg aire seco																															
562	s_0	5756,84	J / (K * kg aire seco)																															
563																																		
564																																		

Figura 16.15. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
565	Interpolación para obtener la entalpía																
566	Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																
567																	
568																	
569	HR_inf = 1,0																
570																	
571				100000	150000												
572	10			29546,0	22998,0												
573	20			57931,0	45131,0												
574																	
575	HR_sup = 1,0																
576																	
577				100000	150000												
578	10			29546,0	22998,0												
579	20			57931,0	45131,0												
580																	
581	Interpolación por temperatura																
582																	
583	HR_inf = 1,0																
584	P_inf = 100000,0																
585	T = 14,2																
586																	
587	HR_inf = 1,0																
588	P_sup = 150000,0																
589	T = 14,2																
590																	
591	HR_sup = 1,0																
592	P_inf = 100000,0																
593	T = 14,2																
594																	
595	HR_sup = 1,0																
596	P_sup = 150000,0																
597	T = 14,2																
598																	
599																	
600	Interpolación para obtener la entropía																
601	Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																
602																	
603																	
604	HR_inf = 1,0																
605																	
606				100000	150000												
607	10			5720,0	5579,0												
608	20			5818,0	5656,0												
609																	
610	HR_sup = 1,0																
611																	
612				100000	150000												
613	10			5720,0	5579,0												
614	20			5818,0	5656,0												
615																	

Figura 16.16. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



616	Interpolación por temperatura				Interpolación por presión				Interpolación por humedad relativa			
617												
618	HR_inf = 1,0				HR_inf = 1,0				HR = 1,000			
619	P_inf = 100000,0				P = 101325,0				P = 101325,0			
620	T = 14,2 s = 5760,8				T = 14,2 s = 5756,8				T = 14,2 s = 5756,8			
621												
622	HR_inf = 1,0											
623	P_sup = 150000,0											
624	T = 14,2 s = 5611,1											
625												
626	HR_sup = 1,0				HR_sup = 1,0							
627	P_inf = 100000,0				P = 101325,0							
628	T = 14,2 s = 5760,8				T = 14,2 s = 5756,8							
629												
630	HR_sup = 1,0											
631	P_sup = 150000,0											
632	T = 14,2 s = 5611,1											
633												
634												
635												
636												
637												
638	Punto 1. Salida del filtro de aspiración del BLAC y entrada del compresor BLAC 1											
639												
640	P_1		100676,36	Pa								
641	T_1		14,16	°C								
642	T_1 [K]		287,31	K								
643	P_w,sat_1		1613,41	Pa								
644	w_sat_1		0,01013	kg agua / kg aire seco								
645	w_1		0,01006	kg agua / kg aire seco								
646	HR_1		0,994	tanto por uno								
647	h_1		41064,93	J / kg aire seco								
648	s_1		5758,17	J / (K * kg aire seco)								
649												
650												
651	Interpolación para obtener la entalpia											
652												
653	Extracciones de las tablas de entalpia en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido											
654												
655	HR_inf = 0,9											
656					100000		150000					
657												
658	10		27576,0		20		42595,0					
659												
660												
661	HR_sup = 1,0											
662					100000		150000					
663												
664	10		29546,0		20		45131,0					
665												
666												

Figura 16.17. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
667	Interpolación por temperatura						Interpolación por presión						Interpolación por humedad relativa					
668	HR_inf = 0,9						HR_inf = 0,9						HR = 0,994					
669	P_inf = 100000,0						P = 100676,36						P = 100676,36					
670	T = 14,2					h = 38607,1	T = 14,2					h = 38496,0	T = 14,2					h = 41064,9
671	HR_inf = 0,9																	
672	P_sup = 150000,0																	
673	T = 14,2					h = 30397,0												
674	HR_sup = 1,0						HR_sup = 1,0											
675	P_inf = 100000,0						P = 100676,36											
676	T = 14,2					h = 41364,4	T = 14,2					h = 41240,6						
677	HR_sup = 1,0																	
678	P_sup = 150000,0																	
679	T = 14,2					h = 32213,3												
680																		
681	Interpolación para obtener la entropía																	
682	Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																	
683																		
684	HR_inf = 0,9																	
685	100000 150000																	
686	10 5713,0 5574,0																	
687	20 5805,0 5647,0																	
688																		
689	HR_sup = 1,0																	
690	100000 150000																	
691	10 5720,0 5579,0																	
692	20 5818,0 5656,0																	
693																		
694	Interpolación por temperatura						Interpolación por presión						Interpolación por humedad relativa					
695	HR_inf = 0,9						HR_inf = 0,9						HR = 0,994					
696	P_inf = 100000,0						P = 100676,36						P = 100676,36					
697	T = 14,2					s = 5751,3	T = 14,2					s = 5749,3	T = 14,2					s = 5758,2
698	HR_inf = 0,9																	
699	P_sup = 150000,0																	
700	T = 14,2					s = 5604,4												
701	HR_sup = 1,0						HR_sup = 1,0											
702	P_inf = 100000,0						P = 100676,36											
703	T = 14,2					s = 5760,8	T = 14,2					s = 5758,8						
704	HR_sup = 1,0																	
705	P_sup = 150000,0																	
706	T = 14,2					s = 5611,1												
707																		
708																		
709																		
710																		
711																		
712																		
713																		
714																		
715																		
716																		
717																		
718																		
719																		
720																		
721																		
722																		
723																		

Figura 16.18. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
724	Punto 2. Salida del Compresor BLAC 1 y entrada del intercambiador de calor IC1																
725																	
726		P_2	214448,33	Pa													
727		T_2	97,92	°C													
728		T_2 [K]	371,07	K													
729		P_w,sat_2	94007,56	Pa													
730		w_sat_2	0,48549	kg agua / kg aire seco													
731		w_2	0,01006	kg agua / kg aire seco													
732		HR_2	0,036	tanto por uno													
733		h_2	126944,44	J / kg aire seco													
734		s_2	5796,41	J / (K * kg aire seco)													
735																	
736																	
737		Interpolación para obtener la entalpía															
738																	
739		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
740																	
741		HR_inf = 0,0															
742																	
743			200000	250000													
744		90	90635,0	90635,0													
745		100	100722,0	100722,0													
746																	
747		HR_sup = 0,1															
748																	
749			200000	250000													
750		90	150798,0	138418,0													
751		100	189631,0	171097,0													
752																	
753		Interpolación por temperatura															
754																	
755		HR_inf =	0,0														
756		P_inf =	200000,0														
757		T =	97,9	h =	98628,2												
758																	
759		HR_inf =	0,0														
760		P_sup =	250000,0														
761		T =	97,9	h =	98628,2												
762																	
763		HR_sup =	0,1														
764		P_inf =	200000,0														
765		T =	97,9	h =	181570,4												
766																	
767		HR_sup =	0,1														
768		P_sup =	250000,0														
769		T =	97,9	h =	164313,8												
770																	
771																	
772		Interpolación para obtener la entropía															
773																	
774		Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
775																	
776		HR_inf = 0,0															
777																	
778			200000	250000													
779		90	5699,0	5635,0													
780		100	5726,0	5662,0													
781																	

Figura 16.19. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
782		HR _{sup} = 0,1															
784			200000	250000													
785		90	5903,0	5797,0													
786		100	6022,0	5896,0													
787																	
788		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa					
789		HR _{inf} =	0,0				HR _{inf} =	0,0			HR =	0,036					
791		P _{inf} =	200000,0				P =	214448,33			P =	214448,33					
792		T =	97,9	s =	5720,4		T =	97,9	s =	5701,9		T =	97,9	s =	5796,4		
793																	
794		HR _{inf} =	0,0														
795		P _{sup} =	250000,0														
796		T =	97,9	s =	5656,4												
797																	
798		HR _{sup} =	0,1				HR _{sup} =	0,1									
799		P _{inf} =	200000,0				P =	214448,33									
800		T =	97,9	s =	5997,3		T =	97,9	s =	5962,1							
801																	
802		HR _{sup} =	0,1														
803		P _{sup} =	250000,0														
804		T =	97,9	s =	5875,5												
805																	
806																	
807																	
808																	
809																	
810		Punto 2s. Salida del compresor BLAC 1 en caso isentrópico															
811																	
812		P _{2s}	214448,33	Pa													
813		T _{2s}	84,84	°C													
814		T _{2s} [K]	357,99	K													
815		P _{w,sat,2s}	57413,74	Pa													
816		w _{sat,2s}	0,22741	kg agua / kg aire seco													
817		w _{2s}	0,01006	kg agua / kg aire seco													
818		HR _{2s}	0,059	tanto por uno													
819		h _{2s}	113248,02	J / kg aire seco													
820		s _{2s}	5758,17	J / (K * kg aire seco)													
821																	
822																	
823		Interpolación para obtener la temperatura															
824																	
825		Extracciones de las tablas de temperatura en el rango de presión, entropía y humedad absoluta requerido															
826																	
827		w _{inf} = 0,010															
829			200000	250000													
830		5700	58,6	80,4													
831		5800	92,6	116,5													
832																	
833		w _{sup} = 0,015															
835			200000	250000													
836		5700	45,1	65,9													
837		5800	77,3	100,2													
838																	

Figura 16.20. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
839	Interpolación por entropía						Interpolación por presión						Interpolación por humedad absoluta				
840																	
841	w_inf = 0,010						w_inf = 0,010						w = 0,010				
842	P_inf = 200000,0						P = 214448,3						P = 214448,3				
843	s = 5758,2 T = 78,4						s = 5758,2 T = 85,0						s = 5758,2 T = 84,8				
844																	
845	w_inf = 0,010																
846	P_sup = 250000,0																
847	s = 5758,2 T = 101,4																
848																	
849	w_sup = 0,015						w_sup = 0,015										
850	P_inf = 200000,0						P = 214448,3										
851	s = 5758,2 T = 63,8						s = 5758,2 T = 70,2										
852																	
853	w_sup = 0,015																
854	P_sup = 250000,0																
855	s = 5758,2 T = 85,8																
856																	
857																	
858	Interpolación para obtener la entalpía																
859																	
860	Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																
861																	
862	HR_inf = 0,0																
863																	
864	200000 250000																
865	80 80553,0 80553,0																
866	90 90635,0 90635,0																
867																	
868	HR_sup = 0,1																
869																	
870	200000 250000																
871	80 120475,0 112336,0																
872	90 150798,0 138418,0																
873																	
874	Interpolación por temperatura						Interpolación por presión						Interpolación por humedad relativa				
875																	
876	HR_inf = 0,0						HR_inf = 0,0						HR = 0,059				
877	P_inf = 200000,0						P = 214448,33						P = 214448,33				
878	T = 84,8 h = 85431,1						T = 84,8 h = 85431,1						T = 84,8 h = 113248,0				
879																	
880	HR_inf = 0,0																
881	P_sup = 250000,0																
882	T = 84,8 h = 85431,1																
883																	
884	HR_sup = 0,1						HR_sup = 0,1										
885	P_inf = 200000,0						P = 214448,33										
886	T = 84,8 h = 135146,7						T = 84,8 h = 132201,8										
887																	
888	HR_sup = 0,1																
889	P_sup = 250000,0																
890	T = 84,8 h = 124955,7																
891																	
892																	
893																	
894																	
895																	

Figura 16.21. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
896	Punto 3. Salida del intercambiador de calor IC1 y entrada del compresor BLAC 2																
897																	
898		P_3	213119,88	Pa													
899		T_3	25,52	°C													
900		T_3 [K]	298,67	K													
901		P_w,sat_3	3263,54	Pa													
902		w_sat_3	0,00967	kg agua / kg aire seco													
903		w_3	0,00967	kg agua / kg aire seco													
904		HR_3	1,000	tanto por uno													
905		h_3	51627,24	J / kg aire seco													
906		s_3	5576,22	J / (K * kg aire seco)													
907																	
908																	
909		Interpolación para obtener la entalpía															
910		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
911																	
912																	
913		HR_inf = 1,0															
914																	
915			200000	250000													
916		20	38807,0	35036,0													
917		30	64681,0	57665,0													
918																	
919		HR_sup = 1,0															
920																	
921			200000	250000													
922		20	38807,0	35036,0													
923		30	64681,0	57665,0													
924																	
925		Interpolación por temperatura															
926																	
927		HR_inf =	1,0														
928		P_inf =	200000,0														
929		T =	25,5	h =	53086,7												
930																	
931		HR_inf =	1,0														
932		P_sup =	250000,0														
933		T =	25,5	h =	47524,8												
934																	
935		HR_sup =	1,0														
936		P_inf =	200000,0														
937		T =	25,5	h =	53086,7												
938																	
939		HR_sup =	1,0														
940		P_sup =	250000,0														
941		T =	25,5	h =	47524,8												
942																	
943																	
944		Interpolación para obtener la entropía															
945		Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
946																	
947																	
948		HR_inf = 1,0															
949																	
950			200000	250000													
951		20	5550,0	5473,0													
952		30	5637,0	5549,0													
953																	

Figura 16.22. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
954		HR_sup = 1,0															
956			200000	250000													
957		20	5550,0	5473,0													
958		30	5637,0	5549,0													
959																	
960		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa					
961		HR_inf = 1,0					HR_inf = 1,0					HR = 1,000					
962		P_inf = 200000,0					P = 213119,88					P = 213119,88					
963		T = 25,5		s = 5598,0			T = 25,5		s = 5576,2			T = 25,5		s = 5576,2			
964																	
965		HR_inf = 1,0															
966		P_sup = 250000,0															
967		T = 25,5		s = 5514,9													
968																	
969		HR_sup = 1,0					HR_sup = 1,0										
970		P_inf = 200000,0					P = 213119,88										
971		T = 25,5		s = 5598,0			T = 25,5		s = 5576,2								
972																	
973		HR_sup = 1,0															
974		P_sup = 250000,0															
975		T = 25,5		s = 5514,9													
976																	
977																	
978																	
979																	
980																	
981																	
982	Punto 4. Salida del compresor BLAC 2 y entrada del intercambiador de calor IC2																
983																	
984		P_4	367952,60	Pa													
985		T_4	84,00	°C													
986		T_4 [K]	357,15	K													
987		P_w,sat_4	55560,17	Pa													
988		w_sat_4	0,11063	kg agua / kg aire seco													
989		w_4	0,00967	kg agua / kg aire seco													
990		HR_4	0,101	tanto por uno													
991		h_4	110826,24	J / kg aire seco													
992		s_4	5597,28	J / (K * kg aire seco)													
993																	
994																	
995		Interpolación para obtener la entalpia															
996		Extracciones de las tablas de entalpia en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
997																	
998																	
999		HR_inf = 0,1															
1000			350000	400000													
1001		80	103130,0	100274,0													
1002		90	124486,0	120179,0													
1003																	
1004																	
1005		HR_sup = 0,2															
1006			350000	400000													
1007		80	126337,0	120475,0													
1008		90	159752,0	150798,0													
1009																	
1010																	

Figura 16.23. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		
1011	Interpolación por temperatura						Interpolación por presión						Interpolación por humedad relativa						
1012																			
1013	HR_inf = 0,1						HR_inf = 0,1						HR = 0,101						
1014	P_inf = 350000,0						P = 367952,60						P = 367952,60						
1015	T = 84,0 h = 111682,8						T = 84,0 h = 110448,7						T = 84,0 h = 110826,2						
1016																			
1017	HR_inf = 0,1																		
1018	P_sup = 400000,0																		
1019	T = 84,0 h = 108245,7																		
1020																			
1021	HR_sup = 0,2						HR_sup = 0,2												
1022	P_inf = 350000,0						P = 367952,60												
1023	T = 84,0 h = 139719,3						T = 84,0 h = 137169,9												
1024																			
1025	HR_sup = 0,2																		
1026	P_sup = 400000,0																		
1027	T = 84,0 h = 132619,0																		
1028																			
1029																			
1030	Interpolación para obtener la entropía																		
1031																			
1032	Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																		
1033																			
1034	HR_inf = 0,1																		
1035	350000 400000																		
1036	80 5588,0 5540,0																		
1037	90 5653,0 5600,0																		
1038																			
1039																			
1040	HR_sup = 0,2																		
1041	350000 400000																		
1042	80 5663,0 5605,0																		
1043	90 5764,0 5697,0																		
1044																			
1045																			
1046	Interpolación por temperatura						Interpolación por presión						Interpolación por humedad relativa						
1047																			
1048	HR_inf = 0,1						HR_inf = 0,1						HR = 0,101						
1049	P_inf = 350000,0						P = 367952,60						P = 367952,60						
1050	T = 84,0 s = 5614,0						T = 84,0 s = 5596,1						T = 84,0 s = 5597,3						
1051																			
1052	HR_inf = 0,1																		
1053	P_sup = 400000,0																		
1054	T = 84,0 s = 5564,0																		
1055																			
1056	HR_sup = 0,2						HR_sup = 0,2												
1057	P_inf = 350000,0						P = 367952,60												
1058	T = 84,0 s = 5703,4						T = 84,0 s = 5681,3												
1059																			
1060	HR_sup = 0,2																		
1061	P_sup = 400000,0																		
1062	T = 84,0 s = 5641,8																		
1063																			
1064																			
1065																			
1066																			
1067																			

Figura 16.24. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
1068	Punto 4s. Salida del compresor BLAC 2 en caso isentrópico																	
1069																		
1070		P_4s	367952,60	Pa														
1071		T_4s	77,72	°C														
1072		T_4s [K]	350,87	K														
1073		P_w,sat_4s	43126,64	Pa														
1074		w_sat_4s	0,08258	kg agua / kg aire seco														
1075		w_4s	0,00967	kg agua / kg aire seco														
1076		HR_4s	0,131	tanto por uno														
1077		h_4s	104318,39	J / kg aire seco														
1078		s_4s	5576,22	J / (K * kg aire seco)														
1079																		
1080																		
1081		Interpolación para obtener la temperatura																
1082		Extracciones de las tablas de temperatura en el rango de presión, entropía y humedad absoluta requerido																
1083																		
1084																		
1085		w_inf = 0,005																
1086																		
1087			350000	400000														
1088		5500	60,7	73,7														
1089		5600	95,2	109,5														
1090																		
1091		w_sup = 0,010																
1092																		
1093			350000	400000														
1094		5500	47,0	59,3														
1095		5600	79,7	93,4														
1096																		
1097		Interpolación por entropía																
1098																		
1099		w_inf =	0,005															
1100		P_inf =	350000,0															
1101		s =	5576,2	T =	87,0													
1102																		
1103		w_inf =	0,005															
1104		P_sup =	400000,0															
1105		s =	5576,2	T =	101,0													
1106																		
1107		w_sup =	0,010															
1108		P_inf =	350000,0															
1109		s =	5576,2	T =	71,9													
1110																		
1111		w_sup =	0,010															
1112		P_sup =	400000,0															
1113		s =	5576,2	T =	85,3													
1114																		
1115																		
1116		Interpolación para obtener la entalpía																
1117		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																
1118																		
1119																		
1120		HR_inf = 0,1																
1121																		
1122			350000	400000														
1123		70	85169,0	83318,0														
1124		80	103130,0	100274,0														
1125																		

Figura 16.25. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1126		HR _{sup} = 0,2															
1128			350000	400000													
1129		70	100129,0	96363,0													
1130		80	126337,0	120475,0													
1131																	
1132		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa					
1133																	
1134		HR _{inf} =	0,1				HR _{inf} =	0,1				HR =	0,131				
1135		P _{inf} =	350000,0				P =	367952,60				P =	367952,60				
1136		T =	77,7	h =	99029,0		T =	77,7	h =	98085,9		T =	77,7	h =	104318,4		
1137																	
1138		HR _{inf} =	0,1														
1139		P _{sup} =	400000,0														
1140		T =	77,7	h =	96402,5												
1141																	
1142		HR _{sup} =	0,2				HR _{sup} =	0,2									
1143		P _{inf} =	350000,0				P =	367952,60									
1144		T =	77,7	h =	120352,9		T =	77,7	h =	118420,0							
1145																	
1146		HR _{sup} =	0,2														
1147		P _{sup} =	400000,0														
1148		T =	77,7	h =	114969,5												
1149																	
1150																	
1151																	
1152																	
1153																	
1154		Punto 5. Salida del intercambiador de calor IC2 y entrada del compresor BLAC 3															
1155																	
1156		P ₅	365061,27	Pa													
1157		T ₅	25,40	°C													
1158		T ₅ [K]	298,55	K													
1159		P _{w,sat_5}	3239,95	Pa													
1160		w _{sat_5}	0,00557	kg agua / kg aire seco													
1161		w ₅	0,00557	kg agua / kg aire seco													
1162		HR ₅	1,000	tanto por uno													
1163		h ₅	40400,86	J / kg aire seco													
1164		s ₅	5381,40	J / (K * kg aire seco)													
1165																	
1166																	
1167		Interpolación para obtener la entalpía															
1168																	
1169		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
1170																	
1171		HR _{inf} = 1,0															
1173			350000	400000													
1174		20	30748,0	29413,0													
1175		30	49720,0	47254,0													
1176																	
1177		HR _{sup} = 1,0															
1179			350000	400000													
1180		20	30748,0	29413,0													
1181		30	49720,0	47254,0													
1182																	

Figura 16.26. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1183	Interpolación por temperatura					Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa						
1184																	
1185	HR_inf = 1,0					HR_inf = 1,0					HR = 1,000						
1186	P_inf = 350000,0					P = 365061,27					P = 365061,27						
1187	T = 25,4 h = 40986,9					T = 25,4 h = 40400,9					T = 25,4 h = 40400,9						
1188																	
1189	HR_inf = 1,0																
1190	P_sup = 400000,0																
1191	T = 25,4 h = 39041,5																
1192																	
1193	HR_sup = 1,0					HR_sup = 1,0											
1194	P_inf = 350000,0					P = 365061,27											
1195	T = 25,4 h = 40986,9					T = 25,4 h = 40400,9											
1196																	
1197	HR_sup = 1,0																
1198	P_sup = 400000,0																
1199	T = 25,4 h = 39041,5																
1200																	
1201																	
1202	Interpolación para obtener la entropía																
1203																	
1204	Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																
1205																	
1206	HR_inf = 1,0																
1208	350000 400000																
1209	20 5361,0 5318,0																
1210	30 5424,0 5377,0																
1211																	
1212	HR_sup = 1,0																
1214	350000 400000																
1215	20 5361,0 5318,0																
1216	30 5424,0 5377,0																
1217																	
1218	Interpolación por temperatura					Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa						
1219																	
1220	HR_inf = 1,0					HR_inf = 1,0					HR = 1,000						
1221	P_inf = 350000,0					P = 365061,27					P = 365061,27						
1222	T = 25,4 s = 5395,0					T = 25,4 s = 5381,4					T = 25,4 s = 5381,4						
1223																	
1224	HR_inf = 1,0																
1225	P_sup = 400000,0																
1226	T = 25,4 s = 5349,8																
1227																	
1228	HR_sup = 1,0					HR_sup = 1,0											
1229	P_inf = 350000,0					P = 365061,27											
1230	T = 25,4 s = 5395,0					T = 25,4 s = 5381,4											
1231																	
1232	HR_sup = 1,0																
1233	P_sup = 400000,0																
1234	T = 25,4 s = 5349,8																
1235																	
1236																	
1237																	
1238																	
1239																	

Figura 16.27. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
1240	Punto 6. Salida del compresor BLAC 3 y entrada del intercambiador de calor IC3																	
1241																		
1242		P_6	741246,87	Pa														
1243		T_6	107,81	°C														
1244		T_6 [K]	380,96	K														
1245		P_w,sat_6	133002,50	Pa														
1246		w_sat_6	0,13601	kg agua / kg aire seco														
1247		w_6	0,00557	kg agua / kg aire seco														
1248		HR_6	0,049	tanto por uno														
1249		h_6	123882,04	J / kg aire seco														
1250		s_6	5421,35	J / (K * kg aire seco)														
1251																		
1252																		
1253		Interpolación para obtener la entalpía																
1254		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																
1255																		
1256																		
1257		HR_inf = 0,0																
1259			700000	750000														
1260		100	100722,0	100722,0														
1261		110	110818,0	110818,0														
1262																		
1263		HR_sup = 0,1																
1265			700000	750000														
1266		100	125191,0	123538,0														
1267		110	145827,0	143447,0														
1268																		
1269		Interpolación por temperatura																
1270																		
1271		HR_inf =	0,0															
1272		P_inf =	700000,0															
1273		T =	107,8	h =	108611,4													
1274																		
1275		HR_inf =	0,0															
1276		P_sup =	750000,0															
1277		T =	107,8	h =	108611,4													
1278																		
1279		HR_sup =	0,1															
1280		P_inf =	700000,0															
1281		T =	107,8	h =	141316,8													
1282																		
1283		HR_sup =	0,1															
1284		P_sup =	750000,0															
1285		T =	107,8	h =	139095,7													
1286																		
1287																		
1288		Interpolación para obtener la entropía																
1289		Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																
1290																		
1291																		
1292		HR_inf = 0,0																
1294			700000	750000														
1295		100	5367,0	5347,0														
1296		110	5393,0	5374,0														
1297																		

Figura 16.28. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1298		HR_sup = 0,1															
1300			700000	750000													
1301		100	5448,0	5423,0													
1302		110	5508,0	5480,0													
1303																	
1304		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa					
1305																	
1306		HR_inf = 0,0					HR_inf = 0,0					HR = 0,049					
1307		P_inf = 700000,0					P = 741246,87					P = 741246,87					
1308		T = 107,8		s = 5387,3			T = 107,8		s = 5371,5			T = 107,8		s = 5421,4			
1309																	
1310		HR_inf = 0,0															
1311		P_sup = 750000,0															
1312		T = 107,8		s = 5368,1													
1313																	
1314		HR_sup = 0,1					HR_sup = 0,1										
1315		P_inf = 700000,0					P = 741246,87										
1316		T = 107,8		s = 5494,9			T = 107,8		s = 5472,3								
1317																	
1318		HR_sup = 0,1															
1319		P_sup = 750000,0															
1320		T = 107,8		s = 5467,5													
1321																	
1322																	
1323																	
1324																	
1325																	
1326		Punto 6s. Salida del compresor BLAC 3 en caso isentrópico															
1327																	
1328		P_6s	741246,87	Pa													
1329		T_6s	93,21	°C													
1330		T_6s [K]	366,36	K													
1331		P_w,sat_6s	79084,96	Pa													
1332		w_sat_6s	0,07429	kg agua / kg aire seco													
1333		w_6s	0,00557	kg agua / kg aire seco													
1334		HR_6s	0,083	tanto por uno													
1335		h_6s	108985,87	J / kg aire seco													
1336		s_6s	5381,40	J / (K * kg aire seco)													
1337																	
1338																	
1339		Interpolación para obtener la temperatura															
1340																	
1341		Extracciones de las tablas de temperatura en el rango de presión, entropía y humedad absoluta requerido															
1342																	
1343		w_inf = 0,005															
1345			700000	750000													
1346		5300	60,9	67,6													
1347		5400	95,4	102,7													
1348																	
1349		w_sup = 0,010															
1351			700000	750000													
1352		5300	47,6	54,0													
1353		5400	80,5	87,5													
1354																	

Figura 16.29. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1355	Interpolación por entropía						Interpolación por presión						Interpolación por humedad absoluta				
1356																	
1357	w_inf = 0,005						w_inf = 0,005						w = 0,006				
1358	P_inf = 700000,0						P = 741246,9						P = 741246,87				
1359	s = 5381,4 T = 89,0						s = 5381,4 T = 94,9						s = 5381,4 T = 93,2				
1360																	
1361	w_inf = 0,005																
1362	P_sup = 750000,0																
1363	s = 5381,4 T = 96,2																
1364																	
1365	w_sup = 0,010						w_sup = 0,010										
1366	P_inf = 700000,0						P = 741246,9										
1367	s = 5381,4 T = 74,4						s = 5381,4 T = 80,0										
1368																	
1369	w_sup = 0,010																
1370	P_sup = 750000,0																
1371	s = 5381,4 T = 81,2																
1372																	
1373																	
1374	Interpolación para obtener la entalpia																
1375																	
1376	Extracciones de las tablas de entalpia en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																
1377																	
1378	HR_inf = 0,0																
1379																	
1380							700000 750000										
1381	90						90635,0 90635,0										
1382	100						100722,0 100722,0										
1383																	
1384	HR_sup = 0,1																
1385																	
1386							700000 750000										
1387	90						107389,0 106261,0										
1388	100						125191,0 123538,0										
1389																	
1390	Interpolación por temperatura						Interpolación por presión						Interpolación por humedad relativa				
1391																	
1392	HR_inf = 0,0						HR_inf = 0,0						HR = 0,083				
1393	P_inf = 700000,0						P = 741246,87						P = 741246,87				
1394	T = 93,2 h = 93876,6						T = 93,2 h = 93876,6						T = 93,2 h = 108985,9				
1395																	
1396	HR_inf = 0,0																
1397	P_sup = 750000,0																
1398	T = 93,2 h = 93876,6																
1399																	
1400	HR_sup = 0,1						HR_sup = 0,1										
1401	P_inf = 700000,0						P = 741246,87										
1402	T = 93,2 h = 113109,9						T = 93,2 h = 112040,2										
1403																	
1404	HR_sup = 0,1																
1405	P_sup = 750000,0																
1406	T = 93,2 h = 111813,2																
1407																	
1408																	
1409																	
1410																	
1411																	

Figura 16.30. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
1412	Punto 7. Salida del intercambiador de calor IC3 y entrada del compresor BLAC 4																	
1413																		
1414		P_7	738394,61	Pa														
1415		T_7	28,21	°C														
1416		T_7 [K]	301,36	K														
1417		P_ws,at_7	3821,61	Pa														
1418		w_sat_7	0,00324	kg agua / kg aire seco														
1419		w_7	0,00324	kg agua / kg aire seco														
1420		HR_7	1,000	tanto por uno														
1421		h_7	36841,42	J / kg aire seco														
1422		s_7	5165,63	J / (K * kg aire seco)														
1423																		
1424																		
1425		Interpolación para obtener la entalpia																
1426		Extracciones de las tablas de entalpia en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																
1427																		
1428																		
1429		HR_inf = 1,0																
1431			700000	750000														
1432		20	25421,0	25067,0														
1433		30	39899,0	39248,0														
1434																		
1435		HR_sup = 1,0																
1437			700000	750000														
1438		20	25421,0	25067,0														
1439		30	39899,0	39248,0														
1440																		
1441		Interpolación por temperatura																
1442																		
1443		HR_inf =	1,0															
1444		P_inf =	700000,0															
1445		T =	28,2		h =	37300,4												
1446																		
1447		HR_inf =	1,0															
1448		P_sup =	750000,0															
1449		T =	28,2		h =	36702,7												
1450																		
1451		HR_sup =	1,0															
1452		P_inf =	700000,0															
1453		T =	28,2		h =	37300,4												
1454																		
1455		HR_sup =	1,0															
1456		P_sup =	750000,0															
1457		T =	28,2		h =	36702,7												
1458																		
1459		Interpolación para obtener la entropia																
1460		Extracciones de las tablas de entropia en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																
1461																		
1462																		
1463		HR_inf = 1,0																
1466			700000	750000														
1467		20	5143,0	5122,0														
1468		30	5191,0	5169,0														
1469																		

Figura 16.31. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1470		HR _{sup} = 1,0															
1472			700000	750000													
1473		20	5143,0	5122,0													
1474		30	5191,0	5169,0													
1475		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa					
1476		HR _{inf} = 1,0					HR _{inf} = 1,0					HR = 1,000					
1477		P _{inf} = 700000,0					P = 738394,61					P = 738394,61					
1478		T = 28,2		s = 5182,4			T = 28,2		s = 5165,6			T = 28,2		s = 5165,6			
1479																	
1480																	
1481		HR _{inf} = 1,0															
1482		P _{sup} = 750000,0															
1483		T = 28,2		s = 5160,6													
1484																	
1485		HR _{sup} = 1,0					HR _{sup} = 1,0										
1486		P _{inf} = 700000,0					P = 738394,61										
1487		T = 28,2		s = 5182,4			T = 28,2		s = 5165,6								
1488																	
1489		HR _{sup} = 1,0															
1490		P _{sup} = 750000,0															
1491		T = 28,2		s = 5160,6													
1492																	
1493																	
1494																	
1495																	
1496																	
1497																	
1498		Punto 8. Salida del compresor BLAC 4 y entrada del DCA															
1499																	
1500		P ₈	1139420,3	Pa													
1501		T ₈	75,70	°C													
1502		T ₈ [K]	348,85	K													
1503		P _{w,sat,8}	39676,67	Pa													
1504		w _{sat,8}	0,02244	kg agua / kg aire seco													
1505		w ₈	0,00324	kg agua / kg aire seco													
1506		HR ₈	0,149	tanto por uno													
1507		h ₈	84933,31	J / kg aire seco													
1508		s ₈	5188,35	J / (K * kg aire seco)													
1509																	
1510																	
1511		Interpolación para obtener la entalpia															
1512																	
1513		Extracciones de las tablas de entalpia en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
1514																	
1515		HR _{inf} = 0,1															
1517			1100000	1150000													
1518		70	75123,0	74920,0													
1519		80	87670,0	87359,0													
1520																	
1521		HR _{sup} = 0,2															
1523			1100000	1150000													
1524		70	79796,0	79388,0													
1525		80	94849,0	94222,0													
1526																	

Figura 16.32. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		
1527	Interpolación por temperatura						Interpolación por presión						Interpolación por humedad relativa						
1528																			
1529	HR_inf = 0,1						HR_inf = 0,1						HR = 0,149						
1530	P_inf = 1100000,0						P = 1139420,3						P = 1139420,3						
1531	T = 75,7 h = 82277,4						T = 75,7 h = 82068,8						T = 75,7 h = 84933,3						
1532																			
1533	HR_inf = 0,1																		
1534	P_sup = 1150000,0																		
1535	T = 75,7 h = 82012,8																		
1536																			
1537	HR_sup = 0,2						HR_sup = 0,2												
1538	P_inf = 1100000,0						P = 1139420,3												
1539	T = 75,7 h = 88379,3						T = 75,7 h = 87959,2												
1540																			
1541	HR_sup = 0,2																		
1542	P_sup = 1150000,0																		
1543	T = 75,7 h = 87846,5																		
1544																			
1545																			
1546	Interpolación para obtener la entropía																		
1547																			
1548	Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																		
1549																			
1550	HR_inf = 0,1																		
1551																			
1552							1100000 1150000												
1553	70						5169,0 5155,0												
1554	80						5206,0 5192,0												
1555																			
1556	HR_sup = 0,2																		
1557																			
1558							1100000 1150000												
1559	70						5184,0 5170,0												
1560	80						5229,0 5214,0												
1561																			
1562	Interpolación por temperatura						Interpolación por presión						Interpolación por humedad relativa						
1563																			
1564	HR_inf = 0,1						HR_inf = 0,1						HR = 0,149						
1565	P_inf = 1100000,0						P = 1139420,3						P = 1139420,3						
1566	T = 75,7 s = 5190,1						T = 75,7 s = 5179,1						T = 75,7 s = 5188,4						
1567																			
1568	HR_inf = 0,1																		
1569	P_sup = 1150000,0																		
1570	T = 75,7 s = 5176,1																		
1571																			
1572	HR_sup = 0,2						HR_sup = 0,2												
1573	P_inf = 1100000,0						P = 1139420,3												
1574	T = 75,7 s = 5209,7						T = 75,7 s = 5198,2												
1575																			
1576	HR_sup = 0,2																		
1577	P_sup = 1150000,0																		
1578	T = 75,7 s = 5195,1																		
1579																			
1580																			
1581																			
1582																			
1583																			

Figura 16.33. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1584	Punto 8s. Salida del compresor BLAC 4 en caso isentrópico																
1585																	
1586		P_8s	1139420,3	Pa													
1587		T_8s	68,72	°C													
1588		T_8s [K]	341,87	K													
1589		P_w,sat_8s	29459,54	Pa													
1590		w_sat_8s	0,01651	kg agua / kg aire seco													
1591		w_8s	0,00324	kg agua / kg aire seco													
1592		HR_8s	0,200	tanto por uno													
1593		h_8s	77769,07	J / kg aire seco													
1594		s_8s	5165,63	J / (K * kg aire seco)													
1595																	
1596																	
1597		Interpolación para obtener la temperatura															
1598																	
1599		Extracciones de las tablas de temperatura en el rango de presión, entropía y humedad absoluta requerido															
1600																	
1601		w_inf = 0,000															
1603			1100000	1150000													
1604		5100	52,6	56,8													
1605		5200	86,6	91,2													
1606																	
1607		w_sup = 0,005															
1609			1100000	1150000													
1610		5100	38,9	42,9													
1611		5200	71,2	75,6													
1612																	
1613		Interpolación por entropía															
1614																	
1615		w_inf =	0,000														
1616		P_inf =	1100000,0														
1617		s =	5165,6	T =	74,9												
1618																	
1619		w_inf =	0,000														
1620		P_sup =	1150000,0														
1621		s =	5165,6	T =	79,3												
1622																	
1623		w_sup =	0,005														
1624		P_inf =	1100000,0														
1625		s =	5165,6	T =	60,1												
1626																	
1627		w_sup =	0,005														
1628		P_sup =	1150000,0														
1629		s =	5165,6	T =	64,3												
1630																	
1631																	
1632		Interpolación para obtener la entalpía															
1633																	
1634		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
1635																	
1636		HR_inf = 0,2															
1638			1100000	1150000													
1639		60	66310,0	66052,0													
1640		70	79796,0	79388,0													
1641																	

Figura 16.34. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1642		HR _{sup} = 0,3															
1644			1100000	1150000													
1645		60	69279,0	68891,0													
1646		70	84495,0	83881,0													
1647																	
1648		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión				Interpolación por humedad relativa						
1649																	
1650		HR _{inf} = 0,2					HR _{inf} = 0,2					HR = 0,200					
1651		P _{inf} = 1100000,0					P = 1139420,3					P = 1139420,3					
1652		T = 68,7		h = 78067,9			T = 68,7		h = 77761,4			T = 68,7		h = 77769,1			
1653																	
1654		HR _{inf} = 0,2															
1655		P _{sup} = 1150000,0															
1656		T = 68,7		h = 77679,1													
1657																	
1658		HR _{sup} = 0,3					HR _{sup} = 0,3										
1659		P _{inf} = 1100000,0					P = 1139420,3										
1660		T = 68,7		h = 82545,2			T = 68,7		h = 82084,0								
1661																	
1662		HR _{sup} = 0,3															
1663		P _{sup} = 1150000,0															
1664		T = 68,7		h = 81960,2													
1665																	
1666																	
1667																	
1668																	
1669																	
1670		Punto 9. Salida del DCA (lado aire) y entrada de los prepurificadores															
1671																	
1672		P ₉	1129261,6	Pa													
1673		T ₉	6,96	°C													
1674		T ₉ [K]	280,11	K													
1675		P _{w,sat_9}	997,77	Pa													
1676		w _{sat_9}	0,00055	kg agua / kg aire seco													
1677		w ₉	0,00055	kg agua / kg aire seco													
1678		HR ₉	1,000	tanto por uno													
1679		h ₉	8448,16	J / kg aire seco													
1680		s ₉	4945,53	J / (K * kg aire seco)													
1681																	
1682																	
1683		Interpolación para obtener la entalpia															
1684																	
1685		Extracciones de las tablas de entalpia en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
1686																	
1687		HR _{inf} = 1,0															
1689			1100000	1150000													
1690		0	864,8	827,1													
1691		10	11815,0	11739,0													
1692																	
1693		HR _{sup} = 1,0															
1695			1100000	1150000													
1696		0	864,8	827,1													
1697		10	11815,0	11739,0													
1698																	

Figura 16.35. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1699	Interpolación por temperatura					Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa						
1700																	
1701	HR_inf = 1,0					HR_inf = 1,0					HR = 1,000						
1702	P_inf = 1100000,0					P = 1129261,6					P = 1129261,6						
1703	T = 6,96 h = 8485,8					T = 6,96 h = 8448,2					T = 6,96 h = 8448,2						
1704																	
1705	HR_inf = 1,0																
1706	P_sup = 1150000,0																
1707	T = 6,96 h = 8421,5																
1708																	
1709	HR_sup = 1,0					HR_sup = 1,0											
1710	P_inf = 1100000,0					P = 1129261,6											
1711	T = 6,96 h = 8485,8					T = 6,96 h = 8448,2											
1712																	
1713	HR_sup = 1,0																
1714	P_sup = 1150000,0																
1715	T = 6,96 h = 8421,5																
1716																	
1717																	
1718	Interpolación para obtener la entropía																
1719																	
1720	Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido																
1721																	
1722	HR_inf = 1,0																
1723																	
1724	1100000 1150000																
1725	0 4926,0 4913,0																
1726	10 4965,0 4952,0																
1727																	
1728	HR_sup = 1,0																
1729																	
1730	1100000 1150000																
1731	0 4926,0 4913,0																
1732	10 4965,0 4952,0																
1733																	
1734	Interpolación por temperatura					Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa						
1735																	
1736	HR_inf = 1,0					HR_inf = 1,0					HR = 1,000						
1737	P_inf = 1100000,0					P = 1129261,6					P = 1129261,6						
1738	T = 7,0 s = 4953,1					T = 7,0 s = 4945,5					T = 7,0 s = 4945,5						
1739																	
1740	HR_inf = 1,0																
1741	P_sup = 1150000,0																
1742	T = 7,0 s = 4940,1																
1743																	
1744	HR_sup = 1,0					HR_sup = 1,0											
1745	P_inf = 1100000,0					P = 1129261,6											
1746	T = 7,0 s = 4953,1					T = 7,0 s = 4945,5											
1747																	
1748	HR_sup = 1,0																
1749	P_sup = 1150000,0																
1750	T = 7,0 s = 4940,1																
1751																	
1752																	
1753																	
1754																	
1755																	

Figura 16.36. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1756	Punto 10. Salida del conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo																
1757																	
1758		P_10	1108309,1	Pa													
1759		T_10	10,26	°C													
1760		T_10 [K]	283,41	K													
1761		P_w,sat_10	1247,48	Pa													
1762		w_sat_10	0,00070	kg agua / kg aire seco													
1763		w_10	0,00000	kg agua / kg aire seco													
1764		HR_10	0,000	tanto por uno													
1765		h_10	10322,10	J / kg aire seco													
1766		s_10	4957,74	J / (K * kg aire seco)													
1767																	
1768																	
1769		Interpolación para obtener la entalpia															
1770																	
1771		Extracciones de las tablas de entalpia en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
1772																	
1773		HR_inf = 0,0															
1774			1100000	1150000													
1775																	
1776		10	10064,0	10064,0													
1777		20	20130,0	20130,0													
1778																	
1779		HR_sup = 0,0															
1780			1100000	1150000													
1781																	
1782		10	10064,0	10064,0													
1783		20	20130,0	20130,0													
1784																	
1785		Interpolación por temperatura															
1786																	
1787		HR_inf =	0,0														
1788		P_inf =	1100000,0														
1789		T =	10,26	h =	10322,1												
1790																	
1791		HR_inf =	0,0														
1792		P_inf =	1150000,0														
1793		T =	10,26	h =	10322,1												
1794																	
1795		HR_sup =	0,0														
1796		P_inf =	1100000,0														
1797		T =	10,26	h =	10322,1												
1798																	
1799		HR_sup =	0,0														
1800		P_sup =	1150000,0														
1801		T =	10,26	h =	10322,1												
1802																	
1803																	
1804		Interpolación para obtener la entropia															
1805																	
1806		Extracciones de las tablas de entropia en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
1807																	
1808		HR_inf = 0,0															
1809			1100000	1150000													
1810																	
1811		10	4959,0	4946,0													
1812		20	4994,0	4981,0													
1813																	

Figura 16.37. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1814		HR _{sup} = 0,0															
1816			1100000	1150000													
1817		10	4959,0	4946,0													
1818		20	4994,0	4981,0													
1819																	
1820		Interpolación por temperatura				Interpolación por presión				Interpolación por humedad relativa							
1821		HR _{inf} = 0,0				HR _{inf} = 0,0				HR = 0,000							
1822		P _{inf} = 1100000,0				P = 1108309,1				P = 1108309,1							
1823		T = 10,3	s = 4959,9			T = 10,3	s = 4957,7			T = 10,3	s = 4957,7						
1824																	
1825		HR _{inf} = 0,0															
1826		P _{sup} = 1150000,0															
1827		T = 10,3	s = 4946,9														
1828																	
1829		HR _{sup} = 0,0				HR _{sup} = 0,0											
1830		P _{inf} = 1100000,0				P = 1108309,1				P = 1108309,1							
1831		T = 10,3	s = 4959,9			T = 10,3	s = 4957,7			T = 10,3	s = 4957,7						
1832																	
1833		HR _{sup} = 0,0															
1834		P _{sup} = 1150000,0															
1835		T = 10,3	s = 4946,9														
1836																	
1837																	
1838																	
1839																	
1840																	
1841																	
1842																	
1843		Cálculos de las propiedades del aire seco															
1844																	
1845																	
1846		Punto 10. Salida del filtro de polvo y punto antes del desvío del bypass del BAC															
1847																	
1848																	
1849		P ₁₀	1108309,1	Pa													
1850		T ₁₀	10,26	°C													
1851		T ₁₀ [K]	283,41	K													
1852		h ₁₀	280344,1	J / kg													
1853		s ₁₀	6112,6	J / (K* kg)													
1854																	
1855																	
1856		Interpolación para obtener la entalpía				Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión y temperatura requerido											
1857																	
1858																	
1859																	
1860			1100000	1150000													
1861		10	280108,0	279950,0													
1862		20	290339,0	290189,0													
1863																	
1864		Interpolación por temperatura				Interpolación por presión											
1865		P _{inf} = 1100000,0				P = 1108309,1											
1866		T = 10,3	h = 280370,3			T = 10,3	h = 280344,1										
1867																	
1868		P _{sup} = 1150000,0															
1869		T = 10,3	h = 280212,5														
1870																	

Figura 16.38. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1871																	
1872																	
1873		Interpolación para obtener la entropía															
1874																	
1875		Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión y temperatura requerido															
1876																	
1877			1100000	1150000													
1878		10	6114,0	6100,0													
1879		20	6149,0	6136,0													
1880																	
1881		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión										
1882																	
1883		P_inf =	1100000,0					P =	1108309,1								
1884		T =	10,3	s =	6114,9			T =	10,3	s =	6112,6						
1885																	
1886		P_sup =	1150000,0														
1887		T =	10,3	s =	6100,9												
1888																	
1889																	
1890																	
1891																	
1892																	
1893		Punto 11. Punto después del desvío del bypass del BAC y entrada del filtro de aspiración del BAC															
1894																	
1895		P_11	1108309,1	Pa													
1896		T_11	10,26	°C													
1897		T_11 [K]	283,41	K													
1898		h_11	280344,1	J / kg													
1899		s_11	6112,6	J / (K * kg)													
1900																	
1901																	
1902																	
1903																	
1904																	
1905		Punto 12. Salida del filtro de aspiración del BAC y entrada del compresor BAC 1															
1906																	
1907		P_12	1093649,8	Pa													
1908		T_12	10,26	°C													
1909		T_12 [K]	283,41	K													
1910		h_12	280390,50	J / kg													
1911		s_12	6116,55	J / (K * kg)													
1912																	
1913																	
1914		Interpolación para obtener la entalpía															
1915																	
1916		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión y temperatura requerido															
1917																	
1918			1050000	1100000													
1919		10	280267,0	280108,0													
1920		20	290489,0	290339,0													
1921																	
1922		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión										
1923																	
1924		P_inf =	1050000,0					P =	1093649,8								
1925		T =	10,3	h =	280529,1			T =	10,3	h =	280390,5						
1926																	

Figura 16.39. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1927		P _{sup} =	1100000,0														
1928		T =	10,3	h =	280370,3												
1929																	
1930																	
1931		Interpolación para obtener la entropía															
1932		Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión y temperatura requerido															
1933																	
1934																	
1935			1050000	1100000													
1936		10	6127,0	6114,0													
1937		20	6163,0	6149,0													
1938																	
1939		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión										
1940																	
1941		P _{inf} =	1050000,0				P =	1093649,8									
1942		T =	10,3	s =	6127,9		T =	10,3	s =	6116,6							
1943																	
1944		P _{sup} =	1100000,0														
1945		T =	10,3	s =	6114,9												
1946																	
1947																	
1948																	
1949																	
1950																	
1951		Punto 13. Salida del compresor BAC 1 y entrada del intercambiador de calor IC4															
1952																	
1953		P ₁₃	1482599,7	Pa													
1954		T ₁₃	42,61	°C													
1955		T ₁₃ [K]	315,76	K													
1956		h ₁₃	312424,87	J / kg													
1957		s ₁₃	6136,36	J / (K * kg)													
1958																	
1959		Interpolación para obtener la entalpía															
1960		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión y temperatura requerido															
1961																	
1962																	
1963			1450000	1500000													
1964		40	309832,0	309698,0													
1965		50	320085,0	319958,0													
1966																	
1967																	
1968		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión										
1969																	
1970		P _{inf} =	1450000,0				P =	1482599,7									
1971		T =	42,6	h =	312511,0		T =	42,6	h =	312424,9							
1972																	
1973		P _{sup} =	1500000,0														
1974		T =	42,6	h =	312378,9												
1975																	
1976		Interpolación para obtener la entropía															
1977		Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión y temperatura requerido															
1978																	
1979																	
1980																	
1981			1450000	1500000													
1982		40	6135,0	6124,0													
1983		50	6167,0	6157,0													

Figura 16.40. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
1984																		
1985		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión											
1986																		
1987		P_inf =	1450000,0				P =	1482599,7										
1988		T =	42,6		s =	6143,4	T =	42,6		s =	6136,4							
1989																		
1990		P_sup =	1500000,0															
1991		T =	42,6		s =	6132,6												
1992																		
1993																		
1994																		
1995																		
1996																		
1997		Punto 13s. Salida del compresor BAC 1 en caso isentrópico																
1998																		
1999		P_13s	1482599,7	Pa														
2000		T_13s	36,8	°C														
2001		T_13s [K]	309,92	K														
2002		h_13s	306422,83	J / kg														
2003		s_13s	6116,55	J / (K * kg)														
2004																		
2005																		
2006		Interpolación para obtener la temperatura																
2007																		
2008		Extracciones de las tablas de temperatura en el rango de presión y entropía requerido																
2009																		
2010			1450000	1500000														
2011		6100	29,7	32,7														
2012		6200	60,6	63,9														
2013																		
2014		Interpolación por entropía					Interpolación por presión											
2015																		
2016		P_inf =	1450000,0				P =	1482599,7										
2017		s =	6116,6		T =	34,8	s =	6116,6		T =	36,8							
2018																		
2019		P_sup =	1500000,0															
2020		s =	6116,6		T =	37,8												
2021																		
2022																		
2023		Interpolación para obtener la entalpía																
2024																		
2025		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión y temperatura requerido																
2026																		
2027			1450000	1500000														
2028		30	299568,0	299427,0														
2029		40	309832,0	309698,0														
2030																		
2031		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión											
2032																		
2033		P_inf =	1450000,0				P =	1482599,7										
2034		T =	36,8		h =	306511,7	T =	36,8		h =	306422,8							
2035																		
2036		P_sup =	1500000,0															
2037		T =	36,8		h =	306375,4												
2038																		
2039																		
2040																		

Figura 16.41. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2041																	
2042																	
2043	Punto 14. Salida del intercambiador de calor IC4 y entrada del compresor BAC 2																
2044																	
2045																	
2046																	
2047																	
2048																	
2049																	
2050																	
2051																	
2052																	
2053																	
2054																	
2055																	
2056																	
2057																	
2058																	
2059																	
2060																	
2061																	
2062																	
2063																	
2064																	
2065																	
2066																	
2067																	
2068																	
2069																	
2070																	
2071																	
2072																	
2073																	
2074																	
2075																	
2076																	
2077																	
2078																	
2079																	
2080																	
2081																	
2082																	
2083																	
2084																	
2085																	
2086																	
2087																	
2088																	
2089	Punto 15. Salida del compresor BAC 2 y entrada del aftercooler del BAC																
2090																	
2091																	
2092																	
2093																	
2094																	
2095																	
2096																	

Figura 16.42. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2097																	
2098		Interpolación para obtener la entalpía															
2099		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión y temperatura requerido															
2100																	
2101																	
2102			1950000	2000000													
2103		60	329130,0	329011,0													
2104		70	339430,0	339316,0													
2105																	
2106		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión										
2107																	
2108		P_inf =	1950000,0					P =	1998778,0								
2109		T =	60,6	h =	329708,5			T =	60,6	h =	329592,7						
2110																	
2111		P_sup =	2000000,0														
2112		T =	60,6	h =	329589,8												
2113																	
2114		Interpolación para obtener la entropía															
2115		Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión y temperatura requerido															
2116																	
2117																	
2118																	
2119			1950000	2000000													
2120		60	6110,0	6102,0													
2121		70	6140,0	6133,0													
2122																	
2123		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión										
2124																	
2125		P_inf =	1950000,0					P =	1998778,0								
2126		T =	60,6	s =	6111,7			T =	60,6	s =	6103,9						
2127																	
2128		P_sup =	2000000,0														
2129		T =	60,6	s =	6103,7												
2130																	
2131																	
2132																	
2133																	
2134																	
2135		Punto 15s. Salida del compresor BAC 2 en caso isentrópico															
2136																	
2137		P_15s	1998778,0	Pa													
2138		T_15s	54,9	°C													
2139		T_15s [K]	328,04	K													
2140		h_15s	323743,55	J / kg													
2141		s_15s	6085,54	J / (K * kg)													
2142																	
2143																	
2144		Interpolación para obtener la temperatura															
2145																	
2146		Extracciones de las tablas de temperatura en el rango de presión y entropía requerido															
2147																	
2148			1950000	2000000													
2149		6000	26,6	28,8													
2150		6100	56,9	59,4													
2151																	

Figura 16.43. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		
2152	Interpolación por entropía					Interpolación por presión													
2153																			
2154	P_inf = 1950000,0		T = 52,5			P = 1998778,0		T = 54,9											
2155	s = 6085,5					s = 6085,5													
2156																			
2157	P_sup = 2000000,0		T = 54,9			P = 1998778,0		T = 54,9											
2158	s = 6085,5					s = 6085,5													
2159																			
2160																			
2161	Interpolación para obtener la entalpía																		
2162																			
2163	Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión y temperatura requerido																		
2164																			
2165		1950000	2000000																
2166	50	318821,0	318696,0																
2167	60	329130,0	329011,0																
2168																			
2169	Interpolación por temperatura					Interpolación por presión													
2170																			
2171	P_inf = 1950000,0		h = 323862,6			P = 1998778,0		h = 323743,6											
2172	T = 54,9					T = 54,9													
2173																			
2174	P_sup = 2000000,0		h = 323740,6			P = 1998778,0		h = 323743,6											
2175	T = 54,9					T = 54,9													
2176																			
2177																			
2178																			
2179	Punto 16. Salida del aftercooler del BAC																		
2180																			
2181	P_16	1993778,0	Pa																
2182	T_16	26,25	°C																
2183	T_16 [K]	299,40	K																
2184	h_16	294154,88	J / kg																
2185	s_16	5991,88	J / (K * kg)																
2186																			
2187																			
2188	Interpolación para obtener la entalpía																		
2189																			
2190	Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión y temperatura requerido																		
2191																			
2192		1950000	2000000																
2193	20	287806,0	287658,0																
2194	30	298162,0	298022,0																
2195																			
2196	Interpolación por temperatura					Interpolación por presión													
2197																			
2198	P_inf = 1950000,0		h = 294280,1			P = 1993778,0		h = 294154,9											
2199	T = 26,3					T = 26,3													
2200																			
2201	P_sup = 2000000,0		h = 294137,1			P = 1993778,0		h = 294154,9											
2202	T = 26,3					T = 26,3													
2203																			
2204																			
2205	Interpolación para obtener la entropía																		
2206																			
2207	Extracciones de las tablas de entropía en el rango de presión y temperatura requerido																		
2208																			

Figura 16.44. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2209			1950000	2000000													
2210		20	5977,0	5969,0													
2211		30	6012,0	6004,0													
2212																	
2213		Interpolación por temperatura				Interpolación por presión											
2214																	
2215		P_inf =	1950000,0			P =	1993778,0										
2216		T =	26,3	s = 5998,9		T =	26,3	s = 5991,9									
2217																	
2218		P_sup =	2000000,0														
2219		T =	26,3	s = 5990,9													
2220																	
2221																	
2222																	
2223																	
2224																	
2225																	
2226																	
2227		Cálculo de los caudales y potencias en los equipos															
2228		Filtro de aspiración del BLAC															
2229																	
2230		Entrada				Salida				Potencia disipada en el filtro de aspiración del BLAC							
2231																	
2232		P_0	101325,0	Pa	P_1	100676,4	Pa	Pot_FiltroBLAC	3,06	kW							
2233		T_0	14,16	°C	T_1	14,16	°C										
2234		w_0	0,01006	kg agua / kg aire seco	w_1	0,01006	kg agua / kg aire seco										
2235		HR_0	1,000	tanto por uno	HR_1	0,994	tanto por uno										
2236		h_0	41121,9	J / kg aire seco	h_1	41064,9	J / kg aire seco										
2237		m_0	54,1694	kg/s	m_1	54,1694	kg/s										
2238		ḡ_0	53,6296	kg aire seco / s	ḡ_1	53,6296	kg aire seco / s										
2239		ŷ_0	0,5398	kg agua / s	ŷ_1	0,5398	kg agua / s										
2240		Pot_0	2205353	W	Pot_1	2202297	W										
2241																	
2242																	
2243																	
2244		BLAC 1															
2245		Entrada				Salida				Potencia aportada en el BLAC 1							
2246																	
2247		P_1	100676,4	Pa	P_2	214448,3	Pa	Pot_BLAC1	4605,69	kW							
2248		T_1	14,16	°C	T_2	97,92	°C										
2249		w_1	0,01006	kg agua / kg aire seco	w_2	0,01006	kg agua / kg aire seco										
2250		HR_1	0,994	tanto por uno	HR_2	0,036	tanto por uno										
2251		h_1	41064,9	J / kg aire seco	h_2	126944,4	J / kg aire seco										
2252		m_1	54,1694	kg/s	m_2	54,1694	kg/s										
2253		ḡ_1	53,6296	kg aire seco / s	ḡ_2	53,6296	kg aire seco / s										
2254		ŷ_1	0,5398	kg agua / s	ŷ_2	0,5398	kg agua / s										
2255		Pot_1	2202297	W	Pot_2	6807984	W										
2256																	
2257																	
2258																	

Figura 16.45. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
2259	Intercambiador de calor IC1 (entre BLAC 1 y BLAC 2)																	
2260																		
2261	Entrada (lado aire)					Salida (lado aire)					Potencia disipada en el intercambiador							
2262	P_2	214448,3	Pa						P_3	213119,9	Pa	Pot_IC1		4039,23	kW			
2263	T_2	97,92	°C						T_3	25,52	°C							
2264	w_2	0,01006	kg agua / kg aire seco						w_3	0,00967	kg agua / kg aire seco							
2265	HR_2	0,036	tanto por uno						HR_3	1,000	tanto por uno							
2266	h_2	126944,4	J / kg aire seco						h_3	51627,2	J / kg aire seco	Drenaje						
2267	m_2	54,1694	kg/s						m_3	54,1484	kg/s	y_dren_IC1	0,0210	kg agua / s				
2268	x_2	53,6296	kg aire seco / s						x_3	53,6296	kg aire seco / s							
2269	y_2	0,5398	kg agua / s						y_3	0,5188	kg agua / s							
2270	Pot_2	6807984	W						Pot_3	2768750	W							
2271																		
2272																		
2273																		
2274	BLAC 2																	
2275																		
2276	Entrada					Salida					Potencia aportada en el BLAC 2							
2277	P_3	213119,9	Pa						P_4	367952,6	Pa	Pot_BLAC2		3174,82	kW			
2278	T_3	25,52	°C						T_4	84,00	°C							
2279	w_3	0,00967	kg agua / kg aire seco						w_4	0,00967	kg agua / kg aire seco							
2280	HR_3	1,000	tanto por uno						HR_4	0,101	tanto por uno							
2281	h_3	51627,2	J / kg aire seco						h_4	110826,2	J / kg aire seco							
2282	m_3	54,1484	kg/s						m_4	54,1484	kg/s							
2283	x_3	53,6296	kg aire seco / s						x_4	53,6296	kg aire seco / s							
2284	y_3	0,5188	kg agua / s						y_4	0,5188	kg agua / s							
2285	Pot_3	2768750	W						Pot_4	5943571	W							
2286																		
2287																		
2288																		
2289	Intercambiador de calor IC2 (entre BLAC 2 y BLAC 3)																	
2290																		
2291	Entrada (lado aire)					Salida (lado aire)					Potencia disipada en el intercambiador							
2292	P_4	367952,6	Pa						P_5	365061,3	Pa	Pot_IC2		3776,89	kW			
2293	T_4	84,00	°C						T_5	25,40	°C							
2294	w_4	0,00967	kg agua / kg aire seco						w_5	0,00557	kg agua / kg aire seco							
2295	HR_4	0,101	tanto por uno						HR_5	1,000	tanto por uno							
2296	h_4	110826,2	J / kg aire seco						h_5	40400,9	J / kg aire seco	Drenaje						
2297	m_4	54,1484	kg/s						m_5	53,9283	kg/s	y_dren_IC2	0,2201	kg agua / s				
2298	x_4	53,6296	kg aire seco / s						x_5	53,6296	kg aire seco / s							
2299	y_4	0,5188	kg agua / s						y_5	0,2987	kg agua / s							
2300	Pot_4	5943571	W						Pot_5	2166683	W							
2301																		
2302																		
2303																		

Figura 16.46. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2304	BLAC 3																
2305																	
2306	Entrada						Salida						Potencia aportada en el BLAC 3				
2307	P_5	365061,3	Pa				P_6	741246,9	Pa				Pot_BLAC3	4477,07	kW		
2308	T_5	25,40	°C				T_6	107,81	°C								
2309	w_5	0,00557	kg agua / kg aire seco				w_6	0,00557	kg agua / kg aire seco								
2310	HR_5	1,000	tanto por uno				HR_6	0,049	tanto por uno								
2311	h_5	40400,9	J / kg aire seco				h_6	123882,0	J / kg aire seco								
2312	m_5	53,9283	kg/s				m_6	53,9283	kg/s								
2313	x_5	53,6296	kg aire seco / s				x_6	53,6296	kg aire seco / s								
2314	y_5	0,2987	kg agua / s				y_6	0,2987	kg agua / s								
2315	Pot_5	2166683	W				Pot_6	6643749	W								
2316																	
2317																	
2318																	
2319	Intercambiador de calor IC3 (entre BLAC 3 y BLAC 4)																
2320																	
2321	Entrada (lado aire)						Salida (lado aire)						Potencia disipada en el intercambiador				
2322	P_6	741246,9	Pa				P_7	738394,6	Pa				Pot_IC3	4667,96	kW		
2323	T_6	107,81	°C				T_7	28,21	°C								
2324	w_6	0,00557	kg agua / kg aire seco				w_7	0,00324	kg agua / kg aire seco								
2325	HR_6	0,049	tanto por uno				HR_7	1,000	tanto por uno								
2326	h_6	123882,0	J / kg aire seco				h_7	36841,4	J / kg aire seco				Drenaje				
2327	m_6	53,9283	kg/s				m_7	53,8032	kg/s				y_dren_IC3	0,1252	kg agua / s		
2328	x_6	53,6296	kg aire seco / s				x_7	53,6296	kg aire seco / s								
2329	y_6	0,2987	kg agua / s				y_7	0,1735	kg agua / s								
2330	Pot_6	6643749	W				Pot_7	1975792	W								
2331																	
2332																	
2333																	
2334	BLAC 4																
2335																	
2336	Entrada						Salida						Potencia aportada en el BLAC 4				
2337	P_7	738394,6	Pa				P_8	1139420,3	Pa				Pot_BLAC4	2579,15	kW		
2338	T_7	28,21	°C				T_8	75,70	°C								
2339	w_7	0,00324	kg agua / kg aire seco				w_8	0,00324	kg agua / kg aire seco								
2340	HR_7	1,000	tanto por uno				HR_8	0,149	tanto por uno								
2341	h_7	36841,4	J / kg aire seco				h_8	84933,3	J / kg aire seco								
2342	m_7	53,8032	kg/s				m_8	53,8032	kg/s								
2343	x_7	53,6296	kg aire seco / s				x_8	53,6296	kg aire seco / s								
2344	y_7	0,1735	kg agua / s				y_8	0,1735	kg agua / s								
2345	Pot_7	1975792	W				Pot_8	4554943	W								
2346																	
2347																	
2348																	

Figura 16.47. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2349	DCA																
2350																	
2351	Entrada (lado aire)						Salida (lado aire)						Potencia disipada en el intercambiador				
2352	P_8	1139420,3	Pa				P_9	1129261,6	Pa				Pot_DCA	4101,87	kW		
2353	T_8	75,70	°C				T_9	6,96	°C								
2354	w_8	0,00324	kg agua / kg aire seco				w_9	0,00055	kg agua / kg aire seco								
2355	HR_8	0,149	tanto por uno				HR_9	1,000	tanto por uno				Drenaje				
2356	h_8	84933,3	J / kg aire seco				h_9	8448,2	J / kg aire seco				y_dren_DCA	0,1440	kg agua / s		
2357	m_8	53,8032	kg/s				m_9	53,6591	kg/s								
2358	x_8	53,6296	kg aire seco / s				x_9	53,6296	kg aire seco / s								
2359	y_8	0,1735	kg agua / s				y_9	0,0295	kg agua / s								
2360	Pot_8	4554943	W				Pot_9	453071	W								
2361																	
2362																	
2363																	
2364	Conjunto de los prepurificadores y el filtro de polvo																
2365																	
2366	Entrada						Salida						Potencia aportada en el prepurificador				
2367	P_9	1129261,6	Pa				P_10	1108309,1	Pa				Pot_Prep	100,50	kW		
2368	T_9	6,96	°C				T_10	10,26	°C								
2369	w_9	0,00055	kg agua / kg aire seco				w_10	0,00000	kg agua / kg aire seco								
2370	HR_9	1,000	tanto por uno				HR_10	0,000	tanto por uno				Drenaje				
2371	h_9	8448,2	J / kg aire seco				h_10	10322,1	J / kg aire seco				y_dren_Prep	0,0295	kg agua / s		
2372	m_9	53,6591	kg/s				m_10	53,6296	kg/s								
2373	x_9	53,6296	kg aire seco / s				x_10	53,6296	kg aire seco / s								
2374	y_9	0,0295	kg agua / s				y_10	0,0000	kg agua / s								
2375	Pot_9	453071	W				Pot_10	553571	W								
2376																	
2377																	
2378																	
2379	Filtro de aspiración del BAC																
2380																	
2381	Entrada						Salida						Potencia disipada en el filtro de aspiración del BAC				
2382	P_11	1108309,1	Pa				P_12	1093649,8	Pa				Pot_FiltroBAC	-0,63	kW		
2383	T_11	10,26	°C				T_12	10,26	°C								
2384	h_11	280344,1	J / kg				h_12	280390,5	J / kg								
2385	m_11	13,5601	kg/s				m_12	13,5601	kg/s								
2386	Pot_11	3801505	W				Pot_12	3802134	W								
2387																	
2388																	
2389																	
2390	BAC 1																
2391																	
2392	Entrada						Salida						Potencia aportada en el BAC 1				
2393	P_12	1093649,8	Pa				P_13	1482599,7	Pa				Pot_BAC1	434,39	kW		
2394	T_12	10,26	°C				T_13	42,61	°C								
2395	h_12	280390,5	J / kg				h_13	312424,9	J / kg								
2396	m_12	13,5601	kg/s				m_13	13,5601	kg/s								
2397	Pot_12	3802134	W				Pot_13	4236525	W								
2398																	
2399																	
2400																	

Figura 16.48. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2401	Intercambiador de calor IC4 (entre BAC 1 y BAC 2)																
2402																	
2403	Entrada (lado aire)					Salida (lado aire)					Potencia disipada en el intercambiador						
2404	P_13	1482599,7	Pa			P_14	1481447,1	Pa			Pot_IC4	212,48	kW				
2405	T_13	42,61	°C			T_14	27,35	°C									
2406	h_13	312424,9	J / kg			h_14	296755,4	J / kg									
2407	m_13	13,5601	kg/s			m_14	13,5601	kg/s									
2408	Pot_13	4236525	W			Pot_14	4024045	W									
2409																	
2410																	
2411																	
2412	BAC 2																
2413																	
2414	Entrada					Salida					Potencia aportada en el BAC 2						
2415	P_14	1481447,1	Pa			P_15	1998778,0	Pa			Pot_BAC2	445,28	kW				
2416	T_14	27,35	°C			T_15	60,56	°C									
2417	h_14	296755,4	J / kg			h_15	329592,7	J / kg									
2418	m_14	13,5601	kg/s			m_15	13,5601	kg/s									
2419	Pot_14	4024045	W			Pot_15	4469323	W									
2420																	
2421																	
2422																	
2423	Aftercooler del BAC																
2424																	
2425	Entrada (lado aire)					Salida (lado aire)					Potencia disipada en el intercambiador						
2426	P_15	1998778,0	Pa			P_16	1993778,0	Pa			Pot_Aft	480,54	kW				
2427	T_15	60,56	°C			T_16	26,25	°C									
2428	h_15	329592,7	J / kg			h_16	294154,9	J / kg									
2429	m_15	13,5601	kg/s			m_16	13,5601	kg/s									
2430	Pot_15	4469323	W			Pot_16	3988781	W									
2431																	
2432																	
2433																	
2434																	
2435																	
2436	Cálculo de las condiciones de entrada y salida de la corriente de aire																
2437																	
2438																	
2439	Condiciones en base húmeda																
2440																	
2441	Condiciones del aire de entrada al sistema					Potencia que entra al sistema en la corriente de aire											
2442	P_amb	101325,0	Pa			Pot_entrada	2205353	W									
2443	T_amb	14,16	°C			Pot_entrada	2205,4	kW									
2444	T_amb [K]	287,31	K														
2445	HR_amb	1,000	tanto por uno														
2446	P_w,sat_amb	1613,41	Pa														
2447	w_amb	0,01006	kg agua / kg aire seco														
2448	h_0	41121,9	J / kg aire seco														
2449	s_0	5756,8	J / (K * kg aire seco)														
2450	m_0	54,1694	kg/s														
2451	x_0	53,6296	kg aire seco / s														
2452	y_0	0,5398	kg agua / s														
2453																	
2454																	

Figura 16.49. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2455																	
2456		Condiciones del aire de la salida del sistema a alta presión					Potencia que sale del sistema en la corriente de aire a alta presión										
2457		P_16	1993778,0	Pa		Pot_salidaAP	358297	W									
2458		T_16	26,25	°C		Pot_salidaAP	358,3	kW									
2459		T_16 [K]	299,40	K													
2460		HR_16	0,000	tanto por uno													
2461		w_16	0,000	kg agua / kg aire seco													
2462		h_16	26422,8	J / kg aire seco													
2463		m_16	13,5601	kg/s													
2464		x_16	13,5601	kg aire seco / s													
2465		y_16	0,0000	kg agua / s													
2466																	
2467																	
2468		Interpolación para obtener la entalpía															
2469		Extracciones de las tablas de entalpía en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
2470																	
2471																	
2472		HR_inf = 0,0															
2473			1950000	2000000													
2474																	
2475		20	20130,0	20130,0													
2476		30	30196,0	30196,0													
2477																	
2478		HR_sup = 0,0															
2479			1950000	2000000													
2480																	
2481		20	20130,0	20130,0													
2482		30	30196,0	30196,0													
2483																	
2484		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa					
2485																	
2486		HR_inf =	0,0			HR_inf =	0,0			HR =	0,000						
2487		P_inf =	1950000,0			P =	1993778,0			P =	1993778,0						
2488		T =	26,3	h =	26422,8	T =	26,3	h =	26422,8	T =	26,3	h =	26422,8				
2489																	
2490		HR_inf =	0,0														
2491		P_sup =	2000000,0														
2492		T =	26,3	h =	26422,8												
2493																	
2494		HR_sup =	0,0														
2495		P_inf =	1950000,0														
2496		T =	26,3	h =	26422,8												
2497																	
2498		HR_sup =	0,0														
2499		P_sup =	2000000,0														
2500		T =	26,3	h =	26422,8												
2501																	
2502																	

Figura 16.50. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2503																	
2504		Condiciones del aire de salida del desvío de aire a baja presión					Potencia que sale del sistema en el desvío de aire a baja presión										
2505		P_17	1108309,1	Pa		Pot_salidaBP	413601	W									
2506		T_17	10,26	°C		Pot_salidaBP	413,6	kW									
2507		T_17 [K]	283,41	K													
2508		HR_17	0,000	tanto por uno													
2509		w_17	0,000	kg agua / kg aire seco													
2510		h_17	10322,1	J / kg aire seco													
2511		m_17	40,0695	kg/s													
2512		ḡ_17	40,0695	kg aire seco / s													
2513		ḡ_17	0,0000	kg agua / s													
2514																	
2515																	
2516		Interpolación para obtener la entalpia															
2517																	
2518		Extracciones de las tablas de entalpia en el rango de presión, temperatura y humedad relativa requerido															
2519																	
2520		HR_inf = 0,0															
2522			1100000	1150000													
2523		10	10064,0	10064,0													
2524		20	20130,0	20130,0													
2525																	
2526		HR_sup = 0,0															
2528			1100000	1150000													
2529		10	10064,0	10064,0													
2530		20	20130,0	20130,0													
2531																	
2532		Interpolación por temperatura					Interpolación por presión					Interpolación por humedad relativa					
2533		HR_inf =	0,0			HR_inf =	0,0			HR =	0,000						
2534		P_inf =	1100000,0			P =	1108309,1			P =	1108309,1						
2535		T =	10,3	h = 10322,1		T =	10,3	h = 10322,1		T =	10,3	h = 10322,1					
2536																	
2537		HR_inf =	0,0														
2538		P_sup =	1150000,0														
2539		T =	10,3	h = 10322,1													
2540																	
2541		HR_sup =	0,0			HR_sup =	0,0										
2542		P_inf =	1100000,0			P =	1108309,1										
2543		T =	10,3	h = 10322,1		T =	10,3	h = 10322,1									
2544																	
2545		HR_sup =	0,0														
2546		P_sup =	1150000,0														
2547		T =	10,3	h = 10322,1													
2548																	
2549																	
2550																	
2551																	

Figura 16.51. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
2552	Condiciones en base seca																	
2553																		
2554																		
2555	Condiciones del aire de la salida del sistema a alta presión					Potencia que sale del sistema en la corriente de aire a alta presión												
2556	P_16	1993778,0	Pa						Pot_salidaAP	3988781	W							
2557	T_16	26,25	°C						Pot_salidaAP	3988,8	kW							
2558	T_16 [K]	299,40	K															
2559	h_16	294154,9	J / kg															
2560	m_16	13,5601	kg/s															
2561																		
2562																		
2563	Condiciones del aire de salida del desvío de aire a baja presión					Potencia que sale del sistema en el desvío de aire a baja presión												
2564	P_17	1108309,1	Pa						Pot_salidaBP	11233247	W							
2565	T_17	10,26	°C						Pot_salidaBP	11233,2	kW							
2566	T_17 [K]	283,41	K															
2567	h_17	280344,1	J / kg															
2568	m_17	40,0695	kg/s															

Figura 16.52. – Hoja de estado de funcionamiento (continuación)



17.- ANEXO III: HISTÓRICO DEL ÚLTIMO TRIMESTRE

En las siguientes figuras se puede ver la hoja con los históricos a partir de las variables semanales del último trimestre.



Figura 17.1. – Histórico semanal del último trimestre

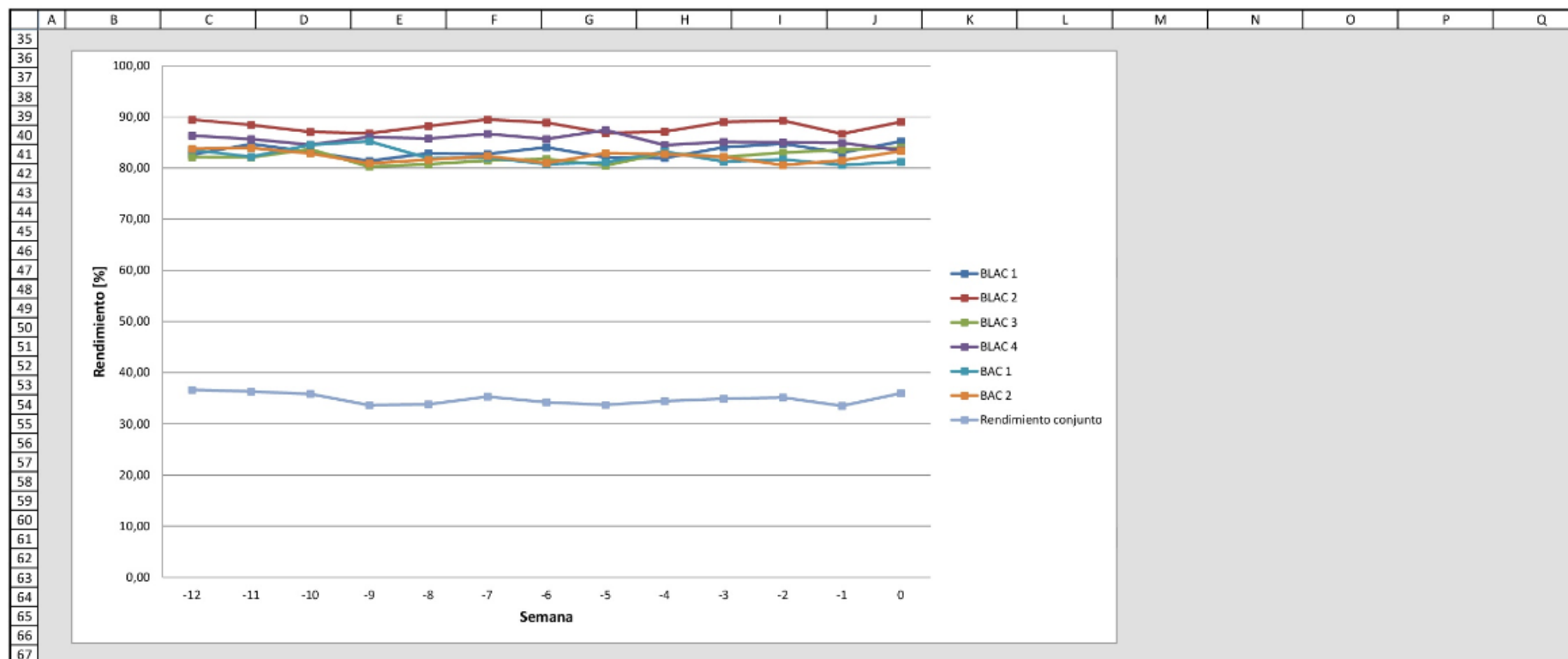


Figura 17.2. – Histórico semanal del último trimestre (continuación)

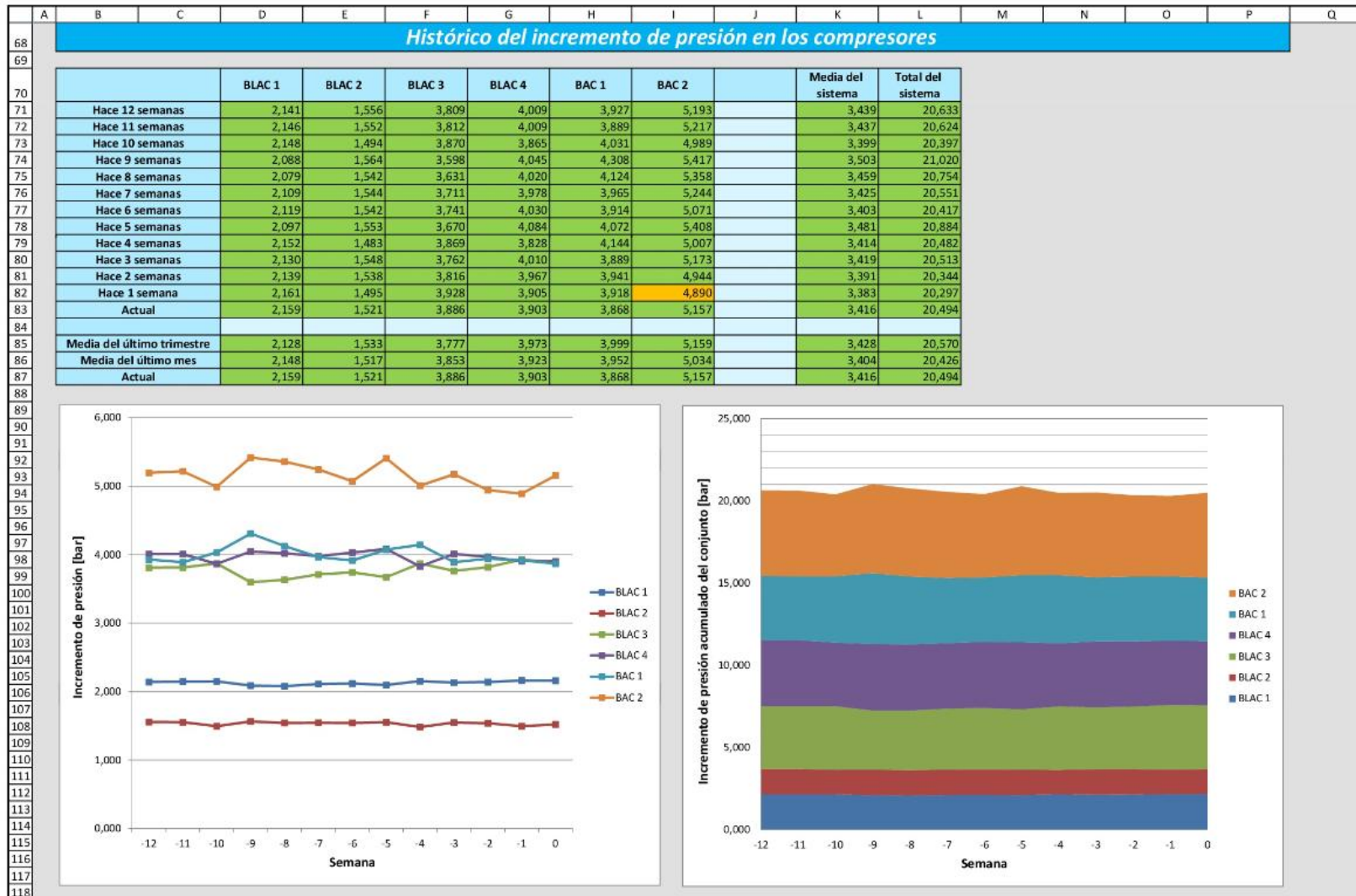


Figura 17.3. – Histórico semanal del último trimestre (continuación)



Figura 17.4. – Histórico semanal del último trimestre (continuación)

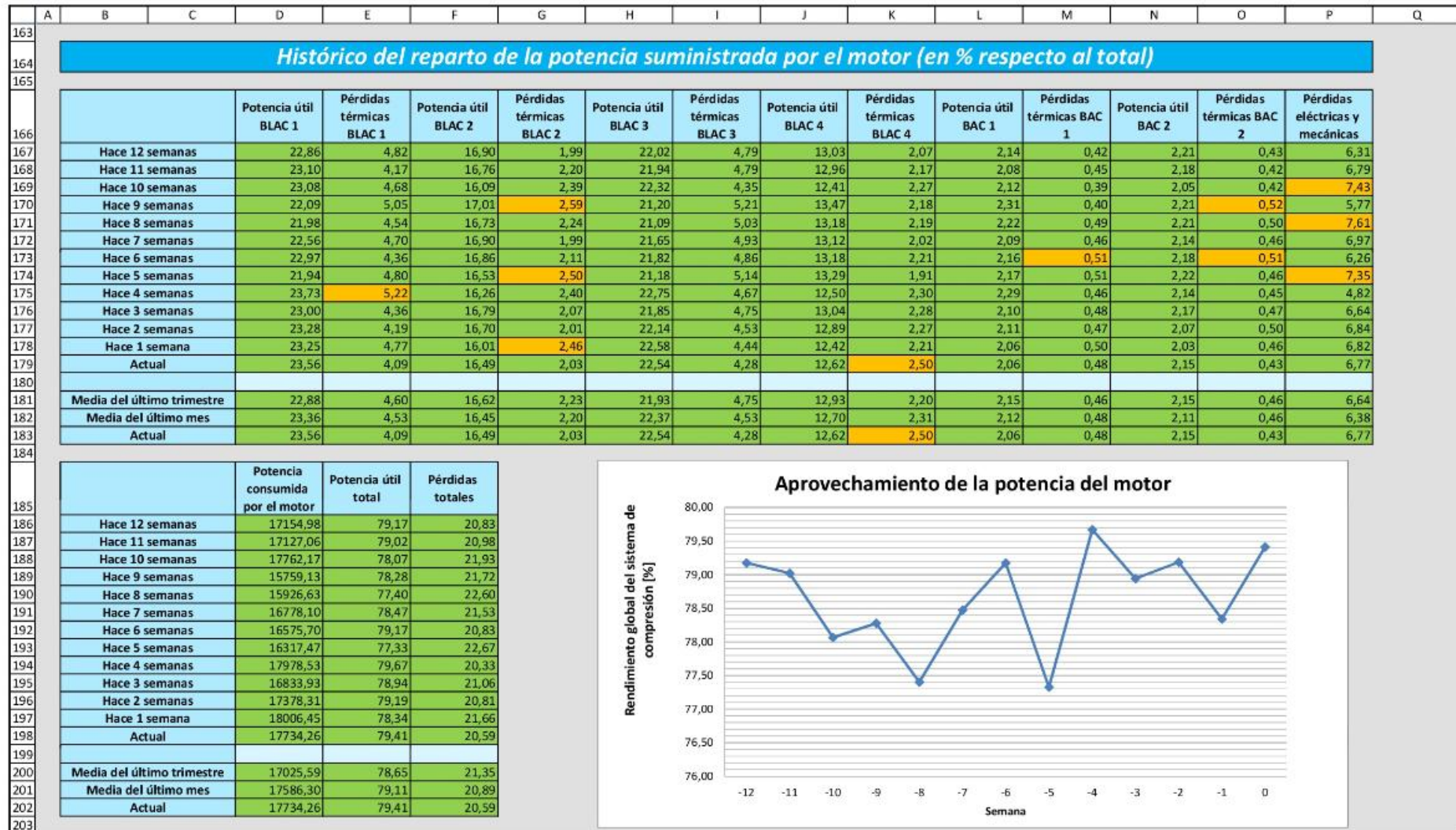


Figura 17.5. – Histórico semanal del último trimestre (continuación)

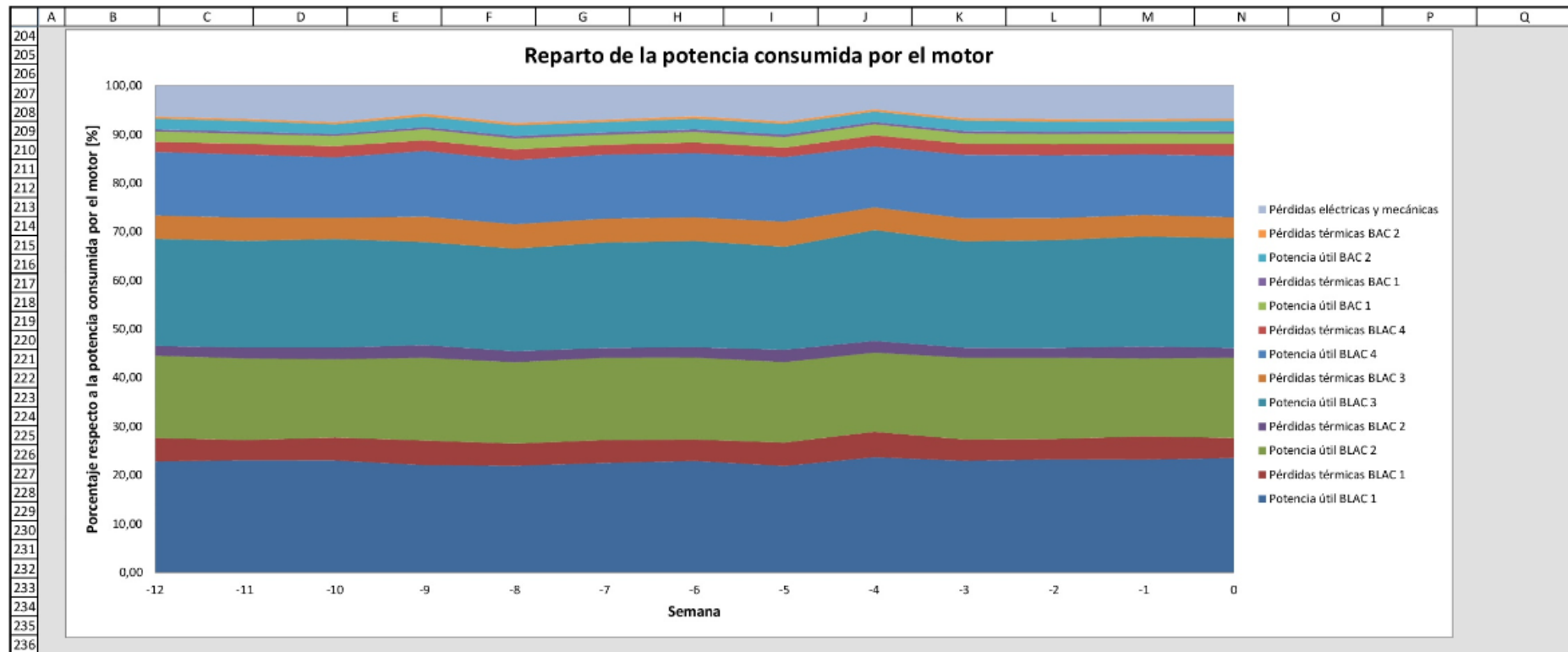


Figura 17.6. – Histórico semanal del último trimestre (continuación)

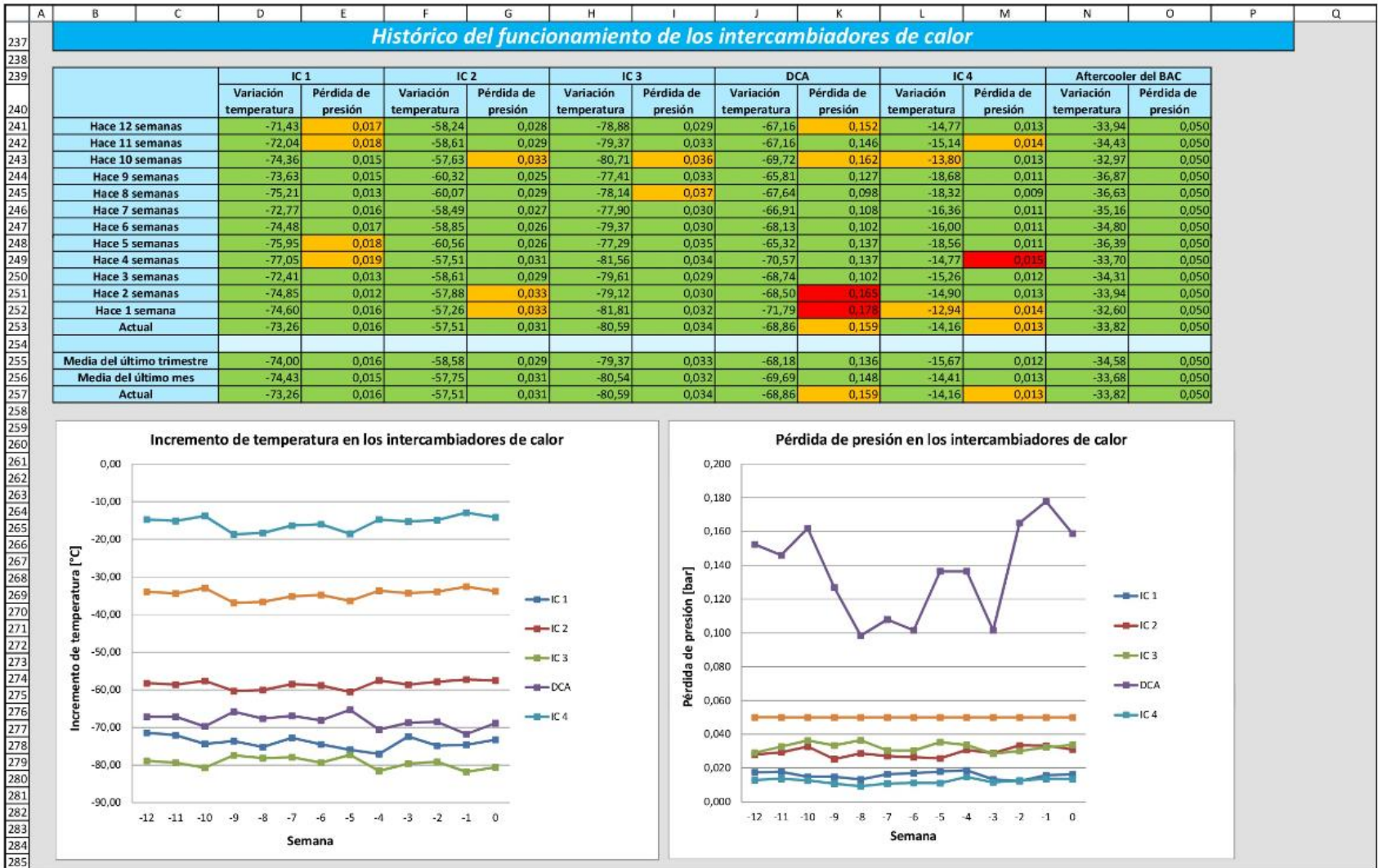


Figura 17.7. – Histórico semanal del último trimestre (continuación)

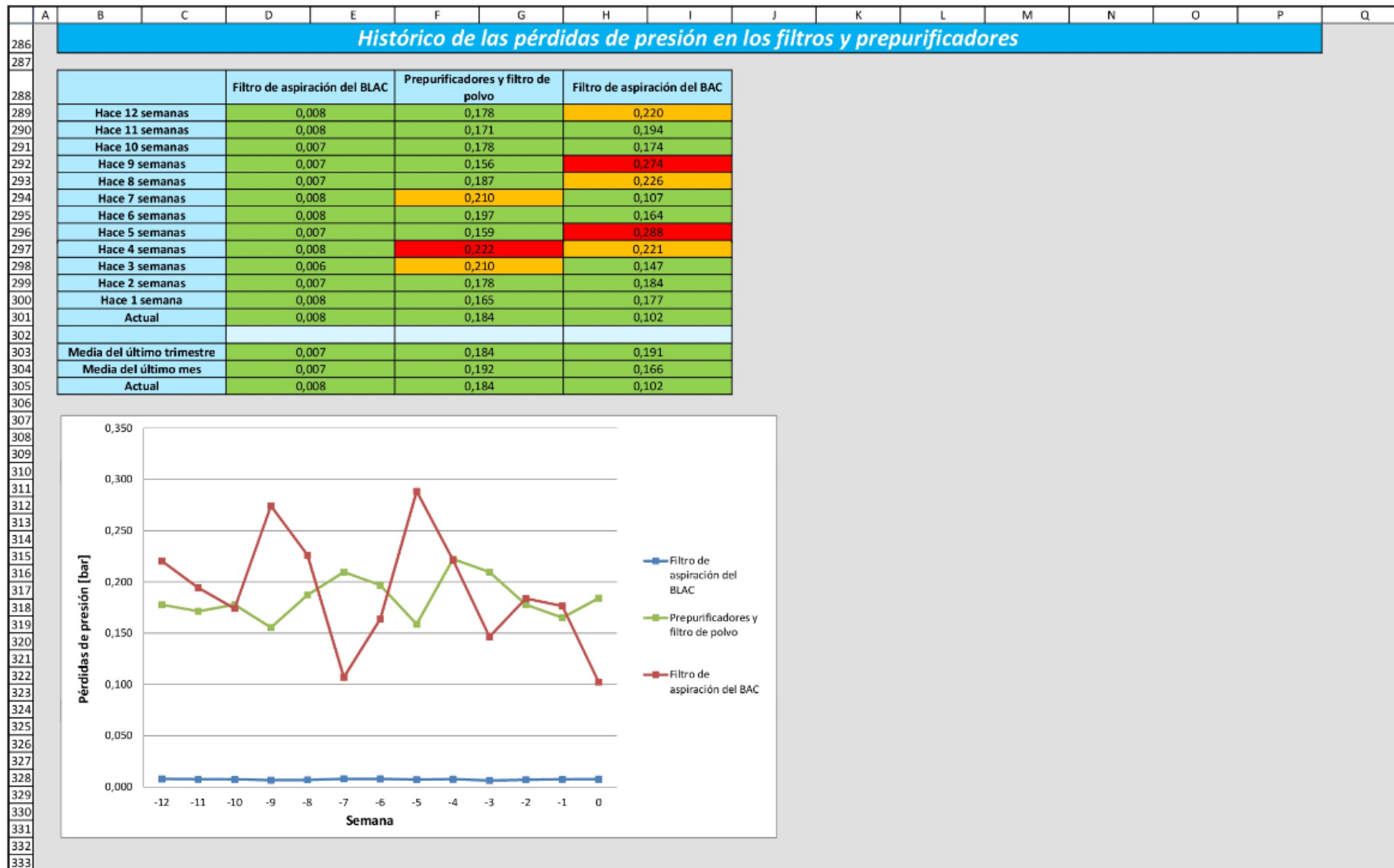


Figura 17.8. – Histórico semanal del último trimestre (continuación)

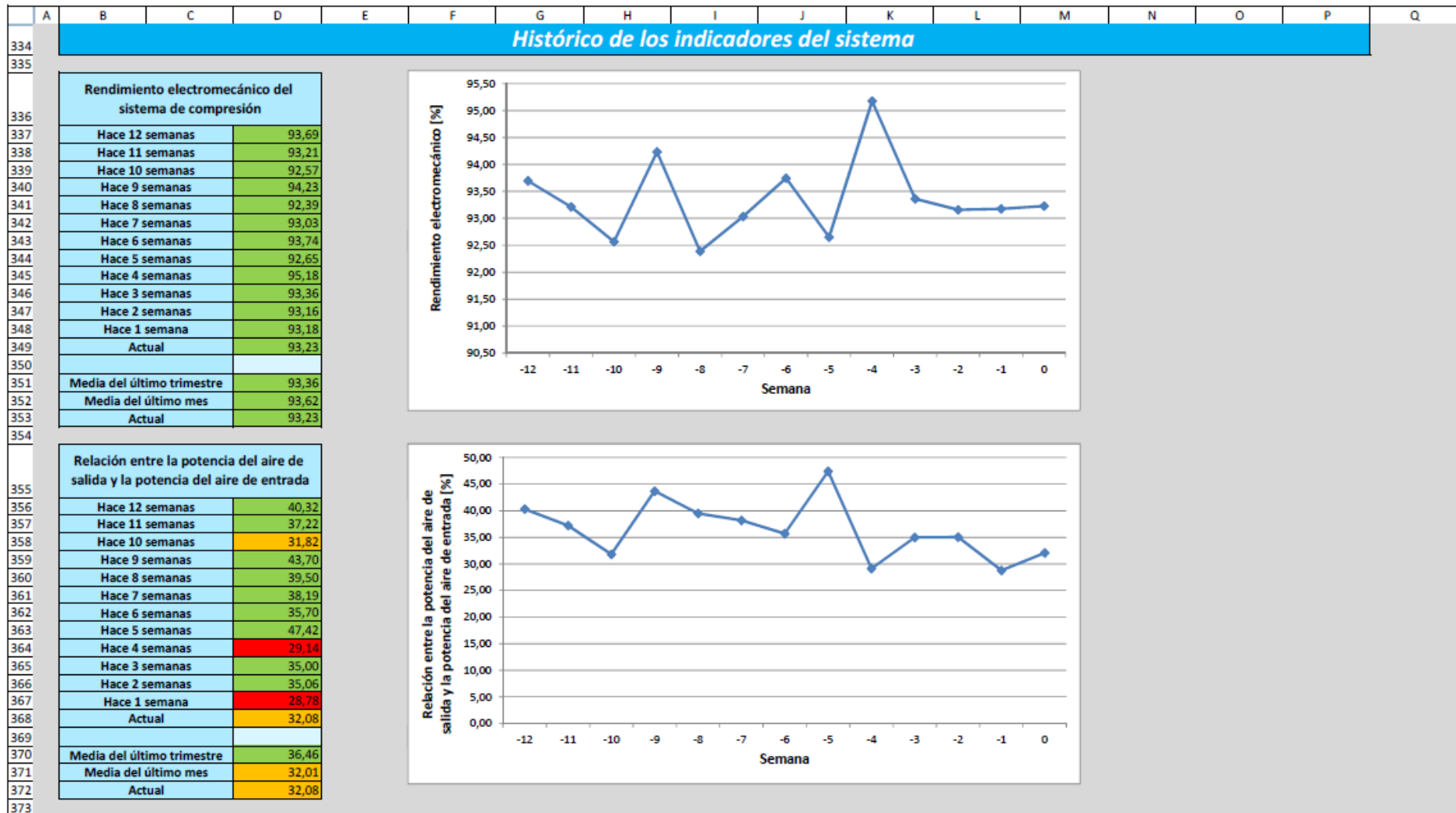


Figura 17.9. – Histórico semanal del último trimestre (continuación)

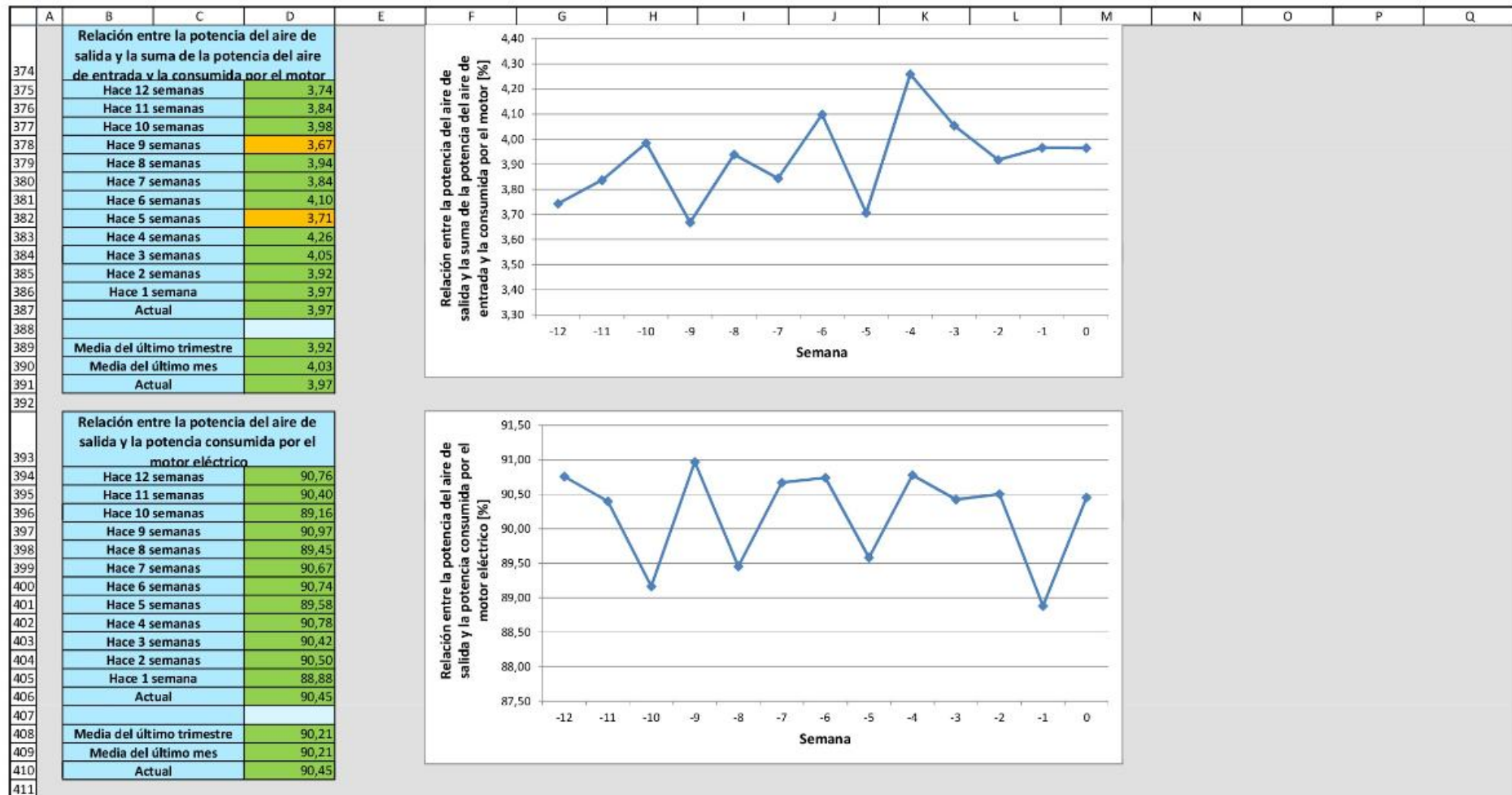


Figura 17.10. – Histórico semanal del último trimestre (continuación)

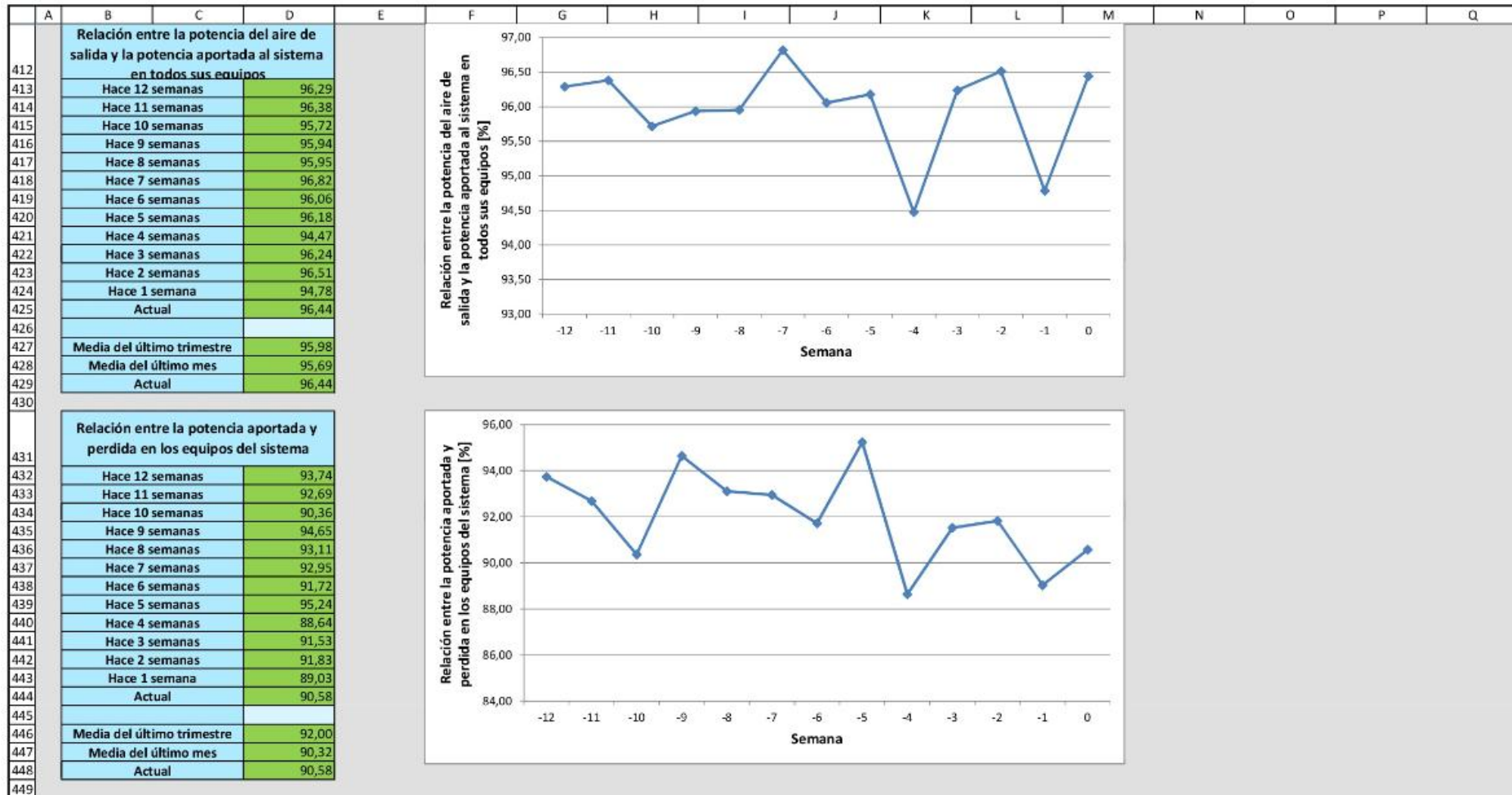


Figura 17.11. – Histórico semanal del último trimestre (continuación)

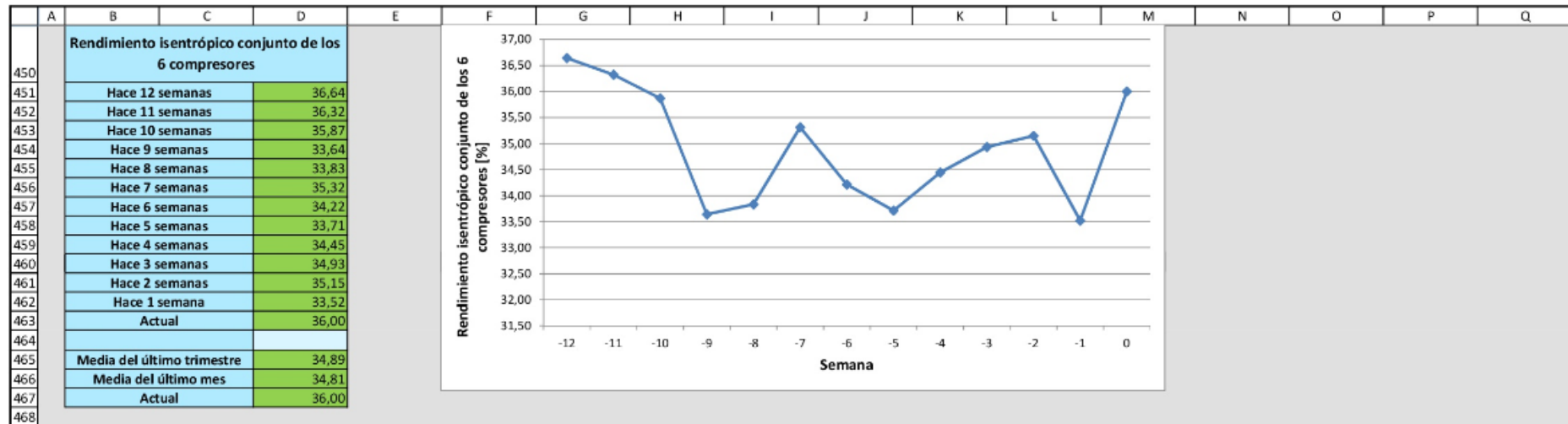


Figura 17.12. – Histórico semanal del último trimestre (continuación)



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÁREA DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER Nº 18010020

MANUAL DE INSTRUCCIONES

D. LLANOS VEGA, MARCOS

TUTOR: D. FERNÁNDEZ GARCÍA, FRANCISCO JAVIER
COTUTOR: D. GONZÁLEZ PELÁEZ, DANIEL

FECHA: JULIO 2017



ÍNDICE DEL MANUAL DE INSTRUCCIONES

Índice del manual de instrucciones.....	1
1.- Requisitos del sistema.....	2
2.- Requisitos del usuario.....	3
3.- Modo de utilización.....	4



1.- REQUISITOS DEL SISTEMA

Gracias a que la herramienta diseñada está escrita para funcionar dentro de un libro de Excel, los requisitos mínimos del sistema serán los necesarios para ejecutar Microsoft Excel, concretamente la versión 2010 que fue la utilizada durante el proyecto. Además será necesario que pueda ejecutar el software Historian. No obstante, al ser éste un complemento de Excel funcionará siempre que se cumplan los requisitos del anterior.

- Procesador de 32 o 64 bits a 500 MHz o superior.
- 256 MB de memoria RAM o más.
- 3.5 GB de espacio disponible en disco.
- Monitor con resolución 1024x768 o superior.
- Windows XP o superior

Dado que los datos de los sensores de todas las plantas de Praxair en España son una cuestión privada, no se puede acceder a ellos desde cualquier ordenador pese a contar con Excel e Historian correctamente instalados.

Para acceder a ellos será necesario conectarse desde alguno de los ordenadores de la red interna de Praxair. En caso de no ser así e intentar acceder a estos datos desde un ordenador que no pertenezca a la red de Praxair, la lectura de todos los sensores dará el error “#¿NOMBRE?”, por lo que el programa no funcionará.



2.- REQUISITOS DEL USUARIO

El usuario de esta herramienta no necesita unos requisitos especiales, ya que la hoja de Excel está programada de manera completamente automática, es decir, una vez se ejecute el programa, éste realizará todos los cálculos de manera autónoma y los representará adecuadamente. Así, el usuario simplemente tendrá que ejecutar el programa y ya podrá ver sus resultados.

No obstante, se recomienda que el usuario tenga unos conocimientos básicos de ingeniería, sobre todo de termodinámica, con el fin de que pueda comprender e interpretar correctamente todos los resultados generados por esta herramienta.



3.- MODO DE UTILIZACIÓN

Al estar escrito como una hoja de cálculo de Excel, este programa no necesita instalación, bastará con abrir el archivo tipo .xlxs que contiene la herramienta de análisis del sistema de compresión y purificación de aire.

Para iniciar la herramienta basta con hacer doble click en el archivo de Excel. Éste se abrirá como cualquier archivo de Excel normal. La única recomendación que se aconseja al usuario antes de empezar a trabajar con ella será la de poner el zoom de Excel al 90%, ya que fue el valor para el que fue diseñado el programa y permite ver todos los resultados del mismo a un tamaño adecuado pero sin tener que desplazarse a la derecha.

Una vez cargue aparecerá el índice de hojas que se muestra en la Figura 3.1. Gracias a los diferentes botones que posee el usuario puede moverse entre las diferentes hojas de usuario simplemente con hacer click en el correspondiente a la hoja buscada.



Figura 3.1. – Índice de hojas del programa

Dentro de la herramienta el usuario puede encontrarse con dos tipos de hojas de usuario, las correspondientes a los estados de funcionamiento del sistema, ya sea el actual o un periodo pasado y la correspondiente al histórico de medidas. Las demás hojas son las



que el programa necesita para llevar a cabo sus cálculos, como las de las tablas de propiedades del aire. No obstante, la herramienta está diseñada de tal forma que funciona de manera completamente automática, por lo que el usuario no tendrá que hacer nada más que ver los resultados que busque.

Las hojas de los estados de funcionamiento tendrán el aspecto que se muestra a continuación en la Figura 3.2. En ellas el encabezado también posee una serie de botones para moverse entre las principales hojas.

Justo debajo aparece la pantalla de resultados donde el usuario podrá ver las diferentes variables de funcionamiento de todos los equipos que pertenecen al sistema de compresión y purificación de aire, así como una serie de indicadores para comprobar el buen funcionamiento del sistema y el balance de energía global del mismo para localizar los puntos de mayores pérdidas.

La pantalla de resultados termina donde lo hacen las casillas sombreadas en gris. A partir de ahí es la parte de cada hoja utilizada para leer los datos de los sensores y realizar cada uno de los cálculos que la herramienta realiza para obtener los resultados mostrados, por lo que usuario no necesitará acceder a ellas directamente, ya que tendrá todos los resultados resumidos y ordenados en la primera parte de la hoja.



Figura 3.2. –Extracto de una hoja del estado de funcionamiento del sistema



Además, el programa cuenta con una hoja de estado de funcionamiento de un instante personalizado, donde el usuario podrá escoger el momento exacto en el que quiere que se efectúe el estudio. Para ello sólo tendrá que escribir la fecha y la hora (en forma de día/mes/año hora) en la casilla en blanco dispuesta para tal función como se puede apreciar en la Figura 3.3.



Figura 3.3. –Extracto de la hoja de estado de funcionamiento de un instante personalizado

Asimismo la herramienta cuenta con una hoja dedicada a los históricos del sistema donde el usuario podrá visualizar cuál ha sido la evolución de las principales variables del sistema a lo largo del último trimestre con valores semanales para cada una de ellas. En la Figura 3.4 se muestra el comienzo de la hoja del histórico del último trimestre.



Figura 3.4. – Extracto del histórico semanal del último trimestre



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÁREA DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER Nº 18010020

PLANOS

D. LLANOS VEGA, MARCOS

TUTOR: D. FERNÁNDEZ GARCÍA, FRANCISCO JAVIER
COTUTOR: D. GONZÁLEZ PELÁEZ, DANIEL

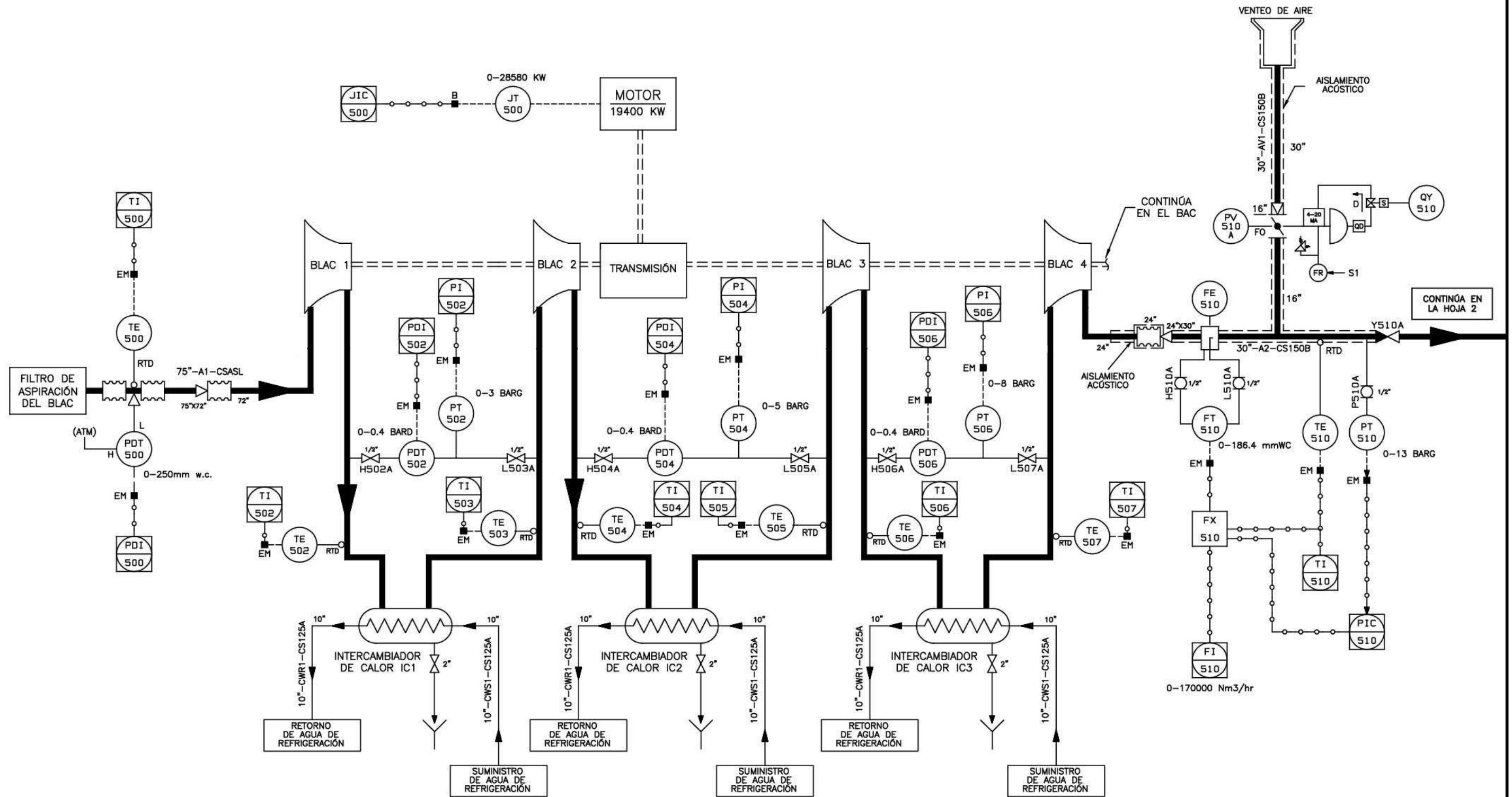
FECHA: JULIO 2017




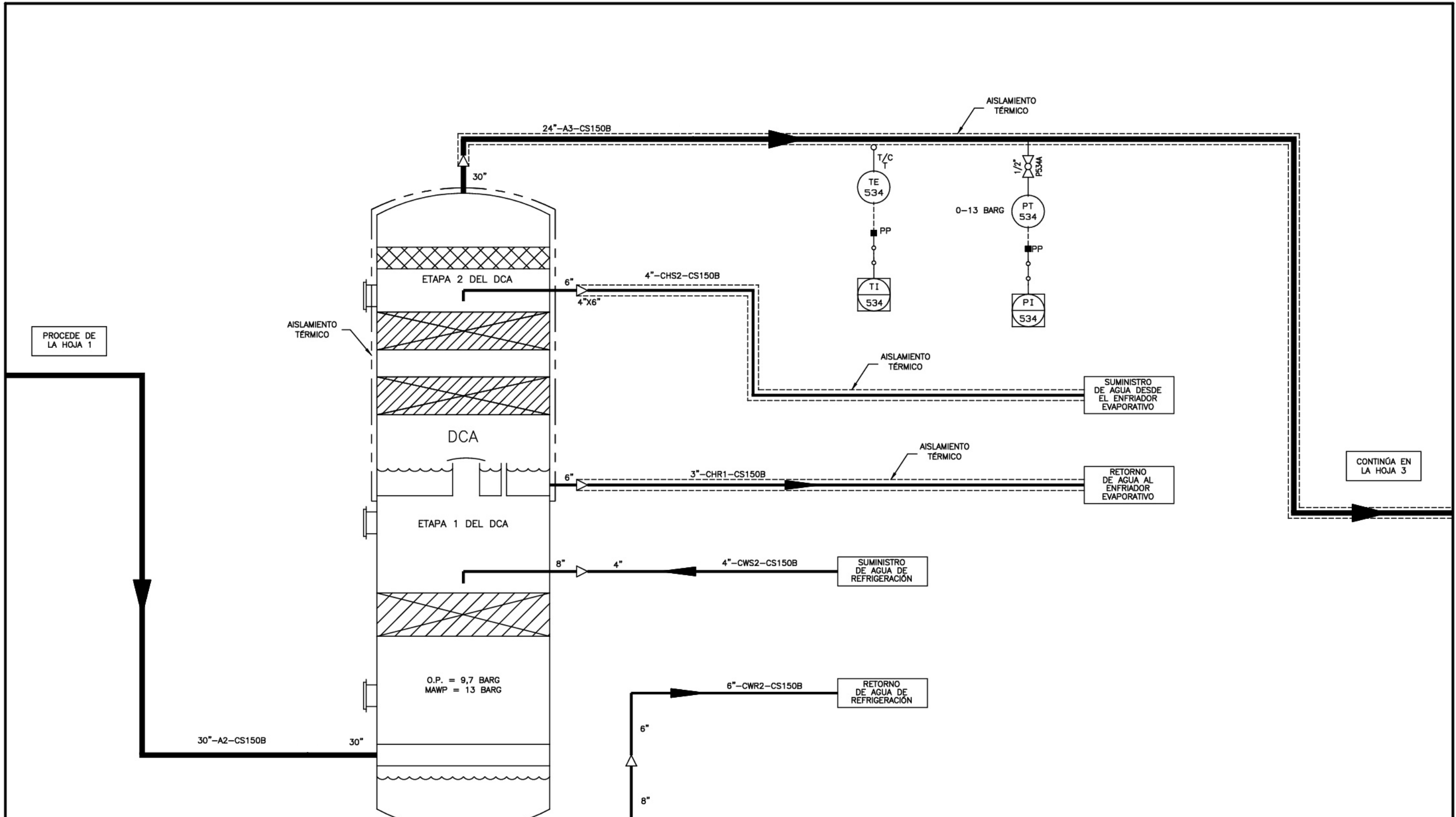
ÍNDICE DE PLANOS

Sistema de compresión y purificación de aire de Gijón III.....Plano 100.00

Filtro de aire y BLAC	Hoja 1
DCA	Hoja 2
Prepurificadores	Hoja 3
Filtro de polvo y desvío de aire a baja presión	Hoja 4
BAC	Hoja 5




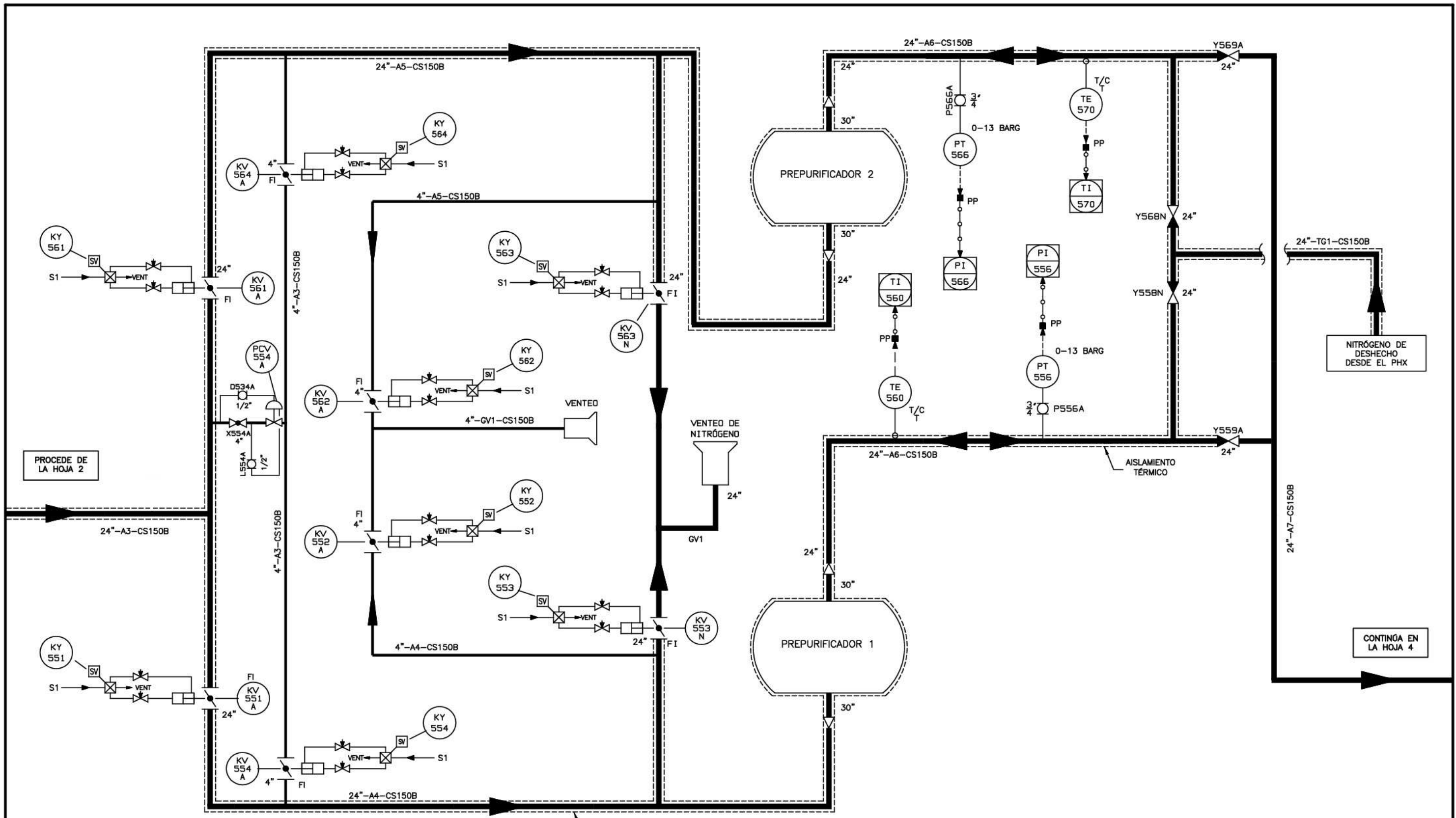
Proyecto Diseño de una herramienta para evaluar la eficiencia energética de un sistema de compresión		 Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón UNIVERSIDAD DE OVIEDO
Creado por Marcos Llanos Vega	Fecha de edición 26/6/2017	
Aprobado por Marcos Llanos Vega	Tipo de documento P&ID	
Escala SE	Título del plano Sistema de compresión y purificación de aire de Gijón III	Identificación del plano 100.00
	Título de la hoja Filtro de aire principal y BLAC	Número de página Hoja 1 de 5




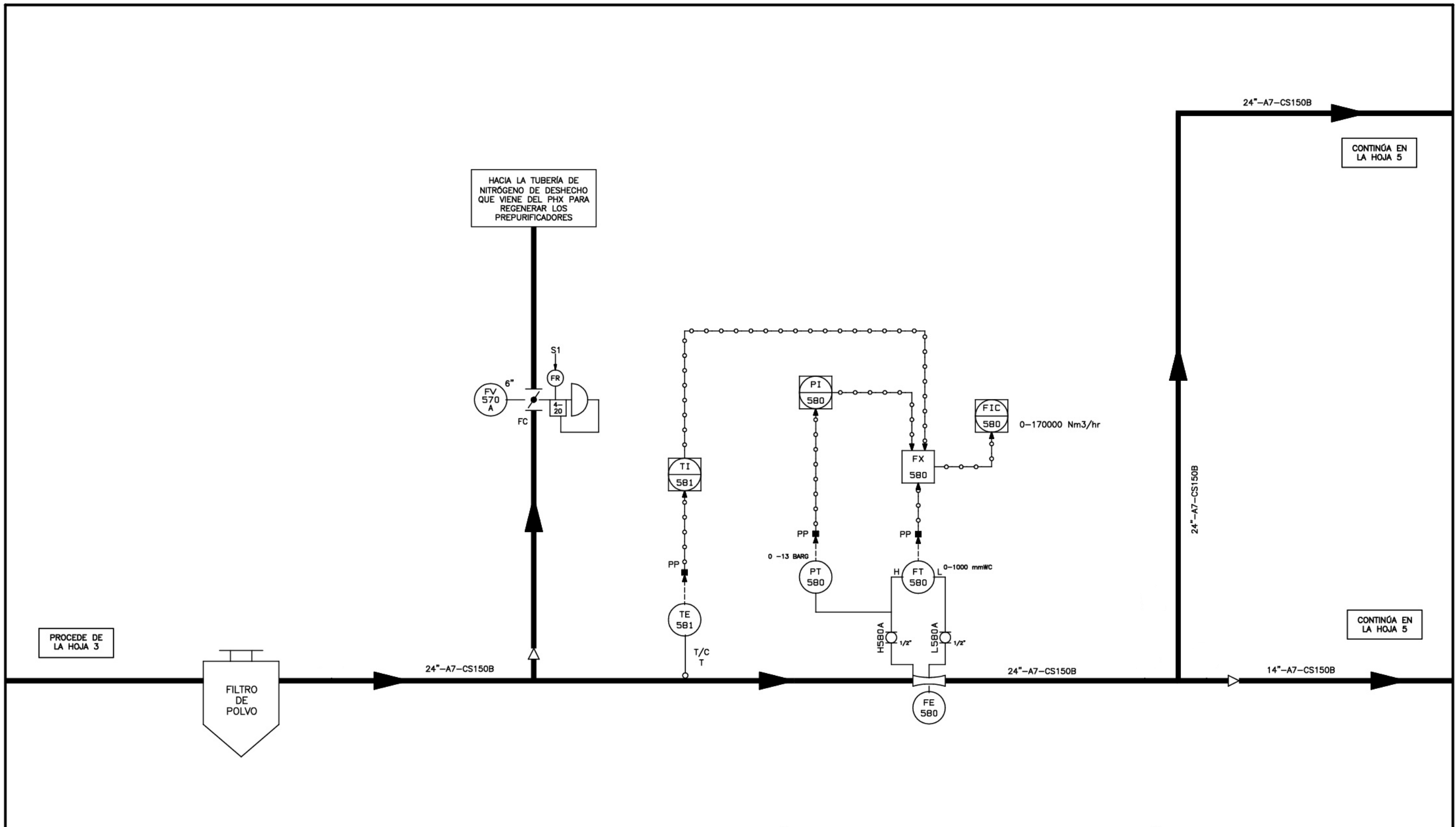
PROCEDE DE LA HOJA 1

CONTINGA EN LA HOJA 3

Proyecto Diseño de una herramienta para evaluar la eficiencia energética de un sistema de compresión		 Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón UNIVERSIDAD DE OVIEDO
Creado por Marcos Llanos Vega	Fecha de edición 26/6/2017	
Aprobado por Marcos Llanos Vega	Tipo de documento P&ID	
Escala SE	Título del plano Sistema de compresión y purificación de aire de Gijón III	Identificación del plano 100.00
	Título de la hoja DCA	Número de página Hoja 2 de 5



Proyecto Diseño de una herramienta para evaluar la eficiencia energética de un sistema de compresión		 Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón UNIVERSIDAD DE OVIEDO
Creado por Marcos Llanos Vega	Fecha de edición 26/6/2017	
Aprobado por Marcos Llanos Vega	Tipo de documento P&ID	
Escala SE	Título del plano Sistema de compresión y purificación de aire de Gijón III	Identificación del plano 100.00
	Título de la hoja Prepurificadores	Número de página Hoja 3 de 5




PROCEDE DE LA HOJA 3

HACIA LA TUBERÍA DE NITRÓGENO DE DESHECHO QUE VIENE DEL PHX PARA REGENERAR LOS PREPURIFICADORES

CONTINÚA EN LA HOJA 5

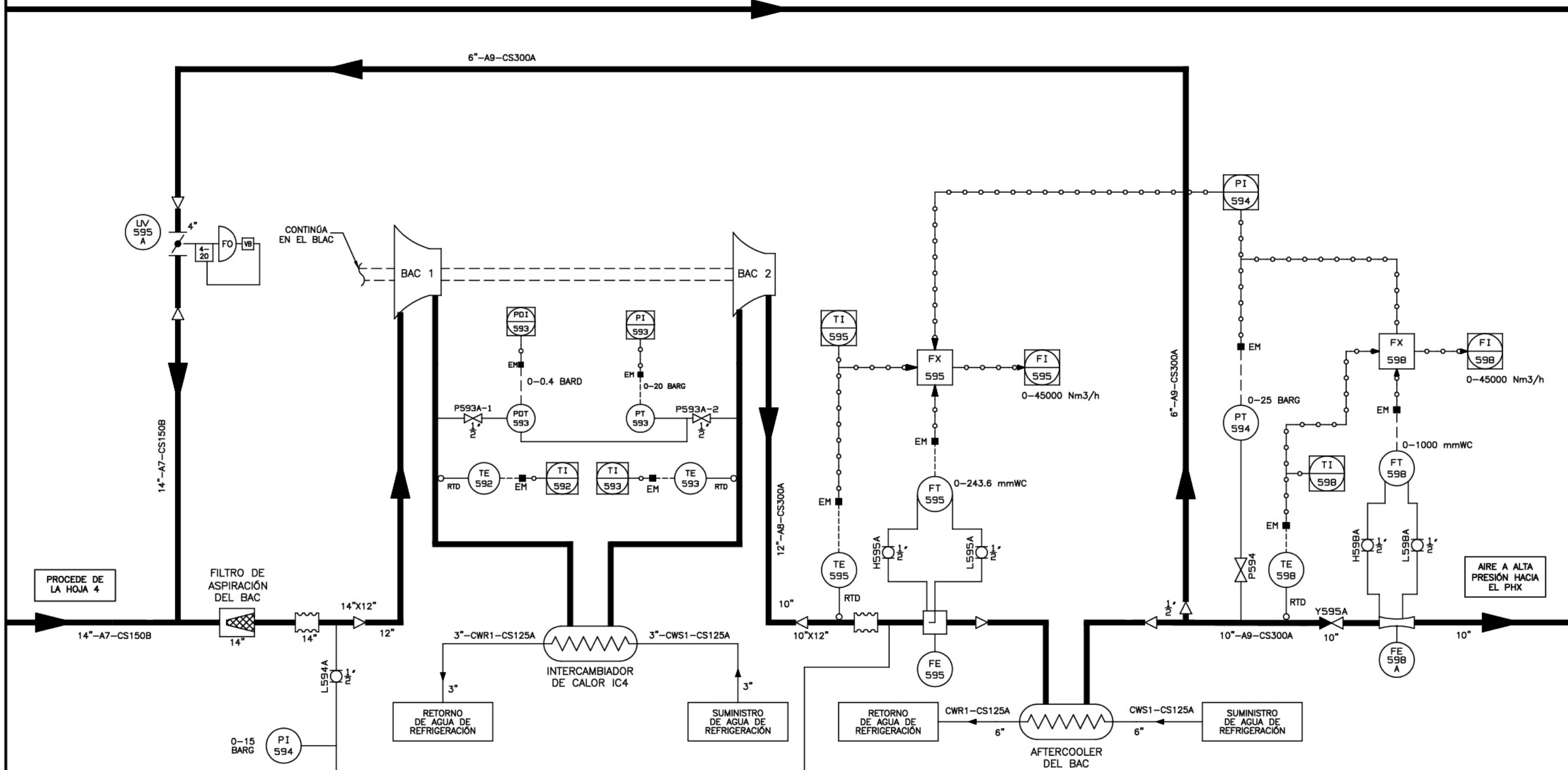
CONTINÚA EN LA HOJA 5

Proyecto Diseño de una herramienta para evaluar la eficiencia energética de un sistema de compresión		 Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón UNIVERSIDAD DE OVIEDO
Creado por Marcos Llanos Vega	Fecha de edición 26/6/2017	
Aprobado por Marcos Llanos Vega	Tipo de documento P&ID	
Escala SE	Título del plano Sistema de compresión y purificación de aire de Gijón III	Identificación del plano 100.00
	Título de la hoja Filtro de polvo y desvío de aire a baja presión	Número de página Hoja 4 de 5

PROCEDE DE LA HOJA 4

24"-A7-CS150B

AIRE A BAJA PRESIÓN HACIA EL PHX



PROCEDE DE LA HOJA 4

AIRE A ALTA PRESIÓN HACIA EL PHX

Proyecto
 Diseño de una herramienta para evaluar la eficiencia energética de un sistema de compresión

Creado por
 Marcos Llanos Vega

Fecha de edición
 26/6/2017

Aprobado por
 Marcos Llanos Vega

Tipo de documento
 P&ID



Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón
 UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Escala
 SE

Título del plano
 Sistema de compresión y purificación de aire de Gijón III

Identificación del plano
 100.00

Título de la hoja
 BAC

Número de página
 Hoja 5 de 5



Universidad de
Oviedo



ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

ÁREA DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

TRABAJO FIN DE MÁSTER Nº 18010020

PRESUPUESTO DEL PROYECTO

D. LLANOS VEGA, MARCOS

TUTOR: D. FERNÁNDEZ GARCÍA, FRANCISCO JAVIER
COTUTOR: D. GONZÁLEZ PELÁEZ, DANIEL

FECHA: JULIO 2017



ÍNDICE DEL PRESUPUESTO

1.- Mediciones	2
2.- Coste unitario de los recursos	4
3.- Presupuesto.....	5



1.- MEDICIONES

En este apartado se muestra el tiempo total empleado en la realización de este proyecto. Se divide en cuatro grupos en función de los cuatro bloques del apartado 1.5 de la memoria dedicado a la metodología del proyecto.

El primer grupo lo forma la parte de investigación. Éste aglutina el tiempo dedicado a la búsqueda de información relacionada con el proceso de separación de aire y lectura de la misma, así como la consulta de manuales y planos de la instalación.

El segundo lo forma la parte referida al estudio pormenorizado del sistema de compresión y purificación de aire de la instalación

El tercero lo forma la parte dedicada a la programación de la herramienta, desde sus primeros pasos elaborando las tablas de propiedades del aire hasta la generación final de los resultados.

El último lo forma la parte dedicada a las diferentes pruebas que se hicieron al programa una vez terminado, así como las correcciones y mejoras que se le hicieron en este momento. Además en este grupo también se incluye la preparación de la documentación ya que ésta fue hecha de manera simultánea.

En la Tabla 1.1 puede verse el desglose del tiempo empleado en cada parte del proyecto.



Descripción del concepto	Tiempo empleado [horas]
Bloque I: Aprendizaje y familiarización con el proceso de separación de aire	
Búsqueda de información referente al proceso de separación de aire y lectura de la misma	50
Bloque II: Análisis teórico del funcionamiento del sistema de compresión y purificación de aire	
Profundización en los detalles del sistema de compresión y purificación de aire	40
Análisis teórico de los cálculos a implementar en el programa	60
Bloque III: Desarrollo del programa informático que monitorice el sistema	
Elaboración de las tablas de propiedades termodinámicas del aire	90
Programación de la herramienta	320
Bloque IV: Comprobación del correcto funcionamiento de la herramienta diseñada y optimización de la misma	
Pruebas de funcionamiento, correcciones y optimización de la herramienta	50
Realización de la documentación	160
Tiempo total empleado	770

Tabla 1.1. – Desglose del tiempo empleado en el proyecto



2.- COSTE UNITARIO DE LOS RECURSOS

Lo primero a tener en cuenta dentro de los costes unitarios ha sido el coste horario del autor que se ha determinado, basándose en el coste horario medio de un ingeniero, con un valor de 27 €/hora.

Para el software utilizado se ha tenido en cuenta el precio de las licencias anuales ya que el trabajo no excedió de ese periodo de tiempo. En el caso de aquellos conceptos que no disponían de este tipo de venta, se les aplicó la correspondiente relación en función de los años de vida útil del mismo, para obtener su precio anual.

En la Tabla 2.1 se recogen los precios unitarios de los conceptos incluidos en el presupuesto.

Concepto	Coste unitario [€]	Años de vida útil	Coste unitario aplicable [€]
Recursos humanos			
Ingeniero			27,00
Licencias de software			
Microsoft Office (licencia anual Office 365)	99,00	1	99,00
AutoCAD (licencia anual)	1470,00	1	1470,00
Historian	120,00	10	12,00
Otros costes			
Equipo informático	700,00	7	100,00

Tabla 2.1. – Coste unitario de los diferentes conceptos recogidos en el presupuesto



3.- PRESUPUESTO

Para finalizar se recoge en la Tabla 3.1 el presupuesto general del proyecto.

Concepto	Precio unitario [€/ud]	Cantidad [ud]	Coste total [€]
Recursos humanos			
Búsqueda de información referente al proceso de separación de aire y lectura de la misma	27,00	50	1350,00
Profundización en los detalles del sistema de compresión y purificación de aire	27,00	40	1080,00
Análisis teórico de los cálculos a implementar en el programa	27,00	60	1620,00
Elaboración de las tablas de propiedades termodinámicas del aire	27,00	90	2430,00
Programación de la herramienta	27,00	320	8640,00
Pruebas de funcionamiento, correcciones y optimización de la herramienta	27,00	50	1350,00
Realización de la documentación	27,00	160	4320,00
Licencias de software			
Microsoft Office (licencia anual Office 365)	99,00	1	99,00
AutoCAD (licencia anual)	1470,00	1	1470,00
Historian	12,00	1	12,00
Otros costes			
Equipo informático	100,00	1	100,00
Suma de costes			22471,00
Beneficio industrial (6%)			1348,26
Gastos generales (13%)			2921,23
Coste sin IVA			26740,49
IVA (21%)			5615,50
PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO			32.355,99 €

Tabla 3.1. – Presupuesto general del proyecto