



Universidad de  
Oviedo



# **ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN**

## **MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

### **ÁREA DE CIENCIA DE LOS MATERIALES E INGENIERÍA METALÚRGICA**

#### **TRABAJO FIN DE MÁSTER - MEMORIA**

#### **DISEÑO Y FABRICACIÓN DE EQUIPOS PORTÁTILES PARA TRATAMIENTO DE SUPERFICIES POR CHORREADO ABRASIVO MANUAL A BAJA PRESIÓN**

**D. MÍLLARA CRISPÍN, Miguel**  
**TUTORA: DÑA. FERNÁNDEZ PARIENTE, Inés**

**FECHA: Mayo de 2020**



# RESUMEN

En este trabajo se ha desarrollado el diseño y la fabricación de equipos portátiles de chorreado abrasivo a baja presión. Es un proyecto planteado por la empresa Couto Maquinaria durante la estancia de prácticas, con el fin de incorporar estos equipos a su marca Racohi.

El proceso de chorreado se basa en la proyección de material abrasivo en aire para tratar superficies, tanto nuevas como a restaurar. Su uso está ampliamente extendido para limpieza de corrosión y suciedad, así como para dotar de perfil de rugosidad que facilite tratamientos posteriores, por ejemplo, de pintura. El chorreado a baja presión está enfocado principalmente a limpieza superficial de piezas frágiles o de pequeños espesores, así como rehabilitación de fachada de edificios, cuya integridad podría verse dañada si se trabajase a presión estándar.

La fase de diseño de los equipos se divide en dos. Primero, la selección de elementos conformantes de la máquina para que ésta funcione en los rangos de trabajo establecidos en cuanto a presión, como pueden ser: válvula dosificadora de abrasivo, válvula auto air, válvula de descompresión o vibrador neumático. Se describen su funcionamiento y los procesos de presurización y despresurización. La segunda parte consiste en el diseño gráfico del equipo de chorro abrasivo a baja presión mediante la modelización paramétrica en 3D en Autodesk Inventor, con la finalidad de incluir el despiece en manuales de uso y mantenimiento. La fabricación de estos equipos se realizará a demanda y cumpliendo los estrictos estándares de calidad establecidos en Couto Maquinaria.

Además, se ha estudiado en profundidad el funcionamiento de los equipos de chorro abrasivo, especialmente en los rangos de trabajo de baja presión. Para ello se desarrolla una herramienta de cálculo de ahorros mediante hojas de cálculo (Excel), que permite comparar diferentes situaciones entre equipos estándar y baja presión. Su finalidad es evaluar los posibles ahorros para cada caso. En los mismos casos estudiados, se plantean los gastos acumulados a lo largo del tiempo con la finalidad de evaluar la viabilidad de los equipos de baja presión con respecto a los de presión estándar. Teniendo en cuenta que las aplicaciones para estos equipos son distintas, si el rango de trabajo en el que se encuentra la aplicación a realizar está en la de baja presión, siempre que se utilicen equipos de baja tendrá ahorros en comparación con emplear de presión estándar.



# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>Resumen .....</b>	<b>1</b>
<b>1.- Introducción .....</b>	<b>7</b>
1.1.- Contexto empresarial .....	7
1.2.- Contexto de desarrollo y justificación .....	8
1.3.- Objetivos y motivación .....	9
<b>2.- Diseño de equipo de chorreado de baja presión.....</b>	<b>10</b>
2.1.- Descripción general del funcionamiento .....	10
2.2.- Elementos constructivos .....	12
2.2.1.- Elementos principales de diseño .....	12
2.2.2.- Elementos secundarios de diseño.....	23
2.2.3.- Elementos de funcionamiento.....	24
2.3.- Diseño definitivo.....	27
2.4.- Funcionamiento .....	29
2.4.1.- Equipo despresurizado .....	29
2.4.2.- Equipo presurizado .....	29
<b>3.- Características de equipo de chorreado.....</b>	<b>31</b>
3.1.- Rangos de trabajo.....	31
3.1.1.- Equipos de chorro de presión estándar .....	32
3.1.2.- Equipos de chorro de baja presión .....	32
3.2.- Procedimiento de análisis .....	32
3.3.- Resultados del análisis .....	34
3.3.1.- Consumo de aire.....	34
3.3.2.- Potencia del compresor .....	36
3.3.3.- Consumo de abrasivo .....	38
3.4.- Rendimiento del equipo .....	39
<b>4.- Fabricación de equipo de chorreado de baja presión.....</b>	<b>41</b>
4.1.- Certificaciones .....	41
<b>5.- Comparativa entre equipos de chorreado estándar y de baja presión .....</b>	<b>43</b>
5.1.- Herramienta de cálculo .....	43
5.1.1.- Consumos.....	44



---

5.1.2.- Compra.....	47
5.1.3.- Vida útil.....	49
5.2.- Estudio paramétrico .....	49
5.2.1.- Resultados .....	50
5.2.2.- Estudio de viabilidad.....	54
5.2.3.- Casos 1-4.....	55
5.2.4.- Casos 2-5.....	56
5.2.5.- Casos 3-6.....	57
5.2.6.- Casos 7, 8 y 9 .....	58
<b>6.- Conclusiones y líneas futuras.....</b>	<b>60</b>
6.1.- Líneas futuras.....	60
<b>7.- Referencias .....</b>	<b>62</b>



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 - Logotipo Couto Maquinaria.....	8
Figura 1-2 - Logo Racohi.....	9
Figura 2-1 - Operario y equipo de chorro estándar [2] .....	11
Figura 2-2 - Vista frontal y lateral del equipo de chorreado de baja presión.....	13
Figura 2-3 - Detalle superior del depósito.....	14
Figura 2-4 - Sistema de válvula pop-up .....	15
Figura 2-5 - Vibrador neumático NCT 3.....	15
Figura 2-6 - Selección de vibrador neumático .....	17
Figura 2-7 - Válvula manual de aire .....	18
Figura 2-8 - Válvula neumática 3/2 .....	19
Figura 2-9 - Válvula de descompresión [16] .....	20
Figura 2-10 - Válvula auto air .....	21
Figura 2-11 - Válvula Thompson II .....	22
Figura 2-12 - Sistema gatillo hombre muerto .....	23
Figura 2-13 - Manguera de chorro .....	25
Figura 2-14 - Boquillas Racohi [24] .....	26
Figura 2-15 - Vista general equipo de chorreado de baja presión.....	27
Figura 2-16 - Despiece sin anotaciones .....	28
Figura 3-1 - Ejemplo de estimación de datos característicos.....	33
Figura 3-2 - Ejemplo de obtención de coeficientes para la potencia .....	34
Figura 3-3 - Consumo teórico de aire .....	35
Figura 3-4 - Consumo real de aire.....	36
Figura 3-5 - Potencia teórica de compresor .....	37
Figura 3-6 - Potencia real de compresor .....	38
Figura 3-7 - Consumo de abrasivo .....	39
Figura 3-8 - Rendimiento aproximado a 8 bar en función del nivel de limpieza.....	40
Figura 5-1 - Entorno gráfico de calculadora .....	44
Figura 5-2 - Ahorro en energía por jornada .....	51
Figura 5-3 - Ahorro en abrasivo por jornada .....	52



---

Figura 5-4 - Ahorros en manguera y boquilla .....	52
Figura 5-5 - Ahorro en compra de compresor.....	53
Figura 5-6 - Ahorros expresados porcentualmente .....	54
Figura 5-7 - Viabilidad caso 1 .....	55
Figura 5-8 - Viabilidad caso 4.....	56
Figura 5-9 - Viabilidad caso 2.....	56
Figura 5-10 - Viabilidad caso 5.....	57
Figura 5-11 - Viabilidad caso 3.....	57
Figura 5-12 - Viabilidad caso 6.....	58
Figura 5-13 - Viabilidad caso 7.....	58
Figura 5-14 - Viabilidad caso 8.....	59
Figura 5-15 - Viabilidad caso 9.....	59



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 - Partes de un equipo de chorreado de baja presión (Figura 2-2) .....	13
Tabla 5-1 - Precio medio de abrasivos .....	46
Tabla 5-2 - Precio manguera de chorro extra-premium Racohi.....	47
Tabla 5-3 - Precio boquillas Racohi.....	48
Tabla 5-4 - Precio de compresores en función de su potencia.....	48
Tabla 5-5 - Resumen de casos estudiados.....	50



# 1.- INTRODUCCIÓN

En el presente Trabajo Fin de Máster se expone el desarrollo del diseño y fabricación de equipos portátiles para tratamiento de superficies por chorreado abrasivo manual a baja presión. Este trabajo se ha realizado en colaboración con la empresa Couto Maquinaria, S.L. durante la estancia de prácticas extracurriculares.

Las máquinas portátiles de chorreado abrasivo son equipos ampliamente empleados en el tratamiento superficial en diferentes sectores. Algunas aplicaciones son la preparación de superficies metálicas nuevas o el tratamiento y limpieza de las ya usadas para posteriores procesos en industrias como la naval o eólica, así como la limpieza y restauración de fachadas. De forma genérica, los equipos de chorreado son sistemas neumáticos que basan su principio de funcionamiento en la proyección de material abrasivo mezclado con aire a presión con la finalidad de generar un perfil de rugosidad o limpiar la superficie. Para ello es necesario asegurar el suministro de aire mediante un compresor, con su correspondiente consumo energético. Los equipos de baja presión presentan claras ventajas con respecto a los equipos estándar en cuanto a reducción de consumo energético y de abrasivo. Así mismo, un menor consumo de abrasivo repercute en nubes de polvo más pequeñas algo especialmente deseado para asegurar menor impacto medioambiental. Es importante destacar que mientras los equipos de presión estándar fundamentalmente se emplean para obtener perfil de rugosidad, los equipos de chorreado de baja presión tienen el objetivo de limpiar superficies más débiles que se verían dañadas si se trabajase a presiones estándar.

El desarrollo del trabajo se estructura en los siguientes ítems: diseño inicial de los elementos que conforman la máquina, desde su cálculo hasta su dibujo en la herramienta Inventor de Autodesk, fabricación en taller y pintado, funcionamiento del equipo y comparativa con respecto a máquinas de presión estándar.

## 1.1.- Contexto empresarial

Couto Maquinaria [1] es una empresa fundada en el año 2001 por Rafael Couto cuyo sector de trabajo es el tratamiento superficial. Se sitúa en el Polígono Industrial Mora Garay de Gijón, Asturias. Se trata de una pequeña empresa familiar que ya ha dado trabajo a dos generaciones, teniendo en la actualidad alrededor de 10 trabajadores.

Como se ha comentado, la empresa cuyo logotipo se muestra en la Figura 1-1, enmarca su actividad en el ámbito del tratamiento de superficies. Son proveedores tanto de equipos y productos de diseño y fabricación propia, bajo la marca Racohi, como de productos fabricados por otras marcas. Sus cinco líneas fundamentales de trabajo son las siguientes: máquinas de chorreado abrasivo, equipos de aplicación de pintura, elementos de protección personal, inspección final de la superficie y abrasivos. Así mismo, las principales industrias con las que trabaja son el naval, la energía eólica, el oil&gas, el metal, la petroquímica y la construcción.



Figura 1-1 - Logotipo Couto Maquinaria

La empresa comercializa varios tipos de equipos de chorreado abrasivo. Por una parte, los equipos portátiles, de los cuales se diseñan y fabrican series de equipos en función de las necesidades del cliente en cuanto a tamaño del tanque, sistema de válvula dosificadora de abrasivo u otras especificaciones concretas. También existen accesorios de chorro húmedo con la finalidad de disminuir emisiones de polvo, waterblasting y chorro de interior de tuberías. Por otra parte, dentro de los equipos de chorro, a nivel industrial se encuentran cabinas de chorro, colectores de polvo, deshumidificadores y equipos de aspiración.

En el marco de la empresa, el proyecto desarrollado en este TFM se contextualiza dentro de una nueva serie de equipos de chorro portátil que permiten trabajar a presiones inferiores a las habituales. Esto no solamente permite aumentar la oferta de máquinas propias, también facilita la entrada de Couto Maquinaria en nuevas industrias de trabajo como puede ser la restauración de objetos, la limpieza y rehabilitación de fachadas y otras superficies débiles que se verían dañadas si se trabajasen a mayor presión.

## 1.2.- Contexto de desarrollo y justificación

El desarrollo de un proyecto como el que se presenta en este TFM supone la culminación de los estudios del Máster en Ingeniería Industrial de la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón. El trabajo plasmado en este documento se ha realizado durante el periodo de prácticas curriculares y extracurriculares en la empresa Couto Maquinaria.

El trabajo ha consistido en la modelización gráfica de equipos industriales utilizando para ello la herramienta de diseño Autodesk Inventor. Para ello se han seleccionado elementos constituyentes de un equipo industrial neumático y se han realizado estudios paramétricos de diferentes casos comparando equipos de presión estándar y baja y planteamiento de viabilidad de equipos de baja presión en comparación con los estándares. El autoaprendizaje y la capacidad de resolver problemas nuevos ha sido fundamental en el trabajo ya que la neumática y el sector de acabado de superficies no son temas ampliamente tratados durante los estudios de Máster.

Lo expuesto con anterioridad puede encajar en la labor de un ingeniero industrial en el puesto de oficina técnica. Es decir, la realización de este trabajo no solamente permite un desarrollo desde el punto de vista académico, sino que también se justifica en la entrada al mundo laboral y en la introducción a las tareas habituales de un ingeniero en la empresa.



## 1.3.- Objetivos y motivación

Para poder desarrollar y comercializar de forma efectiva una nueva serie de equipos de chorro abrasivo manual de baja presión es necesario realizar una serie de pasos.

Por una parte, la realización del diseño del equipo desde la selección de sus elementos constructivos hasta el modelado 3D. El diseño gráfico permite la realización de despieces del equipo, los cuales mejoran el servicio de atención postventa al poder incluirse en manuales y documentación sobre montaje y mantenimiento.

Por otra parte, el desarrollo de un estudio comparativo con máquinas de presión estándar. Aunque las labores a realizar con los equipos de baja presión son distintas, es necesario una comparación que permita evaluar las bondades existentes. Las máquinas de baja presión son relativamente desconocidas y el estudio permite una mejor introducción de estas en el mercado.

Couto Maquinaria comercializa equipos de diseño y fabricación propia bajo la marca Racohi cuyo logotipo puede verse en la Figura 1-2. La estrategia de mercado que lleva un tiempo desarrollando la empresa es la de diseñar y fabricar todos los productos posibles de su propia marca, así como reacondicionar y adaptar a las necesidades del cliente otros productos de marcas externas. La motivación fundamental de la empresa para el desarrollo del proyecto no es otra que la de avanzar en la dirección de ampliar el catálogo de equipos de diseño y fabricación propia ofertados, ya que todavía no poseen en el mismo máquinas de chorreado abrasivo de baja presión. La conciencia medioambiental es otra de las motivaciones de la empresa para escoger este tipo de equipo, ya que como se ha comentado previamente a lo largo del capítulo, las máquinas de baja presión consumen menos energía y emiten menos polvo de abrasivo que las de presión estándar.



Figura 1-2 - Logo Racohi



## 2.- DISEÑO DE EQUIPO DE CHORREADO DE BAJA PRESIÓN

En el presente capítulo se expone la etapa de diseño del equipo de chorro abrasivo manual de baja presión. Ésta contempla dos procesos fundamentales: la selección de qué equipos son necesarios para el funcionamiento de la máquina y su posterior modelado en 3D con la herramienta de dibujo Autodesk Inventor.

En cuanto a la selección de elementos constructivos, el método de trabajo se basa en un estudio preliminar de los equipos de chorro abrasivo, tanto los de presión estándar de Racohi [2], como los de baja presión de otras marcas, como por ejemplo Clemco [3], Gritco [4], Vespa Sabbiatrici [5] o Krimetal [6]. Couto Maquinaria ha comercializado en alguna ocasión con estas máquinas y las lecciones aprendidas del equipo de servicio de atención técnica han sido fundamentales a la hora de desarrollar el proyecto.

Para el diseño gráfico se ha empleado Autodesk Inventor. Se trata de una herramienta que permite realizar en tres dimensiones modelados paramétricos de sólidos y con la que Couto Maquinaria viene trabajando a lo largo del tiempo para la realización de despieces. El procedimiento de trabajo seguido en esta herramienta es el siguiente:

- I. Medición de parámetros dimensionales del producto, ya sea mediante calibre en taller o a partir de documentación técnica facilitada por fabricantes.
- II. Dibujo de piezas que conforman el producto en Autodesk Inventor.
- III. Ensamblaje de piezas y/o subensamblajes en Autodesk Inventor. El producto queda definido.
- IV. Presentación en Autodesk Inventor, permite obtener explosiones del despiece del producto, tanto en imagen como en video.
- V. Despiece y vistas en Autodesk Inventor que definan el producto. Obtención de documentación técnica con anotaciones sobre cada elemento que conforma el producto.

### 2.1.- Descripción general del funcionamiento

Con la intención de facilitar la comprensión del diseño de la máquina, a continuación, se expone de forma generalizada el funcionamiento de la misma. Una explicación más detallada se puede consultar en el punto 2.4.-Funcionamiento.

El chorreado abrasivo consiste en la proyección de material granulado abrasivo a gran velocidad en suspensión de aire. Para eso, el aire que lo proyecta debe estar sometido a una presión superior a la atmosférica y por tanto el equipo debe ser provisto de un compresor. Mediante el accionamiento de diversas válvulas este aire presuriza la máquina con el cierre del depósito que contiene el material abrasivo. Una vez presurizado el equipo el aire arrastra parte del abrasivo a través de la manguera de chorro y es proyectado mediante una boquilla.



El accionamiento que permite la presurización y despresurización es realizado mediante el operario con el gatillo hombre muerto situado sobre la manguera de chorro y antes del portaboquillas y la boquilla.

En la Figura 2-1 se expone la imagen de un operario y una máquina de chorro abrasivo manual de presión estándar de la marca Racohi. En ella, se pueden diferenciar los principales elementos constituyentes del equipo: circuitos neumáticos rígidos y flexibles, así como algunas de las válvulas y el depósito. Además, se puede observar la manguera de chorro que es sostenida por el operario y que culmina en el sistema gatillo hombre muerto, portaboquillas y boquilla. Por otra parte, es imprescindible la asistencia mediante manguera atóxica de aire comprimido filtrado apto para la respiración en el casco protector del operario. Tanto el casco como el filtro se pueden apreciar en la figura comentada. No son objeto de estudio de este proyecto, pero debido a que su necesidad sí afecta al diseño del equipo sus efectos se exponen en el punto 2.2.3.4.-Respiración y protecciones.



Figura 2-1 - Operario y equipo de chorro estándar [2]

Esta descripción generalizada del funcionamiento es válida tanto para equipos de baja presión como de presión estándar, así como para los diferentes tamaños de máquinas posible. En equipos de presión estándar la serie ofertada por Couto Maquinaria [2] va desde equipos con volumen de depósito de 20 l hasta 300 l. Aunque el proyecto expuesto en este TFM se realiza para un depósito de 60 l, también se comercializarán equipos de baja presión en diferentes tamaños de tanque.

Las prestaciones en cuanto a consumo de aire y abrasivo vienen exclusivamente determinadas por el tamaño de la boquilla y la presión de trabajo empleada, estas características serán explicadas en el capítulo 3.-Características de equipo de chorreado. Por tanto, dos equipos de la misma serie trabajando en las mismas condiciones con diferentes tanques se distinguen en el número de veces que será necesario rellenar el depósito de material abrasivo. Los equipos de tamaño inferior requerirán más llenados por jornada.



En cuanto a la diferencia entre los equipos de baja presión y presión estándar, los últimos no pueden asegurar mantener la presurización por debajo de los 3 bar debido a la imposibilidad de accionamiento de la válvula de control remoto empleada a esa presión. La presión de trabajo será seleccionada en función de los criterios del usuario del equipo para la tarea a realizar, pero valores habituales se encuentran entre de 7 a 9 bar, siendo 12 bar su máximo [7]. Por contraposición, el equipo de baja presión se diseña específicamente para poder asegurar la presurización y trabajar a partir de los 0,5 bar hasta los 12 bar. Dependerá de la elección del usuario, pero lo habitual es emplear este tipo de equipo a la presión más baja posible. Es importante resaltar que cuando se habla de presión a lo largo de este proyecto se está hablando de presión manométrica con respecto a la atmosférica. Las implicaciones, en cuanto a necesidades características de cada equipo, derivadas de trabajar a diferentes presiones son estudiadas en profundidad en el punto 3.1.-Rangos de trabajo.

## 2.2.- Elementos constructivos

En este apartado se indica la selección de los elementos constructivos, es decir las diferentes soluciones aceptadas para cada elemento necesario para el diseño y funcionamiento de la máquina. Muchos elementos son compartidos con el equipo de presión estándar, ya sea desarrollando las mismas u otras funciones.

De forma genérica se puede dividir el equipo en elementos de diseño y elementos de funcionamiento. Los de diseño son los propios de la máquina de baja presión y en su conjunto aseguran un correcto funcionamiento a los rangos de trabajo anteriormente expuestos. A su vez se dividen en principales y secundarios, siendo los secundarios los conformados por toda conexión neumática, tanto de tubería rígida como de manguera flexible, y los principales el resto de las válvulas y elementos de mayor importancia. Los elementos de funcionamiento están conformados por la manguera de chorro y la boquilla, fundamentalmente. Su selección condiciona el funcionamiento del equipo en cuanto a características de consumo, pero es prácticamente independiente de si el equipo es de baja presión o no. Su dimensionamiento dependerá del caso concreto.

En este capítulo, para indicar el diámetro de ciertos elementos de tubería y orificios, se ha seguido el sistema anglosajón de unidades por ser el instaurado en el sector. Mientras que en el Sistema Internacional la unidad de longitud es el metro (m) el anglosajón mide en pulgadas (in), siendo su equivalencia: 1 in = 0,0254 m.

### 2.2.1.- Elementos principales de diseño

En el presente sub-apartado se exponen los elementos principales de diseño. La Figura 2-2 muestra la vista frontal y lateral del equipo de baja presión, con los principales elementos de diseño, modelado en 3D en Autodesk Inventor. En la Tabla 2-1 se especifican las anotaciones numéricas de la imagen. Además de las 15 que se recogen en la figura y tabla, será comentado el gatillo hombre muerto.

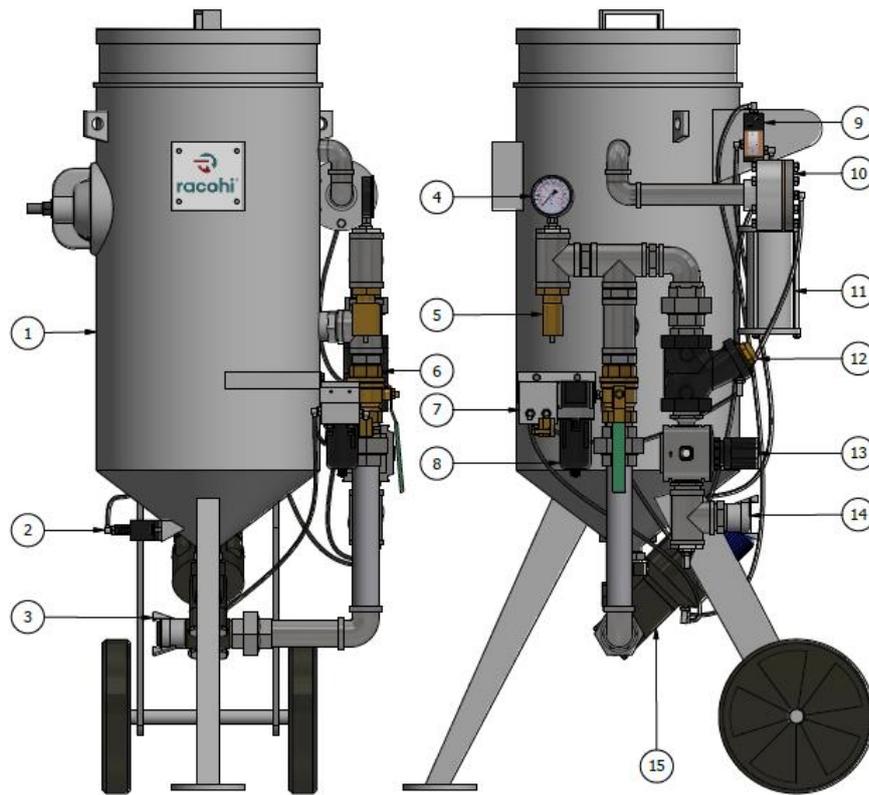


Figura 2-2 - Vista frontal y lateral del equipo de chorreado de baja presión.

Partes especificadas en la Tabla 2-1

Tabla 2-1 - Partes de un equipo de chorreado de baja presión (Figura 2-2)

1	Depósito	9	Válvula neumática 3/2
2	Vibrador neumático	10	Válvula de descompresión
3	Acople manguera chorro	11	Silenciador
4	Manómetro	12	Válvula auto air
5	Válvula de seguridad de presión	13	Regulador de presión
6	Válvula manual de aire	14	Acople manguera aire
7	Caja distribuidora	15	Válvula distribuidora de abrasivo
8	Filtro decantador de aire		

### 2.2.1.1.- Depósito

Se trata de un depósito de acero de 60 l de la empresa Eferest [8], el cual es el fabricante de confianza de Couto Maquinaria para los equipos de chorro ya comercializados bajo la marca Racohi. Sus dimensiones principales son un diámetro de 355 mm, una altura de 1135



mm y un peso de 65 kg. Se diseña bajo los requisitos de la Directiva 2014/68/UE [9] con respecto a comercialización y puesta en servicio de equipos a presión, con su correspondiente marcado CE.

Como se puede apreciar en la Figura 2-2, con anotación número 1 según la Tabla 2-1, el depósito tiene forma cilíndrica con un final en forma de cono. El material abrasivo es introducido en el depósito por su apertura superior, que se puede observar en la Figura 2-3. La forma cónica a 45° del depósito permite una salida fluida del material abrasivo. En esta misma imagen se puede observar la tapa del depósito y el tamiz. Estos dos elementos son opcionales pero recomendados. La tapa impide que se emita polvo de abrasivo en los momentos de la presurización y despresurización y el tamiz evita introducir material abrasivo de granulometría superior a la seleccionada. Así mismo el depósito tiene un registro que se puede observar en la parte izquierda de la Figura 2-3. Permite la realización de labores de limpieza interna, mantenimiento e inspección, estando habitualmente cerrado.

El tanque posee otras 3 aperturas que se pueden apreciar en la Figura 2-2. Son las correspondientes a las conexiones con el circuito neumático de tubería rígida. Dos de ellas situadas en el perfil derecho de la vista frontal, la situada en una posición superior con rosca interna de una pulgada y la inferior de pulgada y cuarto. De la misma dimensión es la rosca interna de la apertura situada en la posición inferior del cono.

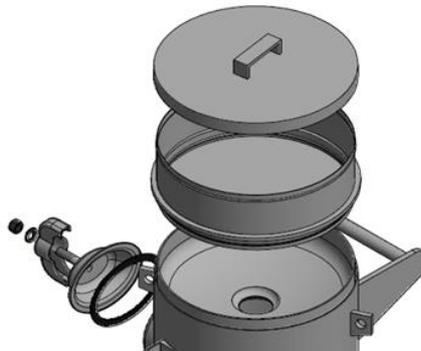


Figura 2-3 - Detalle superior del depósito

En el interior del depósito y comercializada junto a él, se encuentra la válvula pop-up. También conocida como boya de cierre, es un cono metálico engomado que permite el cierre presurizado del depósito y es suministrado con el mismo. En la Figura 2-4, en la cual se muestra una imagen seccionada longitudinalmente del depósito del equipo, se corresponde con el cono situado en el centro del depósito. Debido a la diferencia de presiones que se genera entre el aire interior y exterior al equipo en el momento que la válvula de descompresión es accionada para cerrarse, la boya sube asegurando la hermeticidad en el cierre del orificio superior.



Figura 2-4 - Sistema de válvula pop-up

### 2.2.1.2.- Vibrador neumático

El vibrador neumático, con anotación 2 en la Figura 2-2, permite mejorar la salida de material abrasivo del tanque. El seleccionado es el modelo NCT3, Figura 2-5, del tipo rotativo multidireccional de turbina, de la casa NVNetterVibration [10]. El principio de funcionamiento en el que se basa es en generar fuerza centrífuga gracias al giro de turbina que incorpora masas excéntricas. La turbina es accionada por el sistema de aire de manguera flexible con entrada de aire de un octavo de pulgada.



Figura 2-5 - Vibrador neumático NCT 3

Los fabricantes ofertan multitud de tipos de vibradores que se han tenido en cuenta para el diseño, como pueden ser los de bola (NCB), en los cuales la vibración se consigue con el movimiento circular de una bola de acero. Su funcionamiento es ligeramente más sencillo que los de turbina, pero se recomienda neblina de aceite en el aire de accionamiento para mejor lubricación. Esto no ocurre en los NCT y es una desventaja para la aplicación estudiada, donde se procura el aire lo más limpio posible.

La característica de diseño de los vibradores neumáticos es la fuerza centrífuga que ejercen y esta depende de la presión de accionamiento. Esta presión está determinada por la



presión del aire que entra en el equipo desde el compresor, ya que la señal neumática se deriva antes de pasar por el regulador de presión. Su valor dependerá del caso concreto a trabajar en cuanto a boquilla y presión de trabajo, pero un valor habitual en el límite inferior son los 3 bar.

El procedimiento [11] seguido a la hora de dimensionar consiste en seleccionar el vibrador que a la presión de accionamiento asegure una fuerza superior a la necesaria para mover el material abrasivo dentro del depósito. Esta fuerza necesaria no es más que el peso del material, calculado como:

$$F = V \cdot d \cdot f \cdot g \quad (2.1)$$

Donde:

- $F$ : Fuerza necesaria para hacer vibrar el material abrasivo.
- $V$ : volumen del tanque.
- $d$ : densidad aparente del material abrasivo.
- $f$ : factor de llenado del depósito.
- $g$ : aceleración de la gravedad,  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

De los parámetros necesarios para su dimensionamiento se deduce que este depende: del tamaño del tanque, del tipo de abrasivo empleado y del grado de llenado en el que se encuentre el tanque. En este caso el depósito es de  $0,06 \text{ m}^3$  con un factor de llenado máximo del 85%. Con la finalidad de abarcar las diferentes posibilidades en cuanto a material abrasivo habitual en chorreado de baja presión, se calcula la fuerza necesaria a partir de la densidad aparente de [12] :

- Bicarbonato sódico, densidad aparente de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .
- Silicato de aluminio, densidad aparente de  $1350 \text{ kg/m}^3$ .
- Microesfera de vidrio, densidad aparente de  $1500 \text{ kg/m}^3$ .
- Corindón, densidad aparente de  $1600 \text{ kg/m}^3$ .

Los resultados obtenidos para cada abrasivo se grafican en la Figura 2-6 junto con la característica de cada vibrador. Así, el vibrador seleccionado es aquel que para la presión de accionamiento presenta una fuerza superior a la necesaria para mover el material abrasivo. A 3 bar, el único modelo que cumple esta condición es el NCT3 y por ello es el seleccionado.

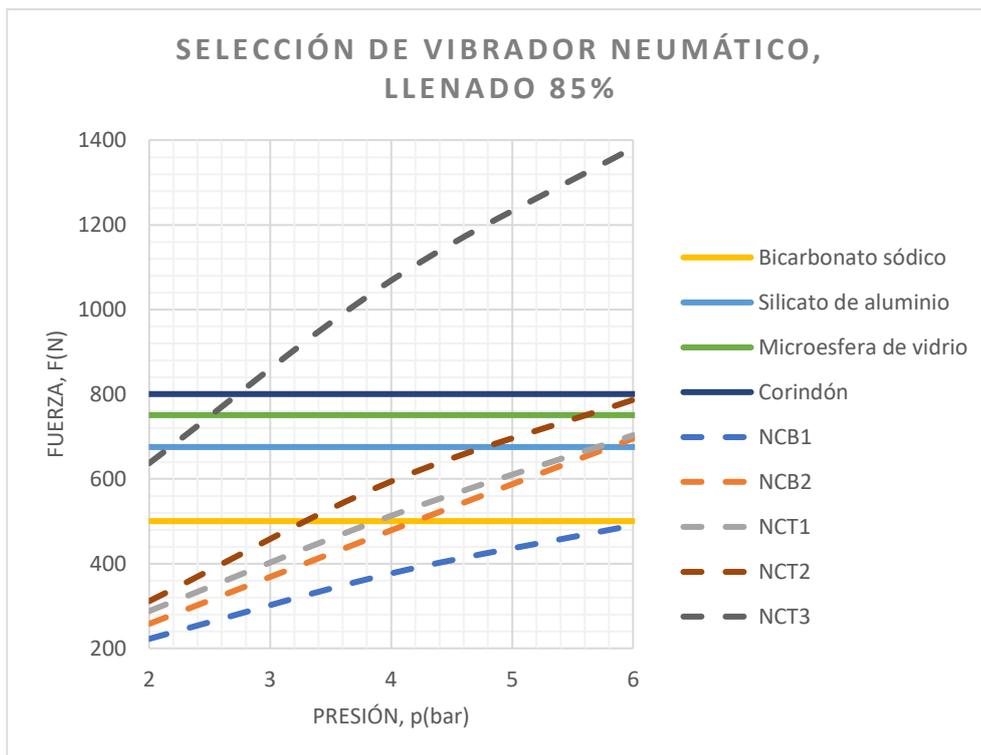


Figura 2-6 - Selección de vibrador neumático

### 2.2.1.3.- Acoples de manguera

Los acoples definen los límites del sistema conformado por el equipo de chorro, siendo la entrada de aire desde el compresor y la salida del equipo hacia la manguera de chorro. En la Figura 2-2 se corresponden a los números 14 y 3, respectivamente. Son los mismos que se emplean en otros equipos de chorro de la marca Racohi [13].

### 2.2.1.4.- Manómetro

Se trata de un manómetro de glicerina que mide la presión manométrica en el equipo, número 4 de la Figura 2-2. Es suministrado por Salvador Escoda, proveedor habitual de Couto Maquinaria para elementos de medición de este tipo. Permite conocer la presión manométrica en el sistema en todo momento.

### 2.2.1.5.- Válvula de seguridad de presión

Con el número 5 en la Figura 2-2, se trata de una válvula de seguridad ante sobrepresión tarada a 12 bar del fabricante AirTek. Su misión es proteger el equipo ante posibles sobrepresiones despresurizándolo si se supera la consigna.

Se trata de la misma válvula que se coloca en los equipos de chorro a presión estándar de la marca Racohi [13] ya que comparte la presión máxima de consigna.



### 2.2.1.6.- Válvula manual de aire

Se trata de una válvula de esfera Genebre de rosca interior de una pulgada y cuarto, se puede identificar con el número 6 en la Figura 2-2. Restringe la cantidad de aire que se envía a la manguera de chorro al ocupar parte de la sección de paso con una esfera al regular la posición de la maneta, Figura 2-7. Es la utilizada en equipos de chorreado abrasivo manual a presión estándar de la marca Racohi [13] con la misma finalidad.



Figura 2-7 - Válvula manual de aire

Su apertura debe realizarse en consonancia con la de la válvula dosificadora de abrasivo para un correcto equilibrio entre la cantidad de abrasivo y aire. El servicio de atención técnica de Couto Maquinaria recomienda una mezcla al 25% de abrasivo a título orientativo, en la práctica depende del operario, el tipo de material abrasivo y el trabajo a realizar.

### 2.2.1.7.- Caja distribuidora

Se trata de un cubo metálico mecanizado en su interior para permitir distribuir y organizar las conexiones neumáticas asociadas al sistema de accionamiento conformado por manguera flexible. En la Figura 2-2 es el elemento número 7.

Su misión es meramente organizativa. Mediante orificios distribuye el aire entrante procedente del filtro decantador a la manguera atóxica de respiración y al tubo de ida hacia el gatillo hombre muerto. Cuando este es accionando y al aire vuelve por el otro tubo, distribuye ese caudal entrante entre las señales neumáticas correspondientes al accionamiento de la válvula dosificadora de abrasivo y la válvula auto air. Además, posee una pequeña válvula de esfera conectada a la vuelta del aire del gatillo, empleada como válvula de seguridad manual que permite la apertura del circuito neumático con su consiguiente despresurización.

### 2.2.1.8.- Filtro decantador de aire

El filtro decantador de aire asegura cierto nivel de limpieza del aire que circula por las mangueras flexibles del sistema de accionamiento neumático, número 8 de la Figura 2-2. Se trata del modelo F3000 de CKD [14]. Aunque no se trata de un filtro antihumedad, reduce la cantidad de gotas de agua, aceite o polvo arrastradas por el aire. Se selecciona por asegurar



un correcto funcionamiento en cuanto a niveles de filtración en los rangos de presión de trabajo.

### 2.2.1.9.- Válvula neumática 3/2

La válvula neumática 3/2 en posición normalmente cerrada, número 9 en Figura 2-2, permite manejar el vibrador y es de la casa Pneumax [15]. Todas sus conexiones están roscadas internamente con un tamaño de un octavo de pulgada. Su rango de presión de trabajo y presión mínima de accionamiento condicionan su selección ante válvulas de este tipo de otras marcas.

La denominación 3/2 implica que posee tres vías o conexiones a comunicar y dos posiciones. En posición cerrada, y como se puede apreciar en la Figura 2-8, las vías conectadas son la 2 y 3, es decir la señal neumática procedente de la entrada del equipo hacia la vía 2 es evacuada a la atmósfera a través de la 3. En el momento en el que la válvula es accionada su posición cambia, entrando en la posición que conecta las vías 2 y 1, llevando la señal neumática al accionamiento del vibrador.

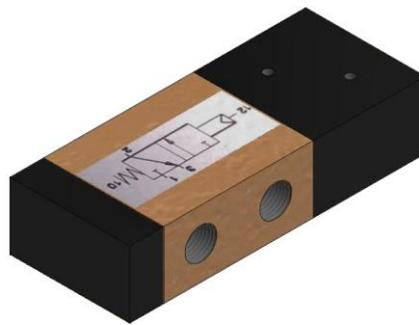


Figura 2-8 - Válvula neumática 3/2

### 2.2.1.10.- Válvula de descompresión

Se trata de una válvula de descarga FM-2, señalada en la Figura 2-2 con la anotación número 10. Es solicitada al fabricante Krimetal BV [16] a partir de las características necesarias de presión y dimensiones de entrada, salida y pilotaje neumático. Se escoge frente a otro tipo de válvulas de descarga debido a su enorme sencillez y gran compactibilidad.

Tanto la entrada como la salida de aire, en la Figura 2-9 entrada en posición superior y salida en lateral, son de rosca interna de una pulgada. Como se puede apreciar en la misma, está conformada por un cuerpo superior y otro inferior separados por una membrana intermedia. En el centro de la circunferencia del cuerpo inferior se sitúa un orificio con rosca interna de un octavo de pulgada que permite la entrada de señal neumática.



Figura 2-9 - Válvula de descompresión [16]

Su funcionamiento asegura el cierre del circuito cuando se acciona mediante señal neumática su diafragma interior. Cuando es accionado, la membrana tapona el orificio superior separándolo físicamente la entrada y la salida de aire. En el momento en que esta señal cesa, el diafragma vuelve a su posición de reposo permitiendo la evacuación del aire al exterior y la despresurización del sistema.

#### **2.2.1.11.- Silenciador**

Recogido con la numeración 11 en la Figura 2-2, se trata de un silenciador neumático con salida a la atmósfera. Su orificio de entrada es de una pulgada y se encuentra a la salida de la válvula de descompresión. Aunque el equipo no es ruidoso durante el funcionamiento, sí lo es cuando se realiza la maniobra de descompresión. La finalidad de este elemento es reducir el nivel de ruido emitido en ese proceso.

Es un elemento ampliamente empleado en el control remoto de los equipos de presión estándar. Se selecciona el mismo modelo que el usado en las máquinas de chorro de Racohi [17]. Compartir elementos constructivos entre equipos distintos permite reducir las necesidades de almacenamiento.

#### **2.2.1.12.- Válvula auto air**

La válvula auto air, con numeración 12 en la Figura 2-2 se sitúa a la entrada de aire del equipo tras el regulador de presión, con tamaño una pulgada y cuarto. La suministrada es comprada a Erol Exports [18], empresa proveedora de este tipo de válvulas para Couto Maquinaria por criterios económicos. Su propósito consiste en no permitir el paso de aire hacia el resto de la máquina hasta que no esté accionada, por tanto, su posición es normalmente cerrada.

Para poder actuar, esta válvula posee dos puertos neumáticos de un octavo de pulgada, uno en la tapa roscada dorada superior y otra en el cuerpo principal, ambas se pueden observar en la Figura 2-10. El accionamiento neumático se realizará a través de este último, mientras que el orificio superior permite evacuar el aire a la atmósfera cuando es necesario. Cuando la válvula se encuentra en posición cerrada, un disco tapa el paso del aire a su través. Si la válvula recibe señal en el puerto comentado, la membrana que separa el cuerpo inferior y superior empuja el disco hacia arriba, permitiendo el paso del aire en su totalidad. En el



momento en el que la señal cesa, la membrana y el disco vuelven a su posición inicial siendo asistidas en su movimiento por un muelle.



Figura 2-10 - Válvula auto air

### 2.2.1.13.- Regulador de presión

El regulador empleado es el R6000-W de la marca CKD [19], con una rosca de tres cuartos de pulgada. Su selección se debe a sus propiedades características en cuanto a curvas de presión y caudal: permite regular la presión a su salida a valores establecidos en el rango de trabajo (0,5-3 bar) del chorro a baja presión para los caudales de aire consumidos habitualmente (0,5-2 m<sup>3</sup>/min). Está situado a la entrada del equipo y unido mediante tornillos de unión adaptadores, como se aprecia en la Figura 2-2 número 13.

La finalidad de este elemento es el de establecer la presión existente en el subsistema rígido del equipo, es decir, en toda la máquina excepto en la señal de accionamiento neumática de manguera flexible. Es distintivo de las máquinas de chorro de baja presión en comparación con los equipos estándar, en las cuales la presión del sistema está marcada por la del compresor. En este caso, aunque la presión del aire de compresor se encontrará cerca de los valores deseados, el uso de un regulador permite trabajar con mayor control y exactitud sobre este parámetro. Además, algunos compresores de aire sufren fluctuaciones durante el trabajo. Esto puede generar algún pico de sobrepresión que, si bien no afecta a la integridad de la máquina, es posible que afecte de forma destructiva sobre la superficie a chorrear.

Para poder regular la presión, el interior del elemento está dividido en dos cámaras por una junta de estanqueidad unida a un émbolo. Su posición queda determinada por el equilibrio de fuerzas entre la presión del aire primario y la posición del pomo, regulando así la presión del secundario.

### 2.2.1.14.- Válvula dosificadora de abrasivo

La válvula dosificadora de abrasivo es fundamental en el proceso de chorreado, con número 15 en Figura 2-2. Como se ha comentado previamente en la explicación 2.2.1.6.-



Válvula manual de aire, la proporción de la mezcla aire y abrasivo condiciona la calidad del trabajo.

Existen multitud de posibilidades en cuanto a válvulas dosificadoras de abrasivo en el sector. En equipos de presión estándar son habituales las de plato, las micro y las Thompson. La regulación de la cantidad de abrasivo en las primeras se realiza mediante la apertura de un agujero entre dos platos, siendo su precisión inferior a las otras dos. Tanto la Thompson como la micro regulan el paso de abrasivo mediante un agujero en la camisa interior, en función del giro efectuado sobre el pomo actuador. Este tipo de válvulas permite mayor precisión en la dosificación. La diferencia de la Thompson es que ésta permanece siempre cerrada, restringiendo la salida hacia la manguera de chorro hasta que recibe una señal neumática que permite su apertura. Resulta una gran ventaja en cuanto a asegurar siempre la misma cantidad de abrasivo ya que el pomo puede quedarse girado en la posición deseada, el abrasivo no sale hasta que no se acciona, en cambio la micro requiere apertura y cierre cada vez que se para de trabajar.

Debido a las altas exigencias en cuanto a precisión en el equipo de baja presión, se decide emplear una válvula Thompson II de Racohi [20]. En la Figura 2-11 se muestra una imagen de sección de esta válvula, en la que se pueden observar los elementos explicados anteriormente.



Figura 2-11 - Válvula Thompson II

### 2.2.1.15.- Gatillo hombre muerto

Se trata del modelo DMH 125 de Racohi [21], se selecciona por ser el diseñado por Couto Maquinaria. El gatillo hombre muerto se encuentra en el extremo de la manguera de chorro, justo antes del portaboquillas y la boquilla. Es el dispositivo accionado por el operario que permite el cierre del circuito neumático presurizando el equipo. En equipos de



chorro de presión estándar, en función de la configuración es posible verlos monotubo, pero para el equipo de baja presión es necesario que sea bitubo.

Su funcionamiento es sencillo: mientras que el gatillo no es accionado el aire que llega por uno de los dos tubos es evacuado a la atmósfera, en el momento en el que el operario acciona el gatillo se cierra el circuito, comunicando el tubo de traída de aire desde la máquina con el de ida. En la Figura 2-12 se adjunta un modelo diseñado con Autodesk Inventor.

Es también uno de los elementos de seguridad más importante, el nombre de “gatillo hombre muerto” hace alusión a la situación en la que el operario pierde el control por algún motivo de la manguera de chorro. Se trata de una situación potencialmente peligrosa ya que si el equipo siguiese presurizado y chorreando podría causar problemas graves de salud si el chorro incidiese sobre una persona, además de posibles golpes debido a latigazos de la manguera de chorro. Para evitar este tipo de accidentes, en el momento en el que el operario no mantiene la presión sobre el gatillo para accionarlo, este vuelve a abrir el circuito gracias a un muelle que lo devuelve a su posición.



Figura 2-12 - Sistema gatillo hombre muerto

En equipos de chorro abrasivo de presión estándar es habitual ver este elemento de tipo electroneumático. Los tubos neumáticos son sustituidos por conexiones eléctricas y es necesario incluir válvulas actuadoras electroneumáticas. Presenta ciertas ventajas en cuanto a velocidad de respuesta, mientras que la solución neumática presenta un pequeño retraso en la señal, la electroneumática es instantánea. Para el equipo de baja presión se opta por la solución únicamente neumática con la intención de dar sencillez al sistema.

### 2.2.2.- Elementos secundarios de diseño

En cuanto a la denominación de elementos secundarios, son aquellos que permiten la conexión entre los elementos principales de diseño.

Principalmente, se habla de:

- Tuberías rectas de conexión
- Codos de 90° macho-hembra
- Codos de 90° hembra-hembra
- Piezas T hembra
- Roscas de unión macho-macho
- Tuercas de unión hembra-hembra
- Roscas de reducción macho-hembra



El diámetro de los elementos correspondientes a la parte superior del sistema, es decir los que conforman la unión del depósito con la válvula de descompresión y el silenciador, es de una pulgada. El resto de los elementos, es decir, desde la entrada de aire hasta la salida a la manguera de chorro, pasando por la conexión lateral inferior del depósito son de una pulgada y cuarto.

Por otra parte, todo el circuito neumático que lleva la señal de accionamiento entre las distintas válvulas y elementos para un correcto funcionamiento del equipo está formada por manguera flexible de aire comprimido Racohi [22] de un octavo de pulgada.

### **2.2.3.- Elementos de funcionamiento**

Se trata de elementos imprescindibles para el funcionamiento del equipo de chorreo abrasivo de baja presión, pero cuya selección se determina en función del trabajo a realizar. Es decir, la explicación correspondiente a los elementos de funcionamiento que ese plantea en este sub-apartado es de carácter descriptivo, dependiendo su dimensionamiento de la situación concreta.

#### **2.2.3.1.- Manguera de chorro**

La manguera de chorro es la encargada de conducir el aire con abrasivo en suspensión desde el equipo hasta la boquilla. En la Figura 2-13 se muestra una manguera de chorro con acople y portaboquillas en cada extremo. El portaboquillas permite la colocación de la boquilla en su extremo, mientras que el acople asegura la unión hermética con la máquina.

La empleada en todos los equipos Racohi [13] es de la propia marca. Se trata de manguera flexible fabricada a partir de caucho. Es un elemento importante ya que está expuesto a la abrasión interna. Se ofertan dos tipos de mangueras, la premium y la extra-premium, siendo la primera de una única capa y la segunda de doble capa. Se aconseja el empleo de la extra-premium por su mayor durabilidad, pero en muchos casos se prefiere la premium ya que al ser de una capa presenta menor rigidez, reduciendo la fatiga del operario. En ambos casos se fabrican en consonancia con las normas DIN ISO 4649:2006 con respecto a abrasión interior máxima y la EN ISO 3861:1997 en cuanto a presión.



Figura 2-13 - Manguera de chorro

Por otra parte, el dimensionamiento de la manguera de chorro en cuanto a diámetro interno depende de la longitud de esta y el diámetro de la boquilla empleada. Fabricantes como Racohi y Elcometer [23] recomiendan un diámetro interno de la manguera tres veces superior al diámetro interno de la boquilla empleada si la longitud no es superior a los 20 m. A partir de los 20 m y hasta los 40 m, longitud máxima recomendada para un correcto funcionamiento de los equipos, el diámetro de la manguera debe ser 4 veces superior al de la boquilla empleada. Además, el diámetro de la manguera de suministro de aire desde el compresor queda condicionado a un valor mínimo igual al de la manguera de chorro.

Así mismo, otra recomendación de estos fabricantes es la de emplear un último tramo de manguera de aproximación. El último metro de manguera de chorro se sustituye por otra de un diámetro inferior. Esto permite facilitar el trabajo del operario de chorro, reduciendo la fatiga.

### 2.2.3.2.- Boquilla

Se trata de uno de los elementos más importantes para un buen funcionamiento del equipo y un correcto tratamiento de la superficie a trabajar. Algunos ejemplos de las boquillas comercializadas por la marca Racohi [24] se recogen en la Figura 2-14.

Su principal función es la de proyectar el aire con material abrasivo de forma direccionada hacia la superficie que se está tratando. Se colocan en el extremo de la manguera de chorro, uniéndose a esta mediante roscándose en el portaboquillas. La selección de una boquilla correcta es fundamental puesto que, junto con la presión de trabajo deseada, impone las necesidades de potencia en el compresor de aire y los consumos de aire y material abrasivo. Explicaciones más detalladas con respecto a este aspecto se realizan en el 3.1.- Rangos de trabajo.



Figura 2-14 - Boquillas Racohi [24]

Existen multitud de modelos de boquillas en cuanto a diseño, en función de las prestaciones necesarias. Se pueden clasificar por longitud: corta, media y larga, siendo las largas las de mayor producción debido a mayor aceleramiento de las partículas chorreadas. Otra clasificación se puede hacer en función del material del liner (orificio interno por el que pasa el aire con material abrasivo): carburo de silicio, carburo de tungsteno y syclone. Tanto la de carburo de silicio como la de tungsteno tiene similares vidas útiles, la de syclone es más duradera pero su coste es significativamente mayor. Por último, en cuanto a tipo de perforación pueden ser:

- Recta: acelera el aire y abrasivo debido a su entrada convergente.
- Venturi: boquillas que consiguen un efecto similar al Venturi al hacer pasar el caudal por una reducción de la sección previa a una salida divergente. El patrón de chorro es más uniforme que en las anteriores, siendo de las más empleadas.
- Venturi doble: semejante a las anteriores, pero con orificios en el comienzo de la salida divergente. El caudal chorreado aumenta gracias a la aspiración atmosférica a través de esos orificios.
- Boquillas con salida lateral o circunferencial: para chorrear interior de tuberías o zonas de difícil acceso.

Para trabajos de chorro abrasivo a baja presión se recomiendan boquillas del tipo Venturi corto de carburo de tungsteno.

### 2.2.3.3.- Compresor

Para poder suministrar a la máquina de chorro abrasivo aire a presión es necesario utilizar un compresor de aire. Estos equipos se pueden clasificar por su portabilidad: compresores portátiles en su mayoría son consumidores de combustibles fósiles mientras que los compresores fijos son eléctricos. Así mismo, se pueden clasificar según la tecnología de compresión: de tornillo o de pistón.



Dentro de las posibilidades del trabajo o aplicación a desarrollar, se recomienda el uso de compresores eléctricos de tornillo. Su eficiencia es superior a los de combustible fósil y consiguen mayor estabilidad en la presión de salida, siendo los más empleados en el sector. En trabajos de obra exterior en los cuales el suministro eléctrico es imposible de asegurar se usan los compresores de combustible fósil.

#### 2.2.3.4.- Respiración y protecciones

Es necesario el uso de equipos de protección individual por los operarios de máquinas de chorreado abrasivo. Fundamentalmente: casco con conexión a red de aire para permitir la respiración, petos de protección, buzos, polainas y guantes.

En cuanto a la respiración, el casco de protección posee una conexión a la cual se hace llegar el aire desde el equipo de chorro. Para que el aire sea respirable su conexión se hace a con mangueras atóxicas a través de filtro de aceite, agua y partículas. El suministro de aire al casco es independiente del estado de presurización del equipo, siempre que haya aire procedente del compresor.

### 2.3.- Diseño definitivo

El diseño definitivo del equipo de baja presión es el presentado en la Figura 2-15. Se muestran todos los elementos descritos a lo largo del Capítulo 2.-Diseño de equipo de chorreado de baja presión, en una imagen exportada del modelo paramétrico tridimensional desarrollado con la herramienta Autodesk Inventor.

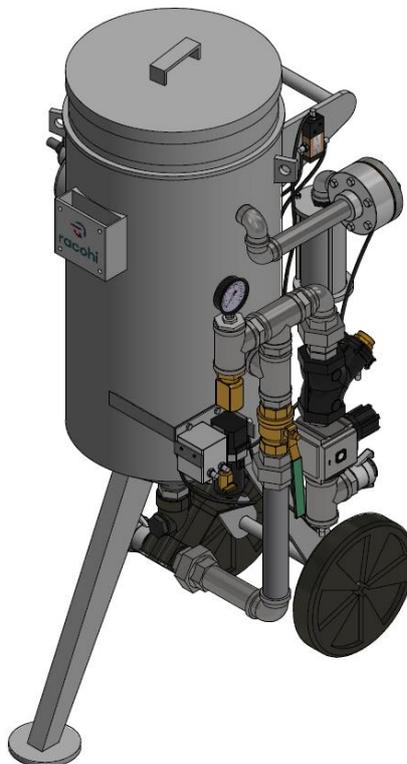


Figura 2-15 - Vista general equipo de chorreado de baja presión



Así mismo, en la Figura 2-16 se ilustra el despiece realizado del equipo. No se incluyen anotaciones numéricas identificativas por motivos de visibilidad. Para poder consultar el despiece con todas las características descritas ver Anexo I.

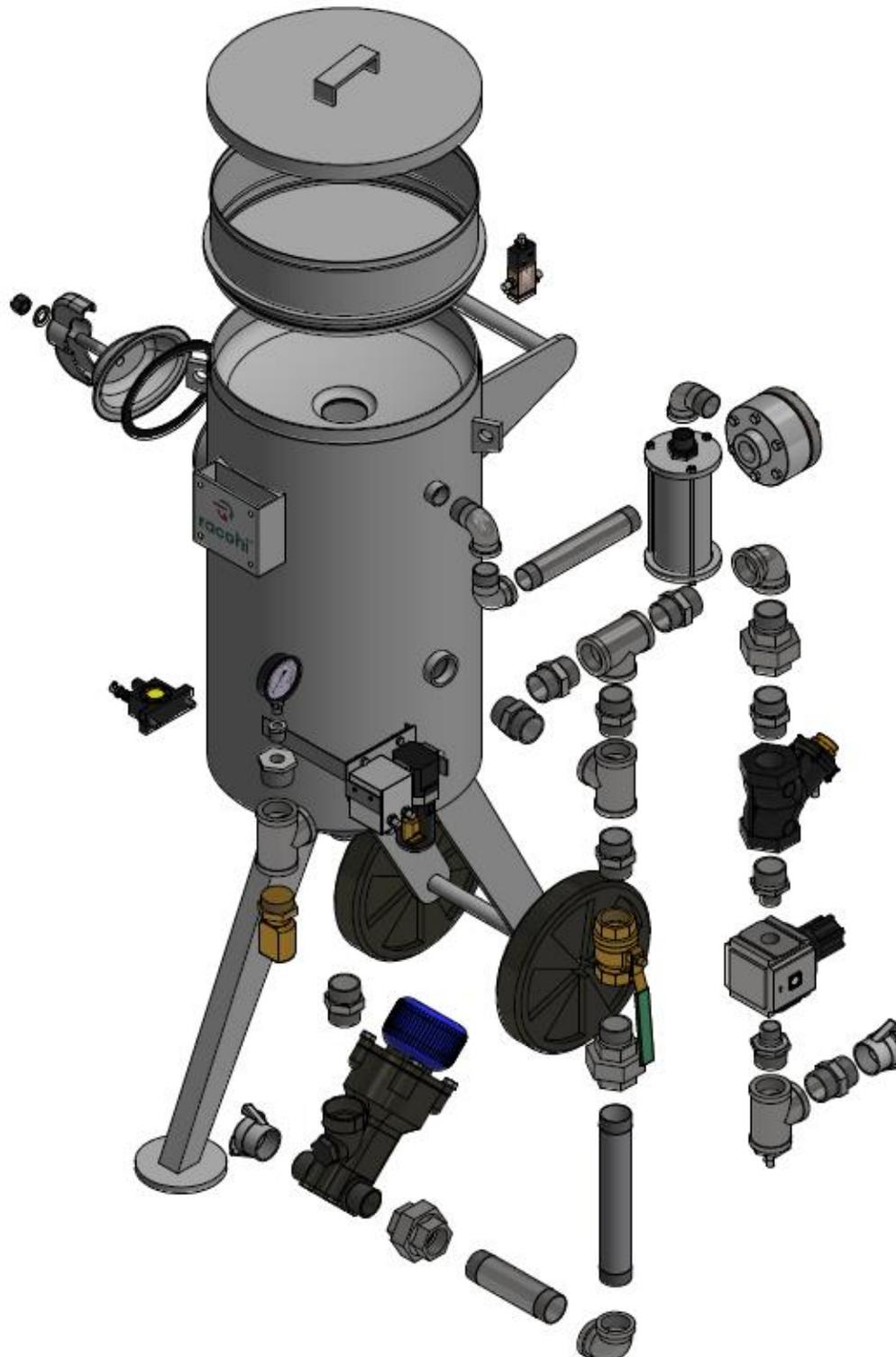


Figura 2-16 - Despiece sin anotaciones



## 2.4.- Funcionamiento

El equipo puede estar en dos estados: despresurizado o presurizado. A continuación, se detallan los procesos que ocurren en cada caso.

### 2.4.1.- Equipo despresurizado

Con el suministro de aire entrando a la máquina, el operario no ha cerrado el circuito neumático accionando el gatillo hombre muerto. El aire entrante no puede acceder al interior del depósito ya que la válvula auto air se encuentra en estado normalmente cerrado, impidiendo el paso.

Desde la primera pieza T a la entrada, se distribuyen dos señales de aire comprimido. Una de ellas hacia la vía 2 de la válvula neumática 3/2. Ya que esta se encuentra en su posición normalmente cerrada, dejará evacuar todo el aire hacia la atmósfera por la vía 3. La otra señal neumática pasa por el filtro decantador y se distribuye entre el tubo de ida hacia el gatillo hombre muerto y el filtro para el aire respirable en el casco del operario. De esta manera se asegura el suministro de aire al casco de forma independiente al estado de presurización del equipo.

Ya que el operario no ha accionado el gatillo hombre muerto, el aire sale a la atmósfera directamente desde este. El circuito neumático permanece abierto y el equipo en estado despresurizado.

### 2.4.2.- Equipo presurizado

Partiendo de la situación anteriormente descrita y con la válvula manual abierta el operario de chorro acciona el gatillo hombre muerto. En ese momento se cierra el circuito neumático y el aire retorna por el tubo de vuelta, distribuyéndose mediante dos señales neumáticas.

Una de ellas acciona a la vez la válvula auto air y la de descompresión. La apertura de la primera implica el paso del aire hacia el interior del depósito, lo que acciona la válvula pop-up, cerrando el acceso superior del depósito. La actuación sobre la membrana de la válvula descompresora produce el cierre de la misma, que termina de poner a presión todo el equipo.

La otra señal actúa sobre la válvula neumática 3/2 y la dosificadora de abrasivo Thompson II. La válvula neumática cambia de posición accionando el vibrador neumático de material abrasivo. La válvula Thompson II, una vez controlada la cantidad de material abrasivo necesaria y estando actuada por la señal neumática, permite la suspensión de abrasivo en el aire. Es posible reajustar la presión del sistema mediante el regulador de presión.

A partir de ese momento, mientras que el operario mantenga accionado el gatillo hombre muerto, el aire con abrasivo en suspensión se verá proyectado por la boquilla



permitiendo la realización de las labores de chorreo. Cuando el accionamiento cese se produce la descompresión del sistema, como lo descrito en 2.4.1.-Equipo despresurizado. En ese caso, la válvula de descompresión abre el paso de aire hacia la atmósfera a través del silenciador, la válvula pop-up vuelve a su posición de reposo, la dosificadora de abrasivo cierra el paso de abrasivo y la válvula auto air corta el paso de aire hacia el equipo.



## 3.- CARACTERÍSTICAS DE EQUIPO DE CHORREADO

En este capítulo se exponen las principales características de los equipos de chorreado en cuanto a consumos de aire, potencia necesaria en el compresor y consumo de abrasivo. Los parámetros fundamentales que definen estas características son el diámetro de la boquilla empleado y la presión de trabajo, en menor medida afectadas por el tipo de abrasivo empleado.

Estas características de consumos y potencia son de gran importancia a la hora de evaluar el potencial del equipo de chorreado abrasivo a baja presión al compararlo con los de presión estándar. El requerimiento del caudal necesario está asociado al consumo energético en el compresor, que finalmente se traduce en un coste económico. De la misma manera sucede con el consumo de material abrasivo debido a su coste. Al ser distintos los rangos de trabajo de un equipo de baja presión que los de presión estándar, los costes económicos también variarán. Este planteamiento y más consideraciones económicas en cuanto a comparativa de equipos se exponen en el capítulo 5.-Comparativa entre equipos de chorreado estándar y de baja presión.

En el sector, estos datos son facilitados por el fabricante de las boquillas. Habitualmente recorre todos los diámetros ofertados en cuanto a diámetro de boquilla y un rango de los 3 a los 9 bar, volcando los datos en formato tabla. A la hora de evaluar las características para los equipos de baja presión esto supone un problema al encontrarse su rango de trabajo fuera del límite inferior. Con la finalidad de obtener datos válidos se realiza una estimación de los valores deseados a partir de los aportados por el fabricante de las boquillas Racohi [25], medidos para un abrasivo de densidad aparente promedio de 1600 kg/m<sup>3</sup>. Así mismo, para mejorar la visibilidad de los valores ya tratados se muestran en gráficas en vez de en tablas. También se considera el carácter teórico de los datos aportados en cuanto a consumo de aire por lo que tras las correcciones y factores de seguridad se obtiene el consumo real. Una mayor necesidad de consumo de aire repercute directamente en la potencia necesaria en el compresor, estableciéndose así la misma corrección teórico a real.

Todo el proceso presentado hasta ahora se aborda a lo largo del actual capítulo. Para ello se han empleado los datos ya citados y la hoja de cálculo Microsoft Excel.

### 3.1.- Rangos de trabajo

En cuanto a características de trabajo, las máquinas de chorro abrasivo a baja presión se diferencian de los equipos estándar de sus rangos de trabajo. Esto es, de la presión necesaria en chorreo y de la boquilla empleada para ello.



Tanto en un caso como en otro depende de muchas variables diferentes para cada situación concreta. Por ejemplo, las recomendaciones no serán las mismas si la empresa interesada en un equipo de chorro ya posee un compresor de aire, que puede adaptarse al rango necesario que otra que debe comprar el compresor. Así mismo, la situación es diferente cuando el cliente es una empresa a nivel industrial que tiene un proceso muy concreto a desarrollar, que otra que emplee el equipo de chorro de forma más versátil.

A pesar de todo, con la finalidad de poder realizar un estudio concreto, los rangos de trabajo para cada tipo de equipo de chorreo serán acotados a continuación. Se trata de un rango con carácter general que representa la diversa realidad del sector del tratamiento superficial.

### **3.1.1.- Equipos de chorro de presión estándar**

En equipos de presión estándar los rangos de trabajo más habituales se encuentran delimitados entre los 6 y los 9 bar de presión con boquillas de diámetros entre los 6,35 y los 12,5 mm. Así mismo, de forma genérica, las boquillas que más se emplean son las de carburo de tungsteno o syclone con perforación tipo Venturi largo.

### **3.1.2.- Equipos de chorro de baja presión**

En cuanto a los equipos de baja presión los rangos de trabajo cambian. Los más habituales se encuentran por debajo de los 3 bar y hasta los 0,5 bar. Las boquillas de diámetros entre los 3,2 y los 6,35 mm son las más utilizadas, del tipo Venturi corto de carburo de tungsteno.

## **3.2.- Procedimiento de análisis**

El procedimiento general de análisis para los consumos de aire y abrasivo y la potencia requerida en compresor ha sido la obtención de una familia de ecuaciones características para cada caso, en función de la presión y el tamaño de boquilla. La estimación de una función que explique el comportamiento de las características con respecto a las variables presión y diámetro de boquilla permitirá el estudio de las mismas en los rangos de trabajo de los equipos de baja presión. Tal y como se ha comentado previamente, los datos son los reportados por el fabricante de las boquillas de la marca Racohi. Debido a que el procedimiento seguido es el mismo para las tres características (aire, abrasivo y potencia requerida), en este apartado se explica apoyándose en el caso de la potencia del compresor.

Como se muestra en la Figura 3-1 para la potencia, lo primero es graficar los datos recogidos. En la figura, se representan los datos proporcionados por el fabricante mediante puntos y para la estimación se recurre a la herramienta de línea de tendencia de Excel. Así, las funciones obtenidas pueden ser de tres tipos: rectas, polinómicas de segundo grado o polinómicas de tercer grado. Para cada boquilla se escoge la regresión que mejor se ajuste mediante el parámetro estadístico  $R^2$ . Es decir, para la misma boquilla se prueba a realizar el ajuste lineal, polinómico de segundo grado y polinómico de tercer grado y el que presente



un valor de  $R^2$  más cercano a la unidad es el seleccionado. El caso de la potencia es un muy buen ejemplo ya que podemos encontrar de las tres funciones.

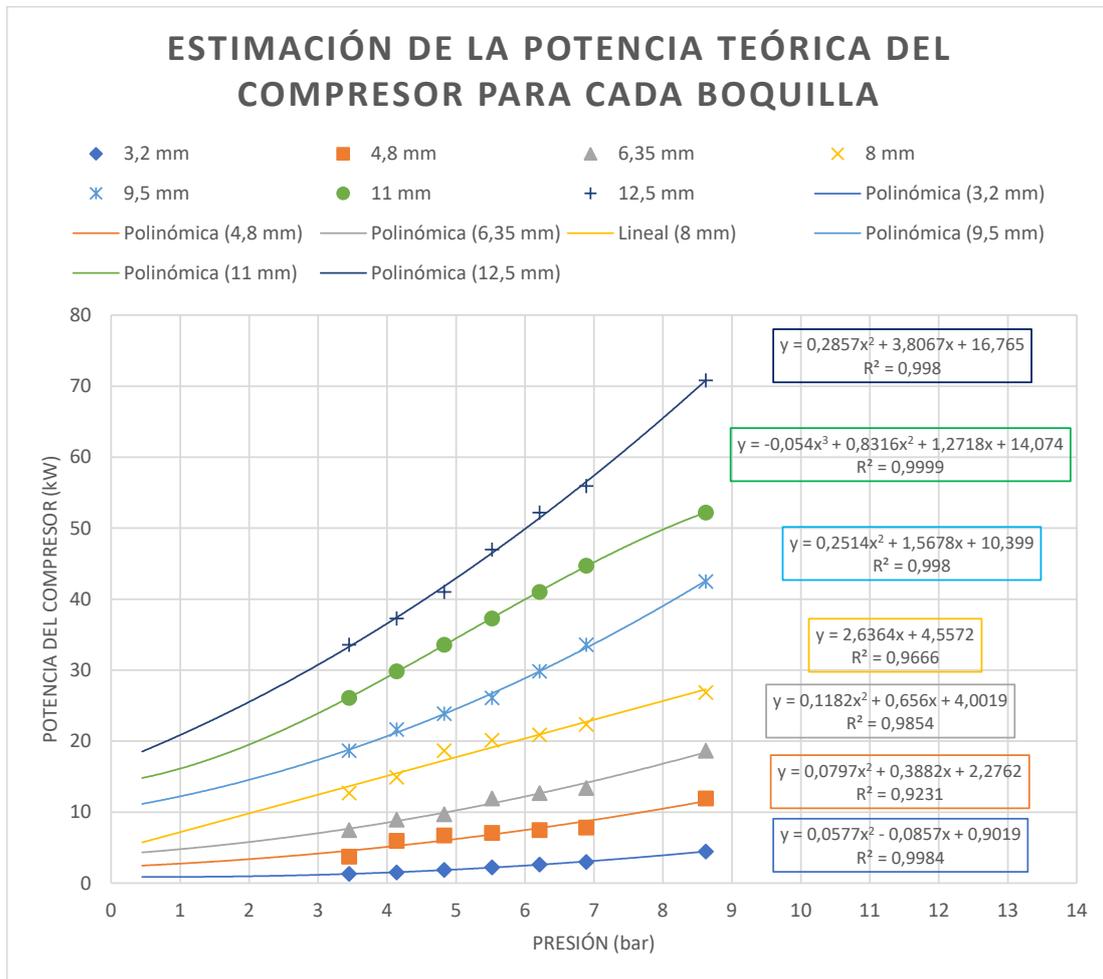


Figura 3-1 - Ejemplo de estimación de datos característicos

Una vez se ha decidido el tipo de función a emplear para cada caso de forma gráfica, con la finalidad de simplificar los cálculos posteriores se determinan sus coeficientes mediante las posibilidades que ofrece la función “estimación.lineal” de Excel. En la Figura 3-2 se ejemplifica para el caso de las características de potencia de compresor. Tras su cálculo es posible obtener las gráficas en todo el rango deseado dando valores de presión. Para el caso mostrado en la figura, dar valores de presión (variable x) permite el cálculo de la potencia de compresor para cada tamaño de boquilla.



	$y = a \cdot x^3 + b \cdot x^2 + c \cdot x + d$			
	a	b	c	d
3,2 mm	0	0,05772518	-0,08574643	0,90185421
4,8 mm	0	0,07968831	0,38824249	2,27622004
6,35 mm	0	0,11817846	0,6560254	4,00187978
8 mm	0	0	2,63639238	4,55723975
9,5 mm	0	0,25144376	1,56778784	10,3992768
11 mm	-0,05404136	0,83157665	1,27177519	14,0744702
12,5 mm	0	0,28565879	3,80672559	16,7654555

Figura 3-2 - Ejemplo de obtención de coeficientes para la potencia

### 3.3.- Resultados del análisis

El procedimiento descrito en el apartado anterior, 3.2.-Procedimiento de análisis, es el que se emplea para la obtención de las curvas características de consumo teórico de aire, consumo de abrasivo y potencia real necesaria en el compresor. Sus valores y peculiaridades se exponen en el desarrollo de este apartado, obteniendo también las curvas reales de consumo de aire y potencia del compresor.

#### 3.3.1.- Consumo de aire

La Figura 3-3 muestra los resultados obtenidos para el consumo teórico de aire en función de la presión para los distintos tamaños de boquilla. Para las boquillas de tamaño pequeño su comportamiento se asemeja al lineal mientras que a cuando los diámetros son grandes evoluciona hacia curvas polinómicas de grado dos. En todos los casos presentan carácter ascendente, tanto con el aumento de la presión como con el del diámetro de la boquilla.

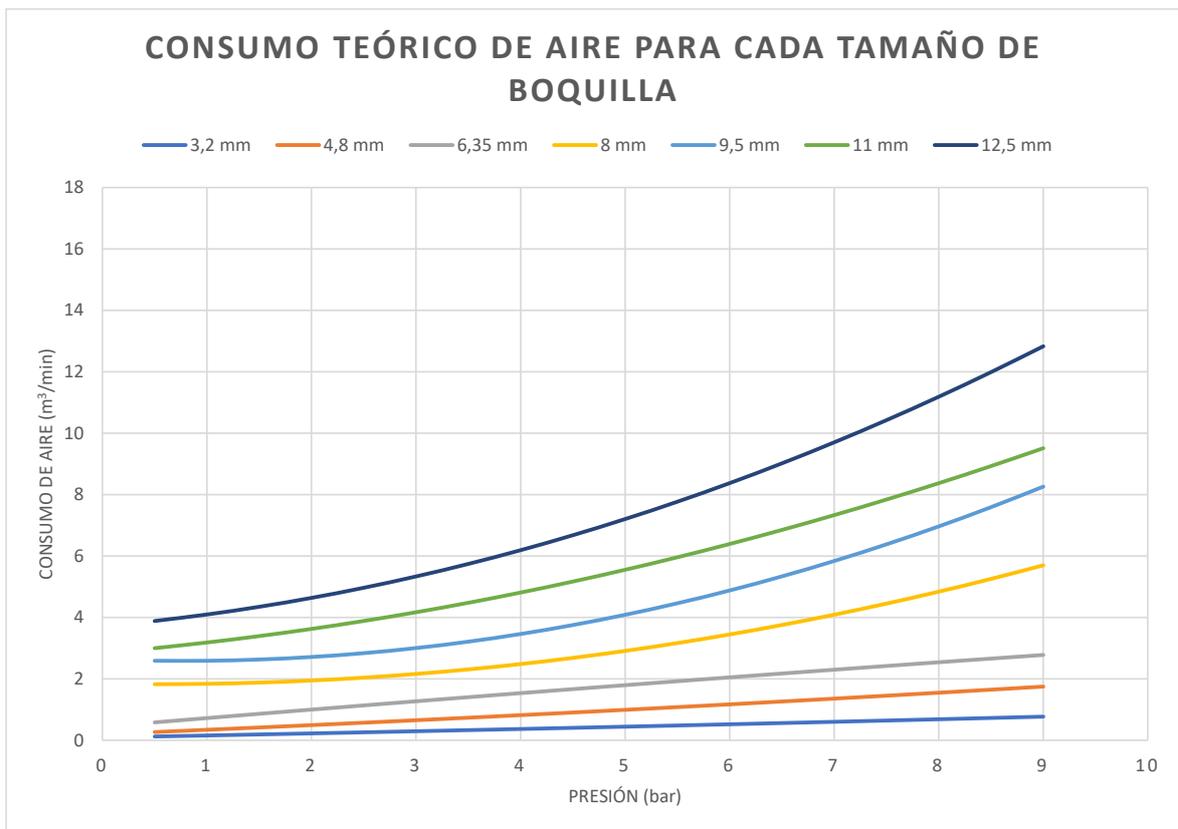


Figura 3-3 - Consumo teórico de aire

Estos valores solamente representan los consumos de aire requeridos para la boquilla, teniendo un carácter teórico. En la práctica es necesario valorar el consumo de aire para la respiración, así como las posibles inestabilidades en la presión del aire debido a funcionamientos irregulares por el compresor. Para ello, se relaciona el consumo de aire real con el teórico, para cada valor de presión, a través de la siguiente expresión:

$$Q_{REAL} = (Q_{TEÓRICO} + Q_{CASCO}) \cdot (1 + f_S) \quad (3.1)$$

Siendo:

- Consumo de aire real en  $m^3/min$ ,  $Q_{REAL}$
- Consumo de aire teórico en  $m^3/min$ ,  $Q_{TEÓRICO}$
- Consumo de aire para respirar en  $m^3/min$ ,  $Q_{CASCO}$
- Factor de seguridad,  $f_S$

El consumo de aire en para respirar en el casco se establece de  $0,30 m^3/min$ , más de 6 veces la ventilación pulmonar realizada por un adulto en actividades deportivas o de esfuerzo [26]. El factor de seguridad empleado es de un 30%. Ambos valores han sido validados a lo largo de la experiencia en el sector de Couto Maquinaria.



En la Figura 3-4 se grafican los valores obtenidos tras la corrección de teórico a real. Si se comparan ambas gráficas, Figura 3-3 y Figura 3-4, se observa que el aumento de caudal de aire consumido es muy significativo.

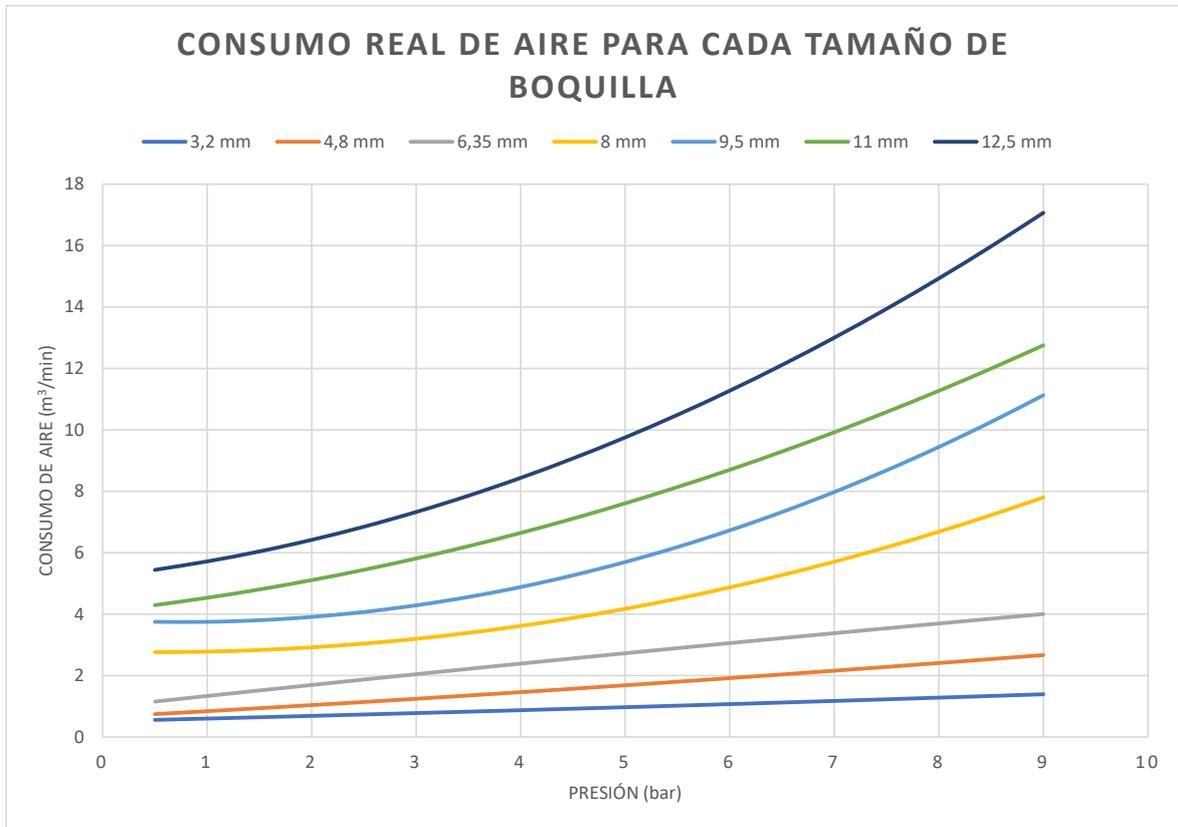


Figura 3-4 - Consumo real de aire

### 3.3.2.- Potencia del compresor

De forma análoga que para el consumo de aire, la Figura 3-5 muestra la potencia teórica necesaria en el compresor para todo el rango de presión y los diferentes tamaños de boquilla. El comportamiento de estas curvas es similar al explicado con anterioridad, con carácter lineal para boquillas pequeñas acentuándose la curva al aumentar su tamaño. Así mismo, a mayor presión mayor potencia necesaria. La única boquilla que resulta peculiar es la de 11 mm, cuya pendiente disminuye a partir de valores cercanos a los 7 bar. Con los datos proporcionados por el fabricante no es posible saberlo, pero una posibilidad es que esta anomalía responda a una evolución más rápida de la función en esta boquilla que en las demás, lo que supondría que el resto de las boquillas también presentarían ese comportamiento a presiones fuera del rango superior.

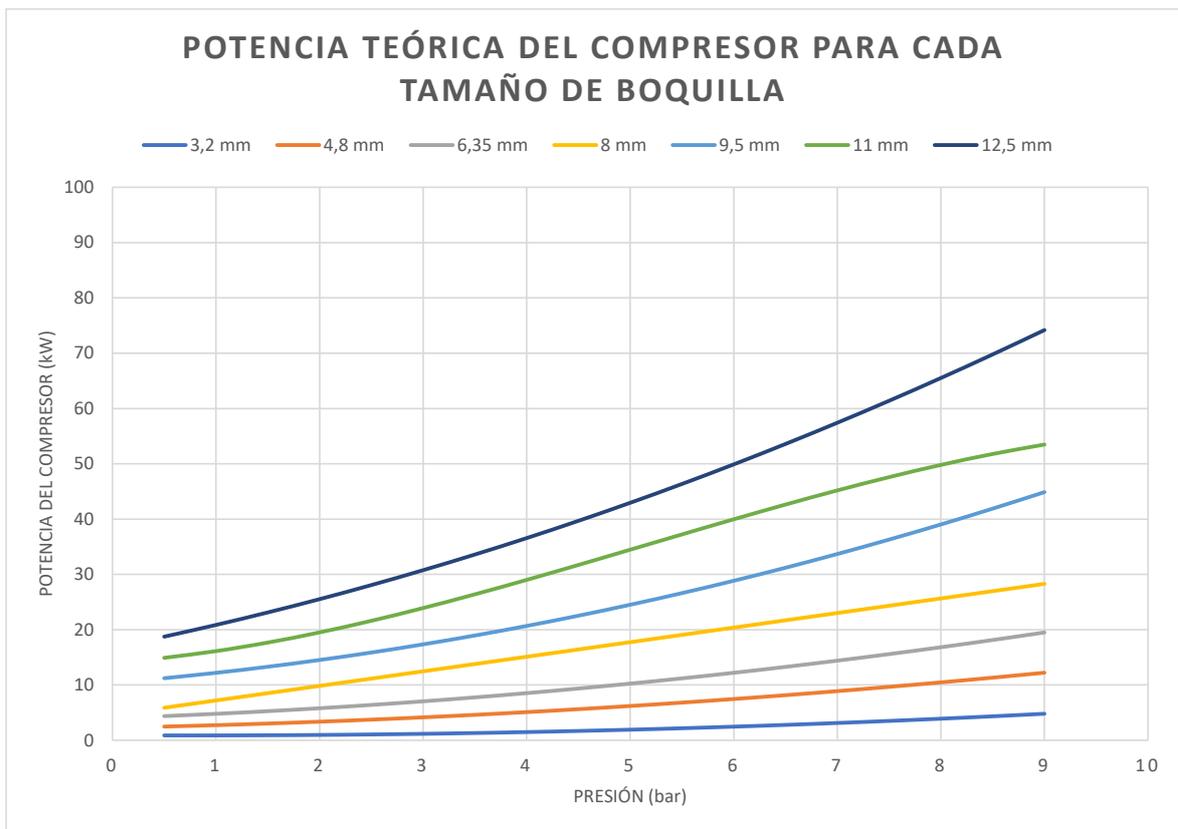


Figura 3-5 - Potencia teórica de compresor

La potencia requerida en el compresor está condicionada por el consumo de aire. Así, es necesario corregir la potencia teórica suministrada por el fabricante en consonancia con el consumo real de aire planteado. La potencia real para cada valor de presión queda definida como:

$$W_{REAL} = W_{TEÓRICA} \cdot \frac{Q_{REAL} - Q_{TEÓRICO}}{Q_{REAL}} \quad (3.2)$$

Donde:

- Potencia real en kW,  $W_{REAL}$
- Potencia teórica en kW,  $W_{TEÓRICA}$

Es decir, la potencia real es igual que la teórica incrementada en la misma magnitud que se incrementa el consumo real de aire con respecto al teórico para cada presión. Los valores corregidos son representados en la gráfica de potencia real para cada tamaño de boquilla indicada en la Figura 3-6.

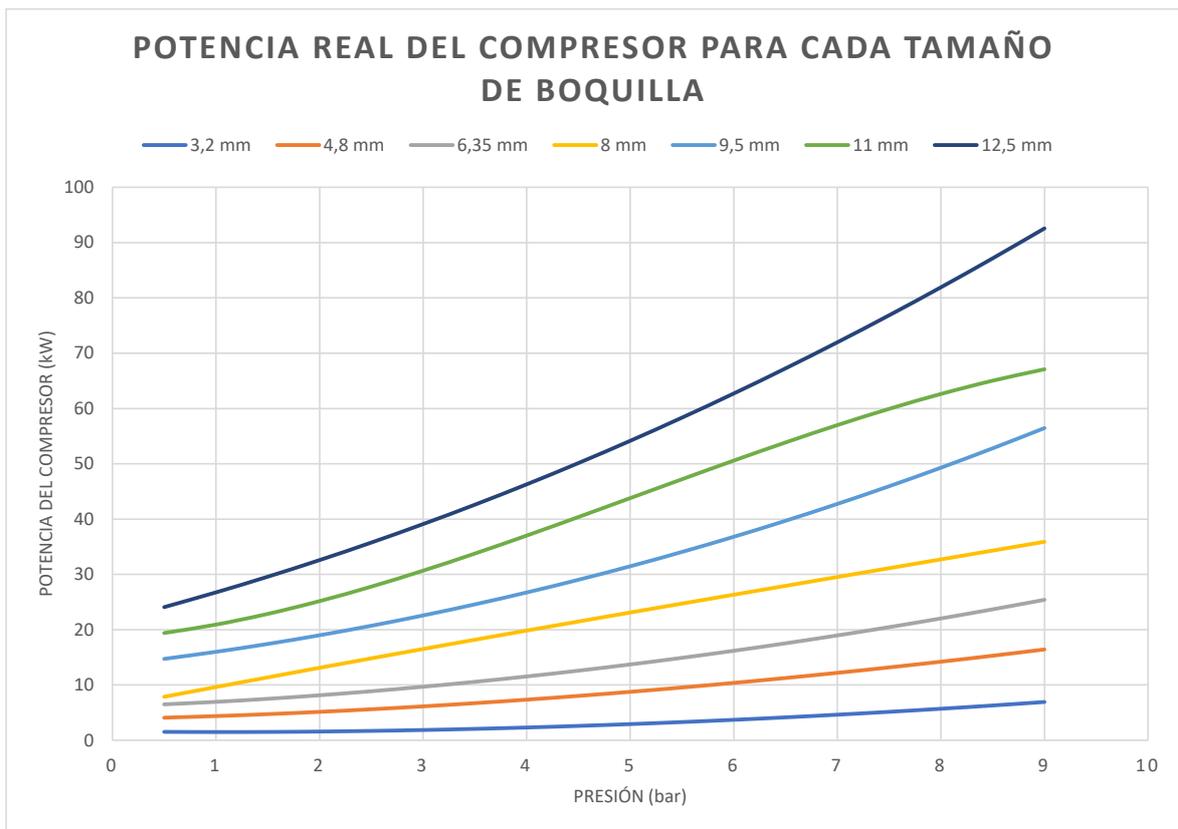


Figura 3-6 - Potencia real de compresor

### 3.3.3.- Consumo de abrasivo

Los datos de consumo de abrasivo en función de la presión de trabajo y boquilla empleada presentan un comportamiento similar a los de las características anteriores. Como aspecto diferenciador sus funciones son más lineales que las de potencia o consumo de aire. Estos datos se pueden observar en la gráfica representada en la Figura 3-7.

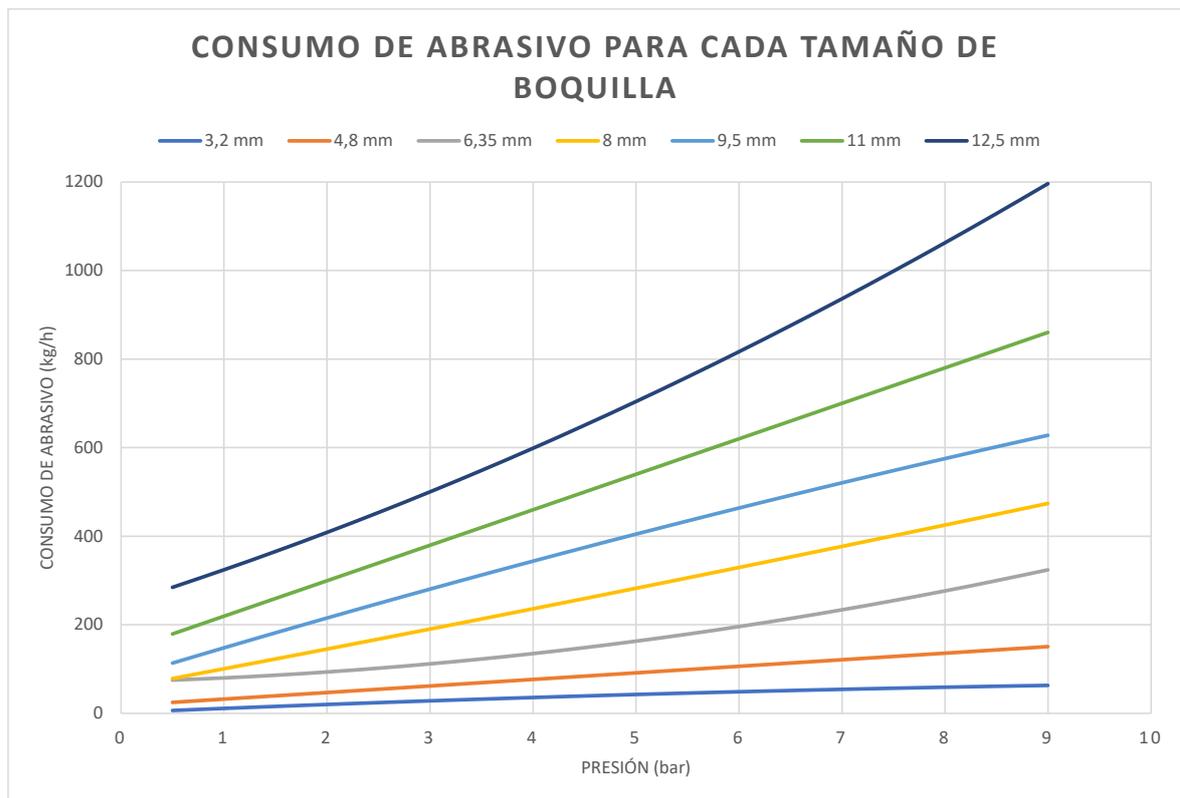


Figura 3-7 - Consumo de abrasivo

### 3.4.- Rendimiento del equipo

En chorro abrasivo el rendimiento o productividad se define como la cantidad de superficie trabajada en  $m^2$  durante una hora alcanzando cierto grado de limpieza. Se trata de un valor complejo de determinar ya que no sólo depende del equipo empleado y la presión, también del material abrasivo, la habilidad del operario o del estado previo al chorreo de la superficie a tratar.

En equipos de chorro abrasivo cuando se trabaja sobre superficies de acero este rendimiento está asociado al método de evaluación visual desarrollado en la norma ISO 8501 [27]. Inicialmente establece patrones desde A hasta D, de menor a mayor corrosión. Estos niveles definen los grados de oxidación en los que se encuentran inicialmente la superficie de acero a tratar. Por otra parte, adjunta patrones gráficos para cada nivel de limpieza en función del grado de oxidación inicial. Así, los niveles de limpieza para chorro abrasivo de menor a mayor intensidad serán: SA 1, SA 2, SA 2 ½ y SA 3. La normativa también recoge niveles de limpieza cuando esta se realiza de forma manual y mecánica o mediante llama que no son objeto de estudio en el presente proyecto.

En Couto Maquinaria se trabaja con unos valores de productividad promedios para un trabajo de chorro a 8 bar, en función del tamaño de la boquilla y el grado de limpieza final como los graficados en la Figura 3-8. De esta gráfica se aprecia:



- Para mismo grado de limpieza se obtienen mayores rendimientos cuanto mayor sea el diámetro de la boquilla empleada.
- A mismo tamaño de boquilla la productividad desciende con al aumentar las exigencias en cuanto a niveles de limpieza final.

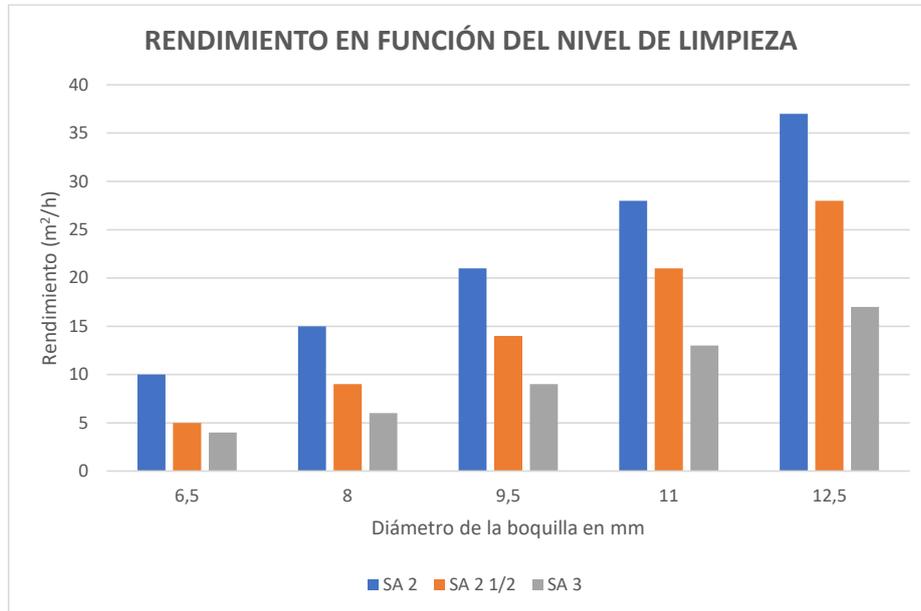


Figura 3-8 - Rendimiento aproximado a 8 bar en función del nivel de limpieza

Aplicando lo expuesto al caso del equipo de chorreado de baja presión, se puede suponer que el rendimiento que estas máquinas obtienen es inferior al que presentan sus equivalentes a presión estándar. La primera penalización proviene por el tamaño de boquillas empleadas en baja presión, que suelen ser de diámetros inferiores a 6,5 mm. Por otra parte, tal y como está definido el rendimiento, trabajar a altas presiones beneficia ya que permite acabar las labores con mayor rapidez. Esto va en contra de la naturaleza intrínseca de los equipos de baja presión, diseñados específicamente para trabajos de detalle por debajo de los 3 bar. Así y todo, la única forma mediante la cual es posible conocer este parámetro es mediante ensayo.



## 4.- FABRICACIÓN DE EQUIPO DE CHORREADO DE BAJA PRESIÓN

Una vez se han definido todos los elementos que conforman el equipo de chorro abrasivo manual de baja presión y se ha realizado el diseño paramétrico en 3D en la herramienta Autodesk Inventor, se procede a comentar el proceso de fabricación llevado a cabo.

El proceso de fabricación planteado para los equipos de chorro abrasivo a baja presión es a demanda, pero asegurando stock, exactamente el mismo que ya se viene haciendo para toda la serie Racohi de presión estándar en Couto Maquinaria. Así, se pretende tener siempre entre uno y dos equipos totalmente montados y disponibles para su venta de cada uno de los existentes de la serie de tamaños de depósito. En el momento en el que se proceda a la venta de ese stock se pondrá en marcha la fabricación de otro que lo sustituya.

Se trata de fabricación totalmente manual en el taller de las instalaciones de Couto Maquinaria. El primer paso consiste en el ensamblaje de todos los elementos conformantes del sistema neumático de tubería rígida. Para asegurar la máxima hermeticidad se emplea teflón en las roscas. Tras un primer lijado y protección de elementos que no se desean pintar, como el regulador de presión o las válvulas, se procede a imprimir la superficie del equipo en la cabina de pintura. Este proceso de lijado e imprimación asegura una alta durabilidad y calidad en la aplicación posterior de pintura. Para poder pintar el equipo debe dejarse madurar la capa imprimada durante doce horas. Previo a proceder a pintar el equipo se debe inspeccionar posibles fallos en la imprimación que puedan afectar al acabado superficial final. La capa de pintura requiere un tiempo de secado de inferior duración que la imprimación.

En cuanto al nivel de producción, será necesario al menos un día y medio por cada equipo fabricado. Es necesario indicar que el tiempo de trabajo sobre cada unidad no es ese, teniendo en cuenta los tiempos de secado de los productos de imprimación y pintura. Es decir, mientras que un equipo está secándose, si fuese necesario se podría seguir fabricando otro paralelamente.

### 4.1.- Certificaciones

En Couto Maquinaria se sigue un riguroso sistema de gestión de calidad [28] certificado por Lloyd's [29] y basado en la norma ISO 9001:2015 [30].

Con la finalidad de asegurar la calidad de los productos fabricados y diferenciarse de empresas del entorno, los equipos de chorro abrasivos obtienen certificación CE [31] de forma íntegra. Esto quiere decir que todos los elementos que componen la máquina han sido certificados. En muchos casos, equipos comerciales de otras marcas sólo obtienen esta distinción para el depósito.



El mercado CE, aunque no siempre es obligatorio, asegura que el producto a comercializar cumple con la legislación obligatoria y requisitos en términos sanitarios, de seguridad y medioambiente que se exigen en la Unión Europea. El equipo de responsabilidad de producto de Couto Maquinaria es el que se encarga de realizar las gestiones necesarias para su obtención, recurriendo a Lloyd's como organismo notificado. Para ello, además de realizar la documentación técnica necesaria, el organismo notificado realiza test de prueba en conformidad con la Directiva de Equipos a presión 2014/68/UE a una muestra de los equipos de chorro fabricados. Este proceso se renueva de forma anual.

Con la finalidad de mantener los estándares de calidad que rigen el trabajo en Couto Maquinaria, la nueva serie de equipos de chorro abrasivo de baja presión serán propuestos para esta certificación.



## 5.- COMPARATIVA ENTRE EQUIPOS DE CHORREADO ESTÁNDAR Y DE BAJA PRESIÓN

En este capítulo se aborda un estudio comparativo entre un equipo de chorro abrasivo y su homólogo de presión estándar en diferentes puntos de trabajo en cuanto a tipos de boquilla y diámetro, presión de trabajo, material abrasivo empleado y tipo de compresor. Este estudio paramétrico es realizado mediante una herramienta de cálculo desarrollada en Excel. El objetivo es calcular los diferentes ahorros y gastos económicos al trabajar con uno u otro equipo. Así mismo, se plantea la viabilidad económica para los mismos escenarios planteados.

Todo este estudio está enfocado en mejorar la comercialización de la serie de equipos de chorro manual abrasivo a baja presión. En algunos casos, ya sea por ignorancia ante el funcionamiento de este tipo de máquinas o por querer seguir con equipos ya conocidos, potenciales usuarios de baja presión acaban comprando máquinas de presión estándar.

En cuanto al desarrollo del capítulo, inicialmente se expone la herramienta implementada en Excel, explicando las suposiciones tomadas y los datos de partida. Posteriormente se procede al estudio paramétrico donde se comparan económicamente diferentes casos de baja presión y equipos estándar. Para finalizar se expone el estudio de viabilidad.

### 5.1.- Herramienta de cálculo

En la Figura 5-1 se ejemplifica el entorno gráfico de la herramienta de cálculo desarrollada en Excel. Imponiendo los datos del tipo de equipo deseado en las casillas de color gris es posible obtener el resto de los valores. Los datos necesarios están restringidos a su rango de trabajo en función de si el equipo es de baja presión o estándar. La presión permite también un cálculo para el promedio de los rangos de trabajo habitual. Como se puede observar en la figura, el objetivo es la obtención de ahorros en cuanto a términos de consumo energético y de abrasivo por jornada, compra de manguera, boquilla, equipo y compresor y vida útil de manguera y boquilla.

En este apartado se procederá a explicar los cálculos necesarios para que esta herramienta sea funcional, así como los datos y suposiciones empleados.



CALCULADORA			CONSUMOS			
			ENERGÍA		ABRASIVO	
	Tamaño de la boquilla (mm)	Rango de presión (bar)	Consumo (kW·h)	Coste (€)	Consumo (kg)	Coste (€)
Baja presión	4,8	0,5-3,0	26,22	2,90	164,06	139,19
Estándar	9,5	6,0-9,0	247,02	27,32	2186,80	251,92
Compresor	Eléctrico	Ahorro	(kW·h)	220,79	(kg)	2022,75
			(€)	24,42	(€)	112,73
			(%)	89%	(%)	45%
COMPRA						
MANGUERA		BOQUILLA		EQUIPO	COMPRESOR	
	Longitud (m)	Coste (€)	Tipo	Coste (€)	Coste (€)	Coste (€)
Baja presión	25	286	C. tungsteno corto	59,67	6278,44	5021,5
Estándar	-	464,5	C. tungsteno largo	131,58	3139,22	31218
Ahorro	(€)	178,5	(€)	71,91	-3139,22	26196,5
	(%)	38%	(%)	55%	-100%	84%
VIDA ÚTIL						
MANGUERA		BOQUILLA				
	Incremento vida útil		Incremento vida útil			
	(%)	(h)	(%)	(h)		
Baja presión	92%	462,49	92%	379,24		
Ahorro	(€)	429,65	(€)	121,71		
	debido al incremento de la vida útil, al final de la misma					

Figura 5-1 - Entorno gráfico de calculadora

## 5.1.1.- Consumos

Los consumos de energía y abrasivo son calculados gracias a las características de cada boquilla a una determinada presión presentadas en el capítulo 3.-Características de equipo de chorreado. Además, su cálculo se realiza para una jornada de trabajo de 8h/jornada con una ocupación en labores de chorreado del 50%.

### 5.1.1.1.- Consumo de energía por jornada

El consumo energético es calculado, como:

$$E_E = W_{REAL} \cdot Jornada \cdot Ocupación/\eta \quad (5.1)$$

Donde:

- Energía consumida en kW·h,  $E_E$
- Rendimiento en términos porcentuales,  $\eta$ . Para equipos eléctricos su valor se toma del 75% [32] y para equipos de gasóleo del 50% [33].

Su coste económico se calcula de forma diferente si el compresor es eléctrico o si es de gasóleo. Para los últimos:



$$E_{CG} = E_E \cdot C_G / PCI \cdot \rho \quad (5.2)$$

Donde:

- Coste consumo energético en €/jornada,  $E_{CG}$
- Coste litro de gasóleo en €/l,  $C_G$ . Con un valor promedio de 1,20 €/l [34]
- Poder calorífico inferior en kW·h/kg,  $PCI$ . Con un valor de 11,94 kW·h/kg [35]
- Densidad del combustible en kg/l,  $\rho$ . Su valor es de 0,85 kg/l [35]

Para equipos eléctricos:

$$E_{CE} = W_C \cdot t_W \cdot f_W + E_E \cdot t_E \quad (5.3)$$

Con:

- Coste de consumo energético en €/jornada,  $E_{CE}$
- Potencia del compresor en kW,  $W_C$ . Su valor será el correspondiente al de la presión máxima de trabajo para cada rango de presión y boquilla seleccionada, en función del tipo de equipo. Se asegura el poder trabajar a distintas presiones.
- Término de potencia en €/kW,  $t_W$ . Con valor de 0,0766 €/kW se corresponde al término de potencia contratada [36].
- Factor de uso de potencia en porcentaje,  $f_W$ . Con un valor del 10%, se aplica sobre el término de potencia. Este término se contrata teniendo en cuenta la potencia máxima simultánea en la instalación industrial. En una empresa del sector no sólo se tiene un equipo de chorro abrasivo, ante esta suposición sólo se computa el coste del 10% del término de potencia.
- Término de energía en €/kW·h,  $t_E$ . Con valor de 0,1182 €/kW se corresponde al término de potencia contratada [36].

Para los términos de energía y potencia se supone una tarifa de tres periodos con potencia contratada superior a 15 kW. Los dos términos se promedian como si el consumo fuese homogéneo durante los tres periodos para su simplificación.

### 5.1.1.2.- Consumo de abrasivo por jornada

Por otra parte, el consumo de abrasivo es calculado como:

$$A_A = M_A \cdot Jornada \cdot Ocupación \quad (5.4)$$

Donde:

- Consumo de abrasivo en kg/jornada,  $A_A$
- Consumo de abrasivo en kg/h,  $M_A$ . Se trata del consumo de abrasivo característico de cada boquilla a un valor determinado de presión de trabajo.

En magnitudes económicas su valor se calcula como:

$$A_C = A_A \cdot C_A \quad (5.5)$$



Con:

- Consumo de abrasivo en €/jornada,  $A_C$ .
- Precio promedio del material abrasivo en €/kg,  $C_A$ . Para baja presión 0,85 €/kg y para presión estándar 0,12 €/kg. En presión estándar promedio del coste de la granalla de acero angular y redonda, y en baja presión del resto de abrasivos.

El precio promedio del abrasivo depende de si se trata del equipo de trabajo de baja presión o de presión estándar. Su cálculo responde a:

$$C_A = f_I \cdot \left(1 - \frac{C_H}{C_M}\right) \cdot p_A \quad (5.6)$$

Donde:

- Factor de tamaño de compra en porcentaje,  $f_I$ . Del 80%, se trata de una rebaja habitual por el tamaño de la compra de abrasivo.
- Ciclos habituales de reutilización,  $C_H$ . Veces que se reutiliza habitualmente un abrasivo.
- Ciclos máximos de reutilización,  $C_M$ . Veces máximas que se podría reutilizar un abrasivo.
- Coste promedio del material abrasivo en €/kg,  $p_A$

Estos tres últimos componentes se adjuntan en la Tabla 5-1 y son facilitados por Couto Maquinaria. En resumen, se calcula  $C_A$  para cada material abrasivo según lo explicado en la última ecuación. Luego se promedia para obtener el precio si se trabaja a baja presión o a estándar.

Tabla 5-1 - Precio medio de abrasivos

PRECIO MEDIO ABRASIVOS			
Abrasivos	Precio (€/kg)	Ciclos máximos	Ciclos habituales
Bicarbonato de sodio	1,23	1	1
Microesfera de vidrio	1,07	25	5
Corindón blanco	2,07	25	5
Silicato de aluminio	0,5	1	1
Granalla de acero angular	1,05	1200	1000
Granalla de acero redonda	1,13	2000	1800

En este último cálculo se realiza una corrección en función de la reutilización del material abrasivo. Es una característica de los abrasivos de mayor dureza, que no se rompen una vez chorreados. Su reutilización es típica en chorreo estándar y requiere de equipos específicos para su aspiración y recolección. Es por esto que el factor de utilización repercute en el valor bajando su precio de forma moderada. La reutilización implica mayores inversiones en equipos industriales, así como consumo energético.



## 5.1.2.- Compra

En cuanto a la compra se comparan los costes de comprar el propio equipo de chorro estándar o de baja presión, la manguera de chorro, la boquilla y el compresor.

### 5.1.2.1.- Compra de equipo de chorro

Un equipo de chorro abrasivo manual de la marca Racohi de 60 l tiene un precio de catálogo de 3139,22 €. Se escoge el modelo de la serie con válvula dosificadora de abrasivo Thompson II y sin manguera de chorro ni boquilla, cuyo precio se analizará por separado. Las estimaciones sobre el precio de venta del equipo de baja presión aportadas por el equipo de ventas de Couto Maquinaria son del doble del equipo estándar, con un precio de 6278,44 €.

La compra de un equipo de baja presión, para cualquier caso a comparar será siempre un gasto mayor que para equipos estándar. Es decir, no reportará ningún ahorro.

### 5.1.2.2.- Compra de manguera

El precio lineal de la manguera de chorro depende de su diámetro. A su vez, este es dimensionado en función del diámetro de la boquilla empleada, como se ha explicado en el punto 2.2.3.1.-Manguera de chorro. Así, si la longitud de la misma no supera los 20 m el diámetro será tres veces el de la boquilla. A partir de los 20 m será cuatro veces mayor. Los precios empleados para su cálculo son los de la manguera extra-premium de Racohi, Tabla 5-2.

Tabla 5-2 - Precio manguera de chorro extra-premium Racohi

MANGUERA	
D (mm)	Precio (€/m)
50	30,29
42	21,38
38	18,58
32	14,15
25	11,44
19	11,13
13	10,13

Conocidos los valores de longitud de manguera de chorro y boquilla empleada, ya que se tratan de los datos de entrada de la calculadora, el coste de compra de manguera es conocido. Se obtiene multiplicando la longitud de la manguera de chorro por su precio unitario, que será distinto entre los equipos de chorro de baja presión y los estándares cuando empleen diferentes tamaños de boquilla.



### 5.1.2.3.- Compra de boquilla

El diámetro y tipo de la boquilla forman parte de los datos de entrada de la calculadora. Conocidos estos, y acudiendo a los precios ofertados para las boquillas Racohi (Tabla 5-3) se obtiene de forma inmediata el coste de compra de la boquilla.

Tabla 5-3 - Precio boquillas Racohi

BOQUILLA			
D (mm)	Precio (€)		
	Carburo de tungsteno		Syclone
	Largo	Corto	Largo
3,2	-	59,67	-
4,8	100	59,67	-
6,35	103,42	59,67	184,8
8	109,03	59,67	198
9,5	131,58	59,67	211,2
11	167,28	59,67	244,36
12,5	225,56	59,67	300,78

### 5.1.2.4.- Compra de compresor

La compra del compresor sólo será necesaria en casos en los que el usuario de chorro no posea ya uno. Con la finalidad de abarcar todas las posibilidades su gasto es considerado. En la Tabla 5-4 se adjuntan los precios para compresores eléctricos y de gasóleo facilitados por proveedores de Couto Maquinaria [37] [38] en función de la potencia.

Tabla 5-4 - Precio de compresores en función de su potencia

COMPRESOR		
Potencia (kW)	Precio (€)	
	Eléctrico	Gasóleo
93	41745	44770
57	31218	35453
26	12342	15064,5
10	6642,9	11979
6,5	5021,5	3902,25
2	4598	2734,6

La potencia del compresor es la potencia real que se ha explicado anteriormente en 3.3.2.-Potencia del compresor. Para una determinada boquilla, en un determinado tipo de equipo, la potencia del compresor se supone como la indicada para potencia real del compresor a la presión máxima de trabajo del rango habitual de ese tipo de equipo. Es decir, considerando un valor máximo de presión de 3 bar para la baja presión, el compresor seleccionado será el de la potencia necesaria para la boquilla empleada a esa presión, aunque el dato de entrada de presión de trabajo sea inferior. Se realiza esta suposición para darle



más realidad al cálculo de los costes, donde es posible que se compre un compresor ligeramente sobredimensionado que permita trabajar en un rango acotado de presiones.

### **5.1.3.- Vida útil**

Debido a la disminución de consumo de material abrasivo, el menor sometimiento a altas presiones y el empleo de abrasivos de menor dureza, las mangueras de chorro y las boquillas de equipos de baja presión verán su vida útil prolongarse. Este incremento se convierte en un ahorro de compra de una nueva manguera o boquilla, en función del caso, si se compara con el mismo número de horas de trabajo en una máquina estándar.

#### **5.1.3.1.- Manguera**

La vida útil de una manguera de chorro promedio tiene un valor de 500 h [23]. Conocido el ahorro en términos porcentuales de material abrasivo, se considerará igual al incremento de vida útil. El incremento en horas se calcula como la vida útil de la manguera multiplicada por el incremento porcentual. Finalmente, el ahorro en manguera por vida útil se calcula como el producto de la longitud de la manguera por su coste lineal, por el incremento de vida útil en horas entre la vida útil media de la manguera.

#### **5.1.3.2.- Boquilla**

Análogo a lo explicado para la manguera de chorro. La vida útil de una boquilla tiene un valor promedio, que variará en función del material abrasivo empleado, de 410 h para carburo de tungsteno y 675 h para syclone [25]. Conocido el ahorro en términos porcentuales de material abrasivo, se considerará igual al incremento de vida útil. En horas, el incremento se calcula como la vida útil de la boquilla multiplicada por el incremento porcentual. Por último, el ahorro por vida útil se calcula como el producto del coste de la boquilla por el incremento de vida útil en horas entre su vida útil media.

## **5.2.- Estudio paramétrico**

Una vez explicado el funcionamiento de la herramienta desarrollada en Excel para el cálculo de los ahorros al emplear equipos de baja presión en lugar de estándar, se procede al estudio paramétrico. Este análisis consiste en plantear diferentes casos o situaciones para equipos de baja y presión estándar, introducir los datos en la calculadora y evaluar los potenciales ahorros.

Así, se plantean un total de nueve casos que resumen los datos de partida en la Tabla 5-5. Los tres primeros corresponden a la variación del diámetro de boquilla, dentro del rango adecuado para cada equipo, para una presión de trabajo promedio. Es decir, los datos de entrada para los tres primeros casos son:

- Boquilla: diámetros indicados en la tabla, carburo de tungsteno corto para baja presión y largo para presión estándar.
- Manguera de chorro: longitud de 25 m.



- Compresor de tipo eléctrico.

Los casos 4 a 6 comparten todos los datos de partida con los tres primeros a excepción del tipo de compresor, que es de gasóleo. Estos 6 casos, separándolos por naturaleza del compresor permiten evaluar la influencia del tamaño de la boquilla en los ahorros conseguidos, y comparando casos 1-4, 2-5 y 3-6 la influencia del tipo de compresor.

Los casos número 7, 8 y 9 trabajan con un compresor eléctrico y las boquillas más pequeñas para cada equipo. Como se indica en la Tabla 5-5, el parámetro que varía es la presión de trabajo. Las boquillas son de carburo de tungsteno corto para baja presión y largo para alta, con longitud de 25m de manguera de chorro.

Tabla 5-5 - Resumen de casos estudiados

ESTUDIO PARAMÉTRICO		
Variación de diámetro de la boquilla		
Con compresor eléctrico, rango promedio de presión		
Caso 1	Baja presión	3,2 mm
	Estándar	6,35 mm
Caso 2	Baja presión	4,8 mm
	Estándar	9,5 mm
Caso 3	Baja presión	6,35 mm
	Estándar	12,5 mm
Variación de diámetro de la boquilla		
Con compresor de gasóleo, rango promedio de presión		
Caso 4	Baja presión	3,2 mm
	Estándar	6,35 mm
Caso 5	Baja presión	4,8 mm
	Estándar	9,5 mm
Caso 6	Baja presión	6,35 mm
	Estándar	12,5 mm
Variación de la presión de trabajo		
Con compresor eléctrico, boquilla de 3,2mm BP y 6,35mm PE		
Caso 7	Baja presión	0,5-3,0 bar
	Estándar	6,0-9,0 bar
Caso 8	Baja presión	0,5 bar
	Estándar	6,0 bar
Caso 9	Baja presión	2,0 bar
	Estándar	8,0 bar

## 5.2.1.- Resultados

Para una comparación y evaluación más sencilla de los resultados obtenidos durante este análisis se presentan las gráficas de columna agrupadas por tipo de ahorro.

### 5.2.1.1.- Ahorro en consumos

Se trata del ahorro por jornada en consumo energético y en abrasivo.



En la Figura 5-2 se grafican los ahorros por jornada obtenidos en todos los casos planteados. Evaluando tanto los casos de 1 a 3 como de 4 a 6 se observa una tendencia a obtener mayores ahorros en energía. Esto se debe a que a el incremento de necesidades de consumo de aire aumenta significativamente con el tamaño de la boquilla, lo que repercute en el requerimiento energético. Si se comparan por parejas análogas los casos 1-4, 2-5 y 3-6, se puede concluir que los ahorros en energía son mayores cuando se necesita un compresor de combustible que uno eléctrico. Es algo coherente con la mayor ineficiencia energética a presentada por los compresores de gasóleo, el uso de uno de menor potencia se nota más en ese caso. Las situaciones 7 a 9 permiten concluir que, de forma habitual, el ahorro logrado por jornada en energía ronda los 10 €.

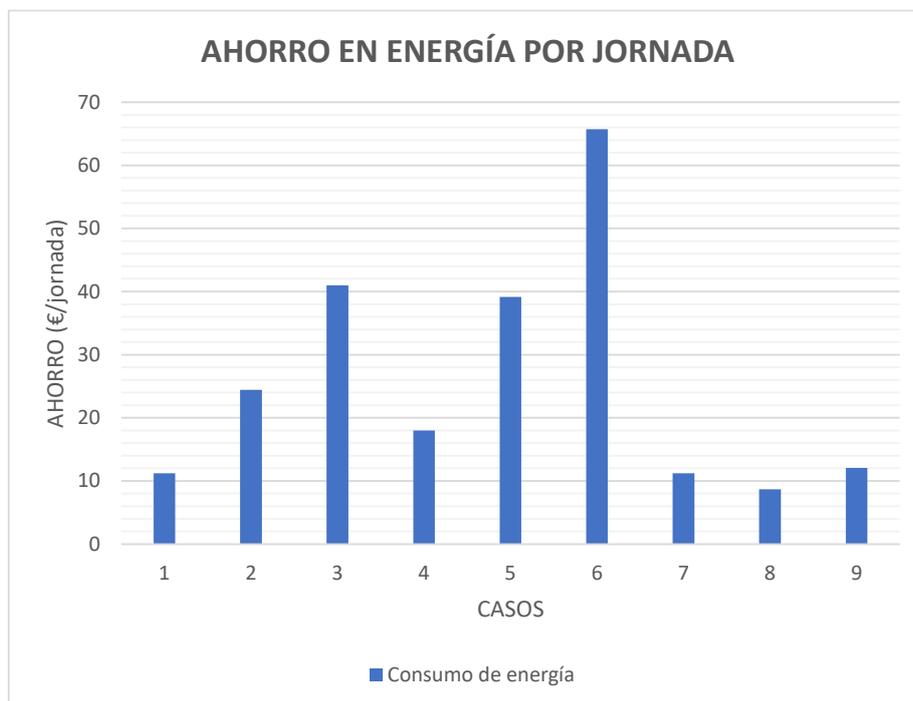


Figura 5-2 - Ahorro en energía por jornada

En cuanto a consumo de abrasivos, su ahorro se indica en la Figura 5-3, comprimiendo por parejas análogas los casos 1-4, 2-5 y 3-6 ya que los resultados son los mismos. De forma análoga al consumo de energía, se aprecia un incremento de ahorro a medida que se aumenta el tamaño de la boquilla debido al impacto que tiene este sobre el consumo de abrasivo. Si se comparan estos valores con los de ahorro de energía, se puede determinar que el precio de abrasivo y su consumo por jornada es más determinante a la hora de lograr un buen resultado en cuanto a ahorro económico. Un valor promedio de ahorro por jornada lo reportan los casos 7 a 9, en el entorno de los 60 €.



Figura 5-3 - Ahorro en abrasivo por jornada

### 5.2.1.2.- Ahorro en manguera y boquilla

Los ahorros en manguera y boquilla se grafican en la Figura 5-4. Se tienen en consideración tanto ahorros por compra como por vida útil. En ambos elementos el ahorro en vía útil es mayor que en compra, suponiendo al menos 300 € ahorrados en manguera y 100 € en boquillas.

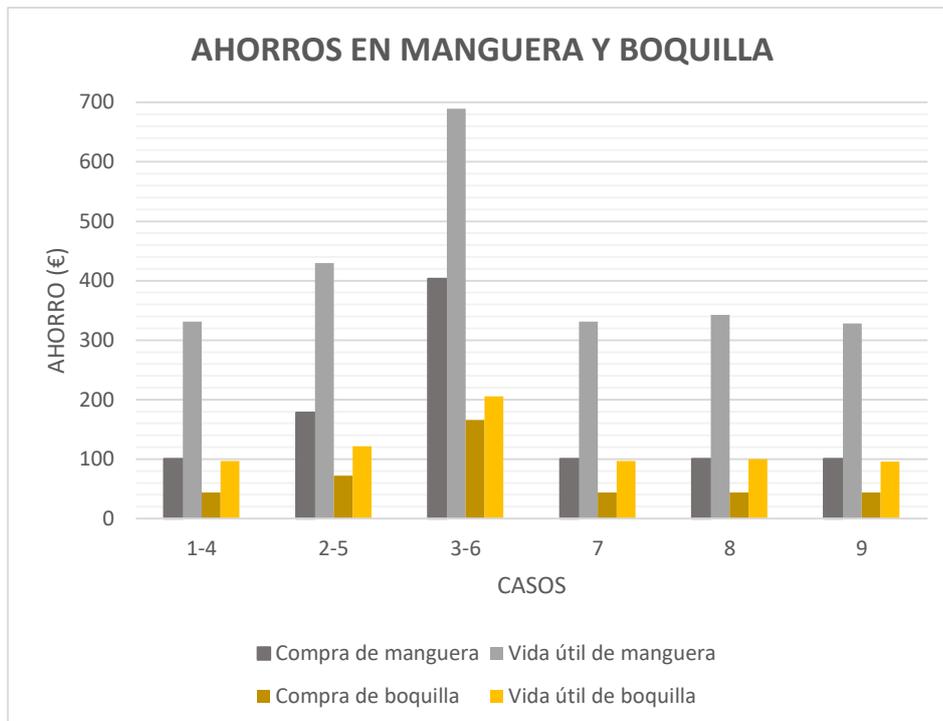


Figura 5-4 - Ahorros en manguera y boquilla



Además, tanto en vida útil como en compra, el ahorro en manguera es significativamente mayor que en boquilla. Esto se debe fundamentalmente su mayor coste.

### 5.2.1.3.- Ahorro en compra de compresor

El ahorro en compra de compresor sólo se dará en los casos que el usuario de chorro no posea ya uno. Los ahorros para cada caso se grafican en la Figura 5-5. Se trata de ahorros muy grandes en términos económicos debido al elevado coste de compra de un compresor. En general, se ahorran como mínimo 6000 € y hasta más de 20000 €. No se aprecia una diferencia sustancial en cuanto a naturaleza energética.



Figura 5-5 - Ahorro en compra de compresor

### 5.2.1.4.- Ahorros porcentuales

Para poder tener en cuenta todos los ahorros descritos hasta el momento en términos relativos y no en absolutos, se indican en la Figura 5-6 los ahorros porcentuales. Es decir, el ahorro de un determinado parámetro en comparación con el coste que se tenía inicialmente en el equipo estándar.

De la gráfica, se concluye que:

- Aunque en términos absolutos no se produce un gran ahorro en energía consumida, sí es el parámetro en el que más se ahorra al emplear equipos de baja presión. Además, se trata de un ahorro constante en el entorno del 90%.



- El consumo de abrasivos, aunque repercute unos ahorros superiores a la energía en términos económicos, tan sólo supone una reducción aproximada del 50% del que se emplea con equipos estándar.
- La manguera, que supone grandes ahorros en su compra en términos absolutos en comparación con las boquillas, en términos relativos se ahorra ligeramente más boquillas.
- El ahorro en compra de compresor comparando equipos de baja presión con estándar supone al menos un 60%, pudiendo superar el 80%. Por ello es uno de los puntos clave a la hora de la compra de los equipos de chorreo.

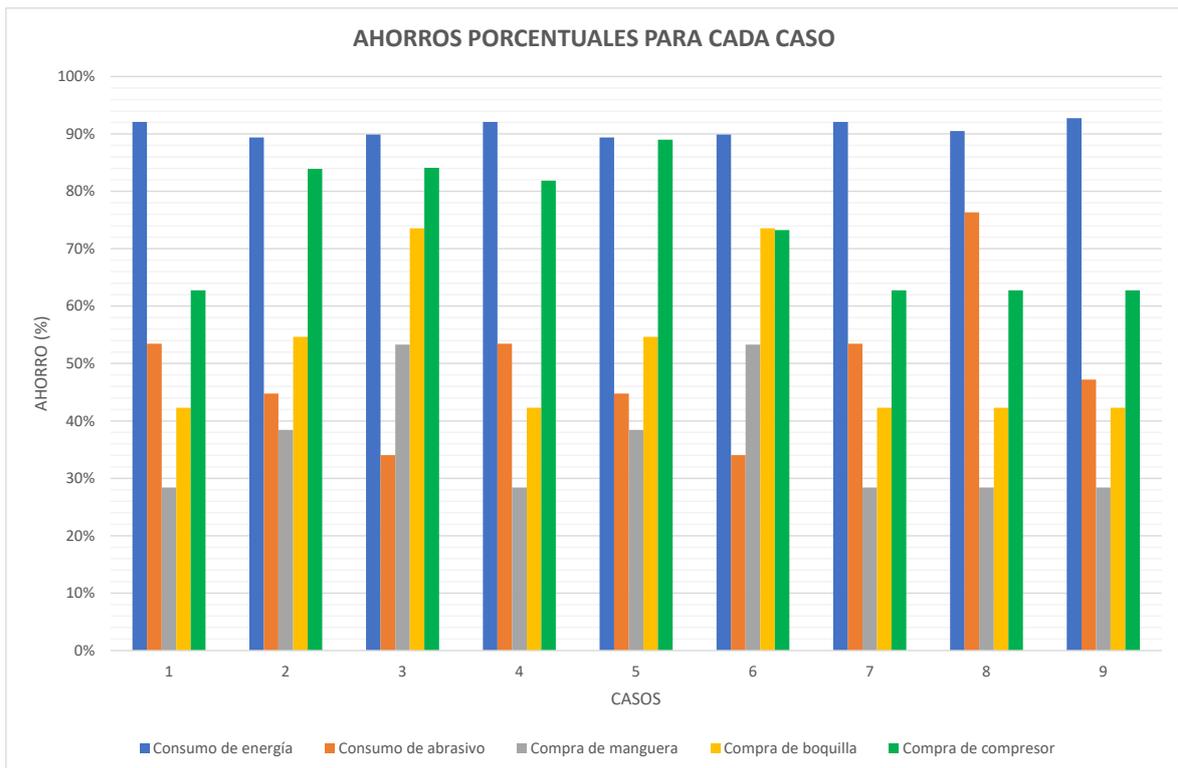


Figura 5-6 - Ahorros expresados porcentualmente

## 5.2.2.- Estudio de viabilidad

El estudio de viabilidad pretende comparar los gastos acumulados a lo largo de varias jornadas para cada caso planteado en este apartado. Su finalidad es evaluar el comportamiento de los equipos de baja presión (BP) con los de presión estándar (PE) a lo largo del tiempo. Se tienen en cuenta las situaciones en las que es necesario comprar compresor (c/compresor) y las que no (s/compresor). En el día inicial se computan las compras de: equipo, compresor (si es necesario), manguera de chorro y boquilla. Cada jornada que pasa se le suma a la anterior el consumo en cuanto a energía y abrasivo, presentando los gastos en acumulado.

De la Figura 5-7 a la Figura 5-15 se grafican los resultados. Como se puede apreciar en las figuras, los equipos de BP son más baratos inicialmente y durante su uso (pendiente



inferior) que los de PE cuando es necesario comprar también un compresor, debido a su alto precio. Cuando no es necesario comprarlo, los equipos BP comienzan siendo más caros, pero debido a su menor coste a lo largo de las jornadas, pasadas entre 15 y 45 jornadas de 8 h al 50% de ocupación los equipos PE comienzan a ser menos viables que los de BP. Se trata de periodos de tiempo aceptables en la industria en cuanto a planificación de un gasto.

A continuación, se muestran todos los casos, emparejando los 6 primeros en sus similares para poder evaluar si existen grandes diferencias temporales en función de la naturaleza energética del compresor requerido. Como se puede observar, las diferencias no son significativas.

### 5.2.3.- Casos 1-4

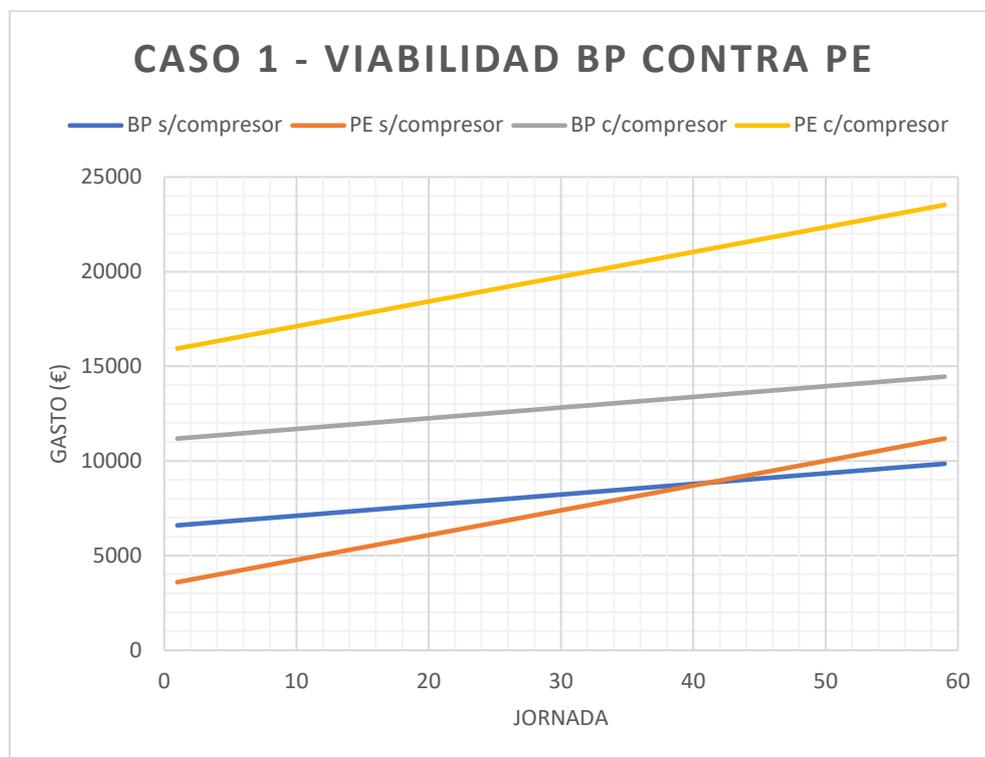


Figura 5-7 - Viabilidad caso 1

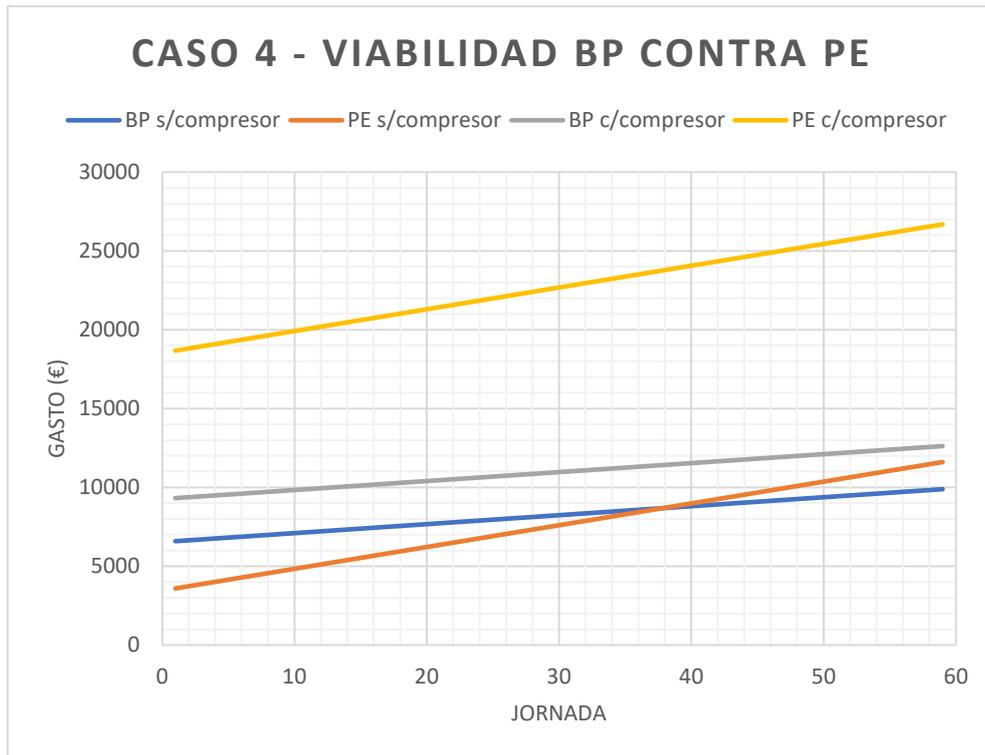


Figura 5-8 - Viabilidad caso 4

## 5.2.4.- Casos 2-5

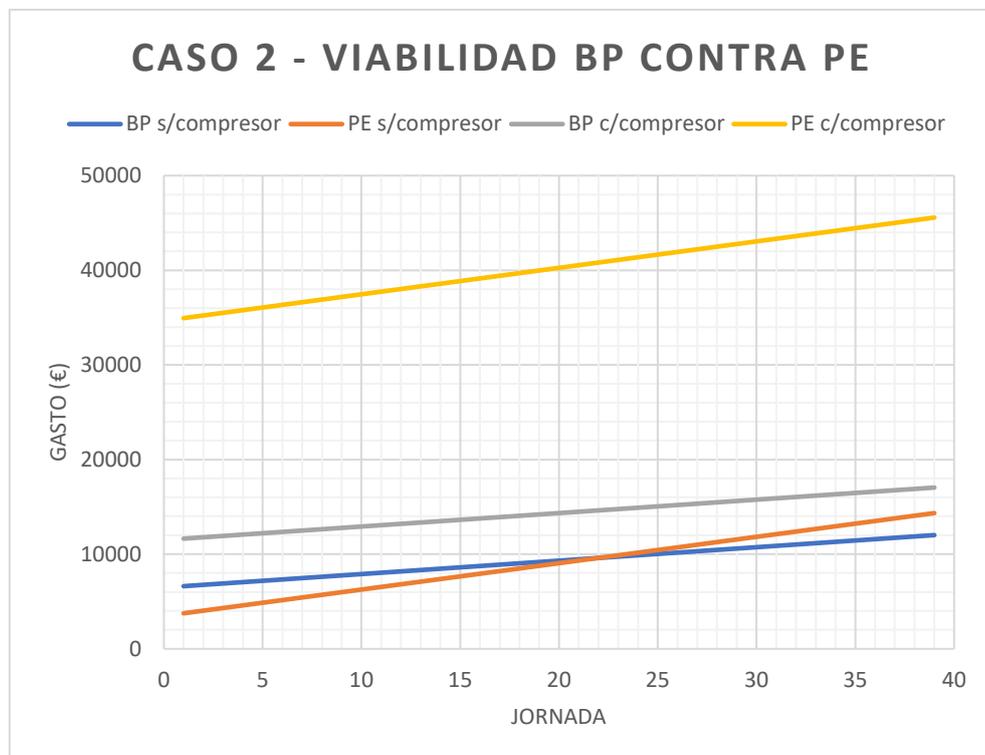


Figura 5-9 - Viabilidad caso 2

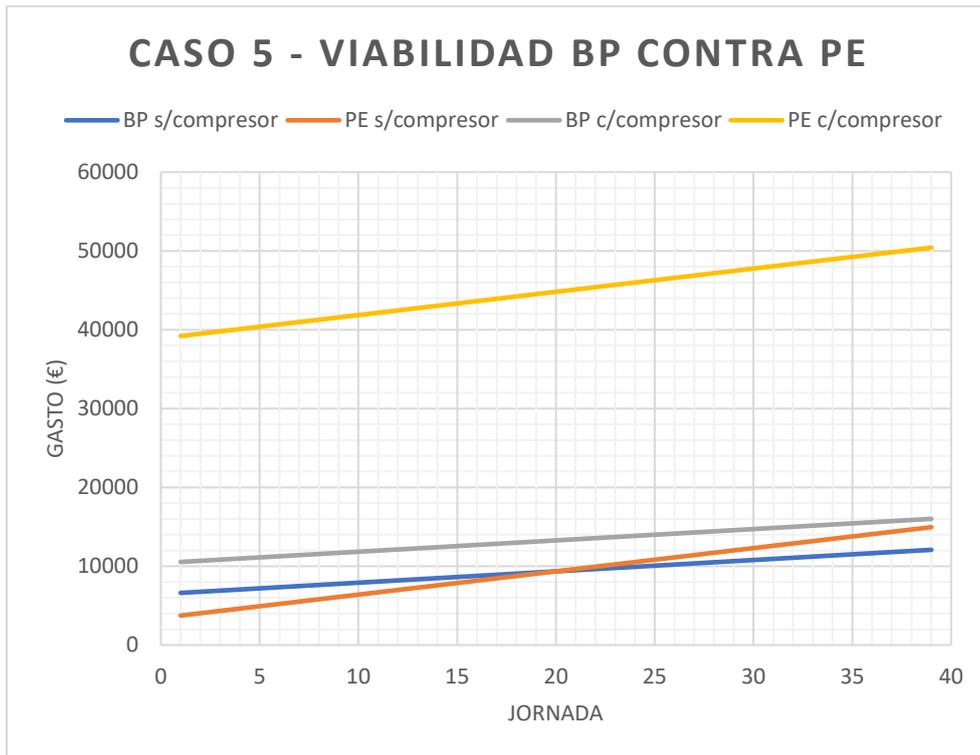


Figura 5-10 - Viabilidad caso 5

## 5.2.5.- Casos 3-6

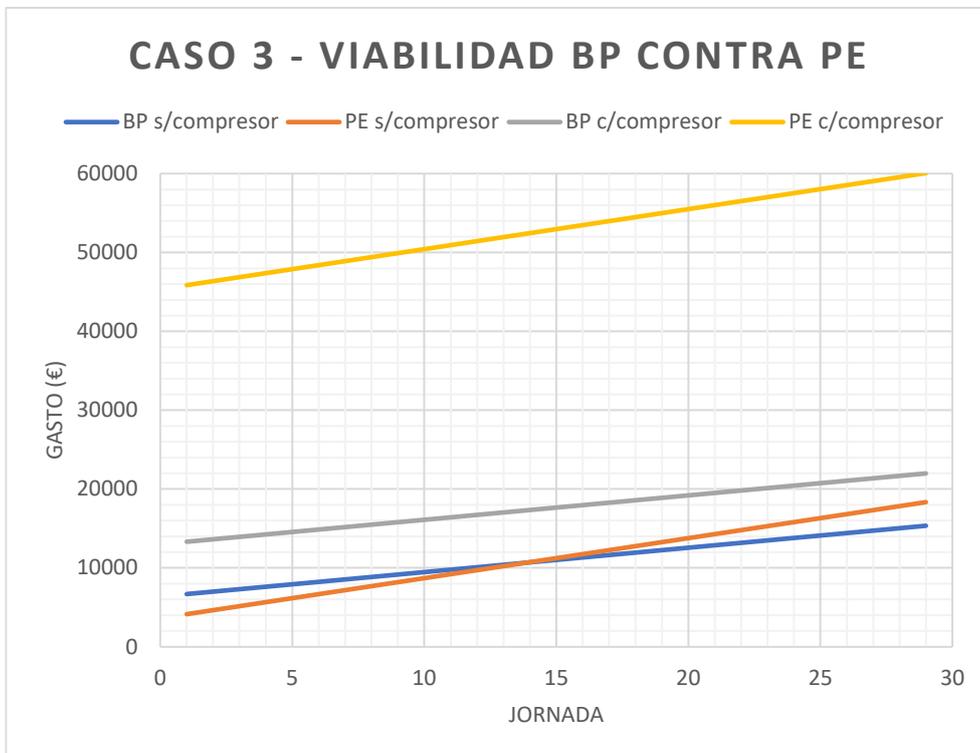


Figura 5-11 - Viabilidad caso 3

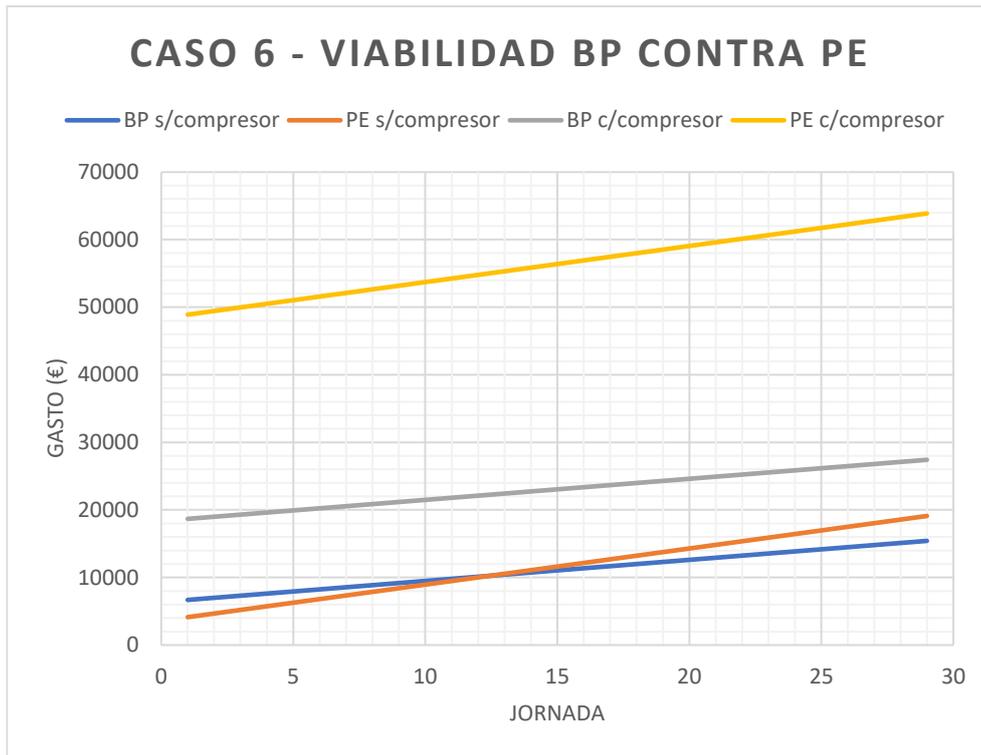


Figura 5-12 - Viabilidad caso 6

### 5.2.6.- Casos 7, 8 y 9

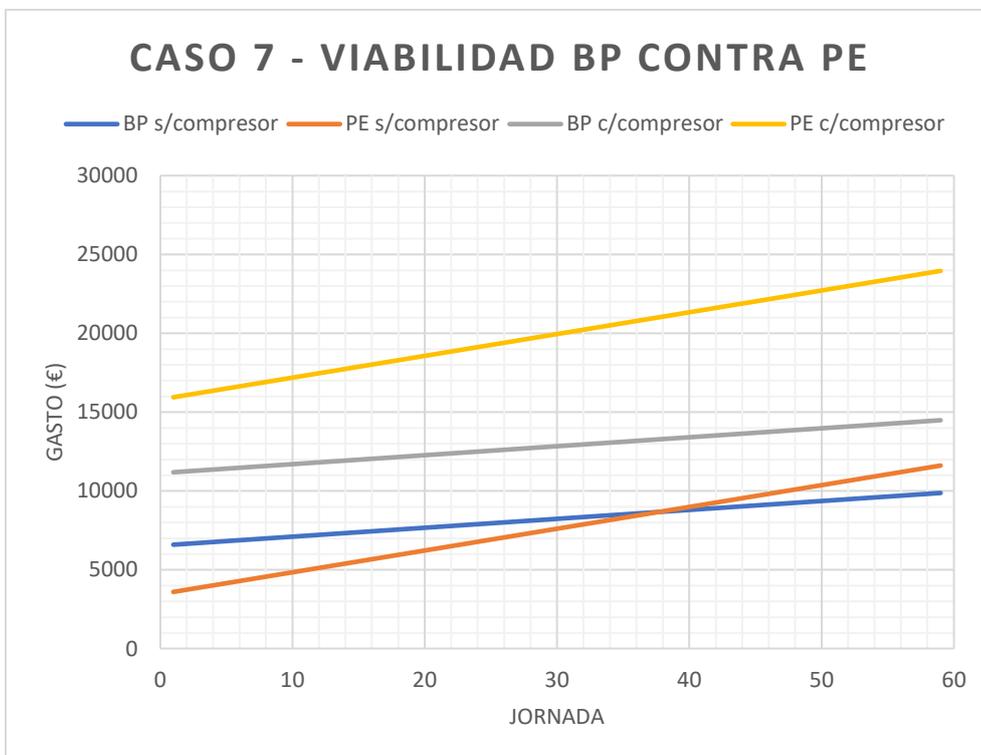


Figura 5-13 - Viabilidad caso 7

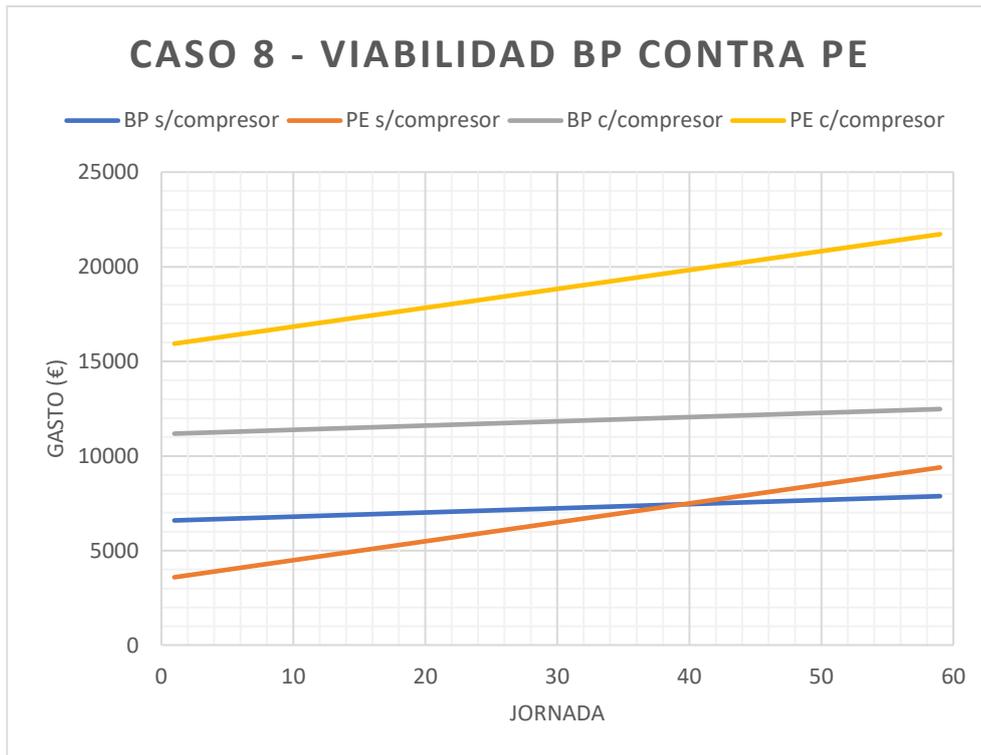


Figura 5-14 - Viabilidad caso 8

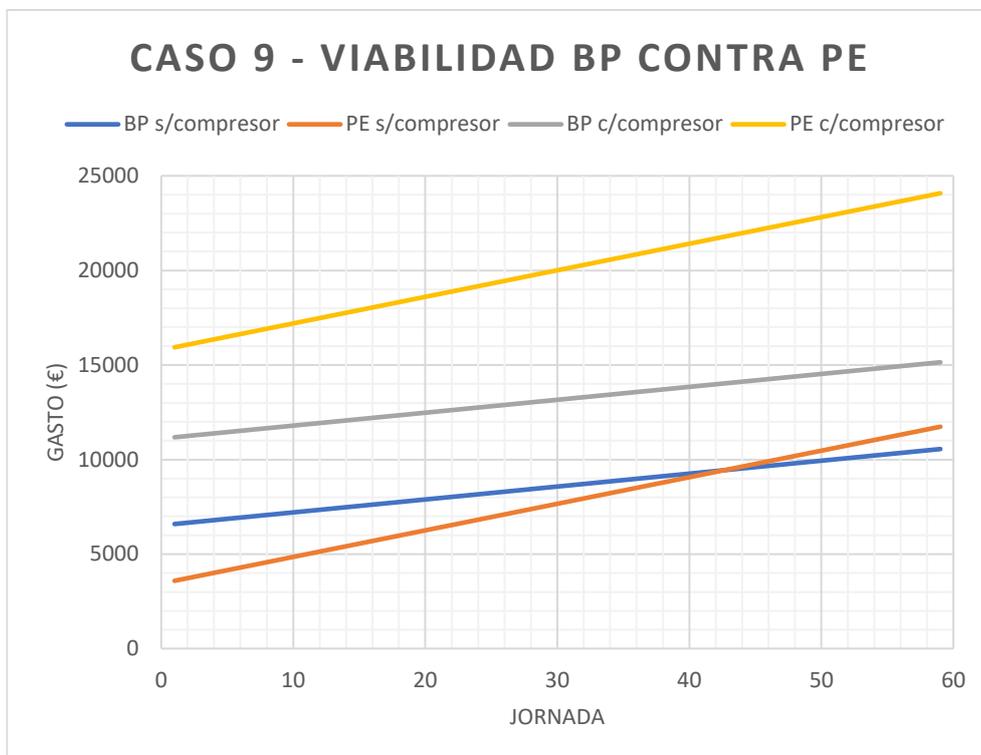


Figura 5-15 - Viabilidad caso 9



## 6.- CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En el proyecto desarrollado en este TFM se ha diseñado un equipo de chorreado abrasivo manual a baja presión, seleccionando los elementos constructivos para su funcionamiento en los rangos de presión más habituales, de 0,5 a 3 bar.

Tras su diseño se puede concluir que las partes más importantes y las que los diferencian de otro tipo de equipos de este estilo son: la válvula auto air, la válvula de descompresión pilotada neumáticamente, y el regulador de presión. El accionamiento conjunto de estas válvulas, abriendo la entrada de aire desde el compresor y cerrando su descarga a la atmósfera simultáneamente, asegura la presurización de la máquina en su rango de trabajo. El regulador de presión asegura el funcionamiento a baja presión de la máquina con mayor precisión, al permitir el ajuste de su valor al deseado.

Así mismo, se ha realizado la modelización tridimensional del equipo en Autodesk Inventor. Su dibujo en este programa ha permitido generar despieces que mejoran la comercialización del producto al incluirse en catálogos y manuales de uso y mantenimiento.

Por otra parte, se ha implementado una herramienta de cálculo que permite conocer el tipo de equipo a utilizar (baja presión o estándar) más conveniente desde el punto de vista económico. Su cálculo se basa en los parámetros de presión de chorreado y diámetro de la boquilla, que son los más influyentes en la potencia requerida de compresor y consumos de aire y abrasivo. La finalidad de esta herramienta es mejorar la comercialización de los equipos de baja presión al reportar las diferencias económicas que tiene su uso en comparación con las máquinas estándar.

Se han estudiado nueve casos diferentes en los que se comparan equipos de baja presión con estándar, en función de la presión de trabajo, el tamaño de la boquilla y el tipo de compresor. Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Cuando la compra del compresor es necesaria, los equipos de baja presión son más económicos tanto en gastos iniciales como por jornada.
- Cuando ya se dispone de compresores, debido a su mayor coste inicial, se necesita un plazo máximo de 45 días para que los equipos de baja presión repercutan ahorros por jornada en comparación con las máquinas estándar.

### 6.1.- Líneas futuras

Por último, se exponen las principales líneas futuras de trabajo con Couto Maquinaria:

- Desarrollo de manuales, tanto del equipo de chorro a baja presión diseñado como de otros equipos ya comercializados.
- Diseño de equipo de chorro abrasivo con mezcla interna de agua que evite la propagación de nube de polvo durante el chorreado.



- 
- Diseño de equipos industriales asociados al chorro y la pintura como deshumidificadores o aspiradores.
  - Desarrollo de proyectos de acabado superficial mediante pintura.



## 7.- REFERENCIAS

- [1] Couto Maquinaria, SL, «Página web Couto Maquinaria, SL,» Couto Maquinaria, <http://www.coutomaquinaria.com/>. [10 Marzo 2020].
- [2] Couto Maquinaria, SL, «Máquinas de chorro portátiles Racohi,» [http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/Ficha%20CHORREA DORAS%20RACOH%20espaol2.pdf](http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/Ficha%20CHORREA%20DORAS%20RACOH%20espaol2.pdf). [10 Marzo 2020].
- [3] Clemco Internacional, «Arenadora de baja presión,» Clemco Internacional, <https://www.clemco-international.com/es/arenadora-de-baja-presion>. [12 Marzo 2020].
- [4] Gritco, «Gritco eco series,» [https://www.gritco.com/media/downloadpdf/file/gritco\\_eco\\_eng.pdf](https://www.gritco.com/media/downloadpdf/file/gritco_eco_eng.pdf). [14 Marzo 2020].
- [5] Vespa Sabbiatrici, «Sandblasting machines,» Vespa Sabbiatrici, [http://www.vespasabbiatrici.com/sabbiatrici\\_03uk.htm](http://www.vespasabbiatrici.com/sabbiatrici_03uk.htm). [15 Marzo 2020].
- [6] Krimetal BV, «Blast machines,» Krimetal BV, <https://krimetal.nl/category/blastmachines/>. [18 Marzo 2020].
- [7] Racohi, «Manual de uso y mantenimiento chorreadoras Racohi,» Couto Maquinaria, SL, Gijón, 2011.
- [8] Eferest, «Fabricante de depósitos Eferest,» Eferest, <https://www.eferest.de/>. [23 Marzo 2020].
- [9] Directiva 2014/68/UE, «Armonización de los Estados miembros sobre la comercialización de equipos a presión,» DOUE, Unión Europea, 2014.
- [10] NVNetterVibration, «Catálogo vibradores neumáticos web,» NVNetterVibration, <https://www.nettervibration.com/product-category/vibradores-neumaticos/?lang=es>. [28 Marzo 2020].
- [11] MartinEng, «Vibration solutions, enhancing the flow of material,» <https://www.martin-eng.com/assets/pdfs/brochure-vibration-solutions-L3665.pdf>. [28 Marzo 2020].



- [12] MPA - tecnología para limpieza, tratamiento y acabado de superficies, «Catálogo de abrasivos MPA,»  
[https://mpa.es/sites/default/files/pdf/blast\\_catalogo\\_abrasivos\\_web\\_11.pdf](https://mpa.es/sites/default/files/pdf/blast_catalogo_abrasivos_web_11.pdf). [1 Abril 2020].
- [13] Couto Maquinaria, SL, «Catálogo Racohi mangueras de chorro y acoples,»  
<http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/Manguera%20Chorro.pdf>. [1 Abril 2020].
- [14] CKD, «Documentación técnica descargable Filtro de aire CKD,»  
<https://www.hidrafluid.com/es/gama-completa-de-producto-hidrafluid/2305-filtro-aire-ckd.html>. [2 Abril 2020].
- [15] Pneumax, «Válvula Penumax serie 200,»  
<https://rodavigo.net/datos/1032/serie-tecno228-neumatico-serie-200-pneumax.pdf>. [4 Abril 2020].
- [16] Krimetal BV, «Válvula FM-2,» Krimetal BV, <https://krimetal.nl/outlet-valve/>. [5 Abril 2020].
- [17] Couto Maquinaria, SL, «Despiece control remoto con silenciador Racohi,»  
<http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/presentacion%20control%20remoto%20media.pdf>. [6 Abril 2020].
- [18] Erol Exports PVT.LTD., «Pneumatic & Exhaust valves,» Erol Exports, <http://www.erolexports.com/pneumatic-exhaust-valves-3>. [7 Abril 2020].
- [19] CKD, «Regulador standad serie,»  
[https://www.bibus.es/fileadmin/product\\_data/ckd/documents/ckd\\_r\\_000-w\\_regulator\\_en\\_cc962a.pdf](https://www.bibus.es/fileadmin/product_data/ckd/documents/ckd_r_000-w_regulator_en_cc962a.pdf). [7 Abril 2020].
- [20] Racohi, «Válvulas dosificadoras de abrasivo Racohi,» Couto Maquinaria, SL, <http://www.coutomaquinaria.com/articulo.php?id=73>. [10 Abril 2020].
- [21] Racohi, «Gatillo hombre muerto,» Couto Maquinaria, SL, <http://www.coutomaquinaria.com/articulo.php?id=86>. [13 Abril 2020].
- [22] Couto Maquinaria, SL, «Mangueras y acoplamientos de aire, aspiración y descarga Racohi,»



- <http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/Ficha%20MANGUERAS%20DE%20AIRE%20Y%20ASPIRACION%20RACOHI%20espaol.pdf>. [14 Abril 2020].
- [23] Elcometer, «Blast hose Elcometer,»  
[https://blast.elcometer.com/pub/media/productattach/b/l/blast\\_hose\\_only\\_1.pdf](https://blast.elcometer.com/pub/media/productattach/b/l/blast_hose_only_1.pdf). [17 Abril 2020].
- [24] Couto Maquinaria, SL, «Boquillas de chorro Racohi,»  
<http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/Ficha%20BOQUILLA%20S%20CHORRO%20espaol.pdf>. [Abril 2020].
- [25] Kennametal, «Documentación técnica boquillas Kennametal para Racohi,»  
[https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/common/Resources/Catalogs-Literature/componentsandblanks/B-12-02861\\_KMT\\_Blast\\_Nozzles\\_Catalog\\_EN.pdf](https://www.kennametal.com/content/dam/kennametal/kennametal/common/Resources/Catalogs-Literature/componentsandblanks/B-12-02861_KMT_Blast_Nozzles_Catalog_EN.pdf). [21 Abril 2020].
- [26] Wikipedia. La enciclopedia libre., «Volumen respiratorio por minuto,»  
Wikipedia, [https://es.wikipedia.org/wiki/Volumen\\_respiratorio\\_por\\_minuto](https://es.wikipedia.org/wiki/Volumen_respiratorio_por_minuto). [23 Abril 2020].
- [27] UNE-EN ISO, «ISO 8501-1:2008,» 2008.
- [28] Couto Maquinaria, SL, «Política de calidad,»  
<http://www.coutomaquinaria.com/fckimages/File/politica%20calidad.pdf>. [19 Abril 2020].
- [29] Lloyd's Register España, «Organismo notificado Lloyd's Register España,» <https://www.lr.org/es-es/>. [20 Abril 2020].
- [30] ISO - Organización Internacional de Normalización, «ISO 9001:2015 Sistemas de gestión de calidad - Requisitos,» 2005.
- [31] Couto Maquinaria, SL, «Declaración de conformidad de marcado CE,»  
<http://www.coutomaquinaria.com/doclib/documento/es/CERTIFICADOS%20ESTNDAR%20CE%20espanol%20e%20english%20lloyds.pdf>. [26 Marzo 2020].
- [32] AtlasCopco, «Hojas características compresores eléctricos,»  
<https://www.atlascopco.com/en-us/compressors/cagi-data-sheets>. [2 Mayo 2020].



- [33] SULLAIR, «Compresor de aire diésel,»  
[https://america.sullair.com/sites/default/files/2017-10/LIT%20185\\_PAP185T4F201709-2\\_EN.pdf](https://america.sullair.com/sites/default/files/2017-10/LIT%20185_PAP185T4F201709-2_EN.pdf). [2 Mayo 2020].
- [34] Expansión/Datosmacro, «Precios de los derivados del petróleo en España,» Expansión, <https://datosmacro.expansion.com/energia/precios-gasolina-diesel-calefaccion/espana?anio=2019>. [26 Marzo 2020].
- [35] ATECYR, Guía técnica de diseño de centrales de calor eficientes, Madrid: IDAE, 2010.
- [36] Comparadorluz, «Comparadorluz PYMES,» Endesa, <https://comparadorluz.com/pymes/tarifas>. [27 Marzo 2020].
- [37] GRUPO BETICO, «Compresores de aire BETICO,» BETICO ES, [En línea]. Available: <https://www.betico.com/productos-compresores-generadores.php?menu1=4&producto=10>. [27 Marzo 2020]
- [38] FISALIS, «Compresores de aire FISALIS,» FISALIS Compresores, [En línea]. Available: <https://www.fisaliscompresores.com/>. [28 Marzo 2020]