



ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA CONDENSACION DE VAPOR DE AGUA EN PRESENCIA DE GASES INCONDENSABLES

Cristian Rolando Ardila Pérez

[*] C.R. Ardila; [] F.J. Fernández ; [**] M.M. Prieto**

UO233576@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

En este trabajo se presenta el desarrollo de un procedimiento experimental para caracterizar el comportamiento de la condensación del vapor de agua en presencia de gases incondensables (aire), buscando conocer la relación caudal de aire versus porcentaje de líquido condensado. Se realizan 12 experimentos, trabajando en condiciones de vacío, con líquido desmineralizado y con aporte controlado de aire como gas incondensable. Los resultados evidencian los efectos perjudiciales de la presencia del gas incondensable en el proceso de condensación.

ABSTRACT

This paper presents the development of an experimental procedure to characterize the behavior of water vapor condensation in presence of non-condensable gases (air), seeking to know the airflow ratio vs. percentage of liquid condensate. 12 experiments are performed, working under vacuum conditions with demineralized liquid, with controlled supply of air as non-condensable gas. The results show the detrimental effects of the presence of non-condensable gas in the condensation process.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos de condensación juegan un papel importante en gran parte del sector industrial, desde sistemas de aire acondicionado, la generación de

electricidad, refrigeración, seguridad de los reactores, la industria aeroespacial y la desalinización.

En la práctica de condensación, pueden existir pequeñas cantidades de gas no condensable en vapores debido a las características del sistema, problemas de estanqueidad de sistemas a presiones de vacío, o descomposición química de vapores de trabajo.

Se sabe que la presencia de gases no condensables en un vapor puede reducir en gran medida el rendimiento de los condensadores [1,2]. Esto es debido al hecho de que la presencia de gas no condensable disminuye la presión parcial del vapor, reduciendo así la temperatura de saturación en el que se produce la condensación. Otro factor determinante es que en la difusión del vapor a través del incondensable, éste se acumula alrededor de los tubos del condensador actuando como una barrera para la condensación [3].

Autores como S. Oh, y S.T. Revankar [4] encontraron a partir de experimentos que el coeficiente de transferencia de calor de condensación disminuye con la concentración de un gas no condensable.

En este artículo mostraremos el desarrollo del proceso experimental para comprobar el comportamiento de la condensación de vapor de agua en presencia de un gas incondensable.



NOMENCLATURA

Subíndices

Variables

M	masa (kg)
t	tiempo (s)
h	entalpía específica (kJ/kg).
\dot{Q}	potencia térmica (W)
\dot{m}	caudal másico (kg/s)
W	fracción másica
T	temperatura (°C)
P	presión (Pa)

c	condensado
ent	entrada
sal	salida
perd	pérdidas
ref	refrigerante
ren	renovación
cal	caldera
cond	condensador
amb	ambiente
sat	saturación

Subíndices

v	vapor
a	aire
l	líquido

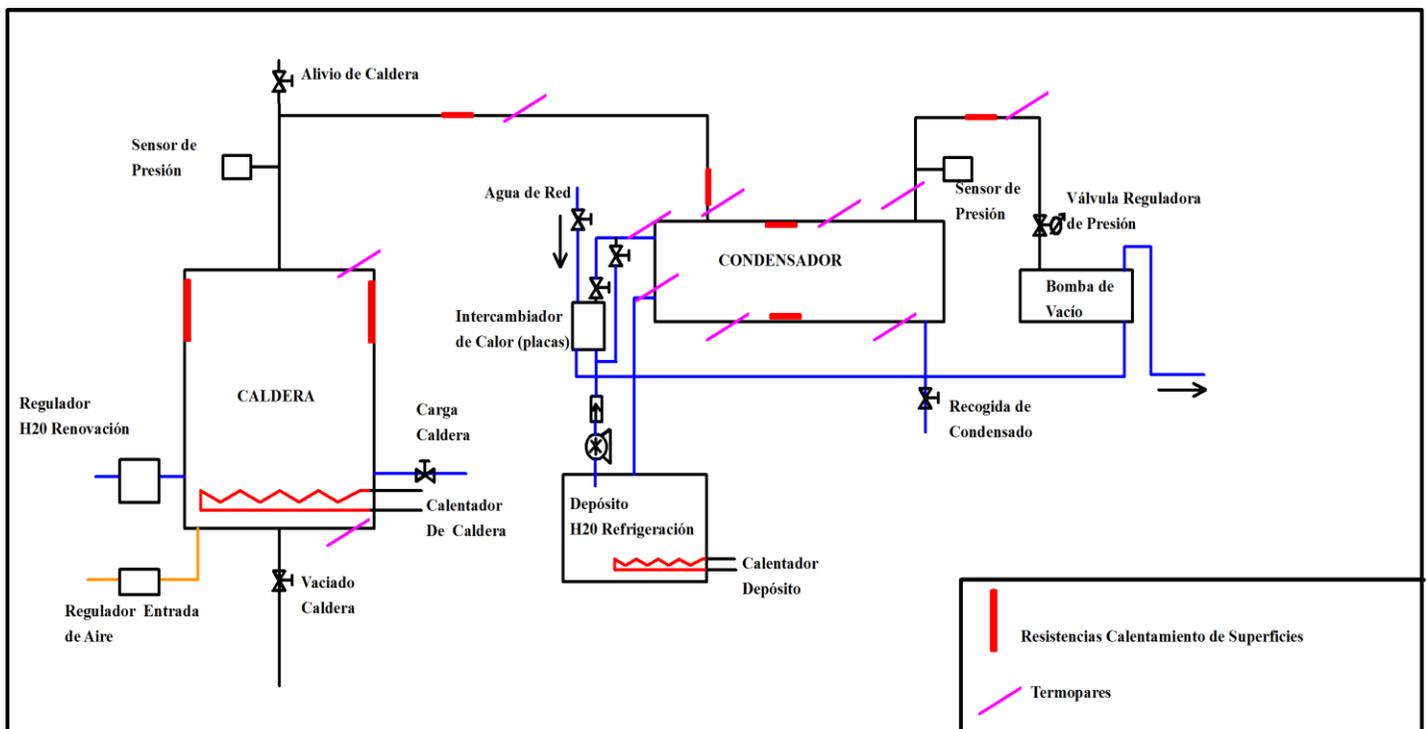


Figura. 1. Planta Experimental de Condensación



2. DESCRIPCIÓN DE LA PLANTA

La planta experimental de condensación está compuesta por:

- Generador de Vapor.

Caldera dotada con resistencias eléctricas de 52,1 ohmios para potencia total de hasta 3000 W con control independiente y con capacidad de hasta 13,5 litros

-Condensador

Es un intercambiador de carcasa y tubos dispuesto horizontalmente, construido en acero inoxidable y refrigerado con agua que circula por el interior de los tubos.

-Sistema de refrigeración para condensador

Compuesto por una Bomba dosificadora de membrana, un depósito de agua con resistencia eléctrica para regular su temperatura y su respectivo circuito de recirculación.

-Bomba de vacío

Bomba de vacío de anillo líquido de agua, con válvula reguladora de presión (de vacío).

-Regulador de aporte de aire

Electroválvula para aire con regulación lineal de flujo de tipo eléctrico.

-Regulador de aporte de agua renovación

Regulador de Caudal de agua con controlador electrónico. Fija el caudal a trabajar y registra en su pantalla el valor total de líquido aportado en cada experimento.

-Controladores PID.

Controladores electrónicos(proporcional, integral, y derivativo) nos permiten situar las Temperaturas de proceso en el punto de trabajo seleccionado.

-Sistema de adquisición de datos:

Se trabaja con la unidad de adquisición/conmutación de datos Agilent 34970. Ésta nos permite monitorizar las variables de presión, temperaturas, caudal de aire y voltajes, también ofrece la posibilidad de exportar los datos registrados en el proceso de condensación, para su pos-tratamiento.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

-Activamos la bomba de Vacío

-Cargamos la caldera, de 12 a 13,5 litros de Agua desmineraliza, registramos el valor exacto de carga en nuestro formato de recogida de datos.

-Regulamos la temperatura y caudal de agua de refrigeración, al valor preestablecido según el experimento.

-Iniciamos la adquisición de datos

-Activamos el calentamiento de la caldera

-Activamos el aporte de aire (al valor preestablecido según el experimento)

-Regulamos la presión del sistema (al valor preestablecido según el experimento). Una vez puesto en marcha el experimento, el sistema de adquisición de datos irá registrando los valores de temperaturas y presión en cada instante y los guardará en un archivo que posteriormente procesaremos.

El sistema de adquisición de datos nos permite ir viendo la evolución de las variables para determinar el momento de inicio de la ebullición.

-Activamos el aporte de agua (al valor preestablecido según el experimento)

-Realizamos el vaciado del depósito de condensado, apuntando la cantidad recogida, con esto damos inicio a nuestras condiciones de régimen permanente.

-Realizamos recogidas de condensado en periodos de 10 minutos y apuntamos su cantidad, repetimos este proceso durante aproximadamente 3 horas. Por último vaciamos el depósito de condensado y apuntamos su cantidad.

-Paramos la toma de datos y exportamos lo registrado a un archivo .TXT

-Apagamos todo el sistema de condensación.



-Vaciamos la Caldera y apuntamos la cantidad de líquido recogido.

4. BALANCES DE MASA Y ENERGIA

4.1 Balance de masa en la caldera

Para este balance tenemos en cuenta lo siguiente:

Masa inicial (M_{ini}), que corresponde la masa de agua con la que cargamos la caldera, Masa Final (M_{fin}), corresponde a la recogida final o vaciado de caldera y Masa total de agua de renovación (M_{ren}).

Tanto M_{ini} como M_{fin} son medidos; M_{ren} se obtiene del valor del totalizador de su regulador de caudal.

Tenemos entonces que:

$$\dot{m}_v = \frac{M_{ini} + M_{ren} - M_{fin}}{t_{eva}} \quad (1)$$

4.2 Balance de energía en la caldera

Para este balance tenemos en cuenta lo siguiente:

Energía del líquido en la caldera, energía del líquido de renovación, energía eléctrica de la caldera, energía del vapor de agua, energía del aire y pérdidas de calor.

$$\frac{d}{dt}(M_{cal}) \cdot h_{l(Tcal)} = \dot{m}_{l,ren} \cdot h_{l(Tamb)} + \dot{Q}_{cal} - \dot{m}_v h_{v(Tsat)} + \dot{m}_a (h_{a,ent} - h_{a,sal}) - \dot{Q}_{per,cal} \quad (2)$$

Donde,

$$\frac{d}{dt}(M_{cal}) = \frac{M_{fin} - M_{ini}}{t_{eva}} \quad (3)$$

\dot{Q}_{cal} =Potencia eléctrica aportada

$$\dot{Q}_{per,cal} = \dot{m}_{l,ren} \cdot h_{l(Tamb)} + \dot{Q}_{cal} - \dot{m}_v h_{v(Tsat)} + \dot{m}_a \cdot (h_{a,ent} - h_{a,sal}) - \frac{M_{fin} - M_{ini}}{t_{eva}} \cdot h_{l(Tcal)} \quad (4)$$

4.3 Balance de masa en el condensador

Para este balance tenemos en cuenta lo siguiente:

Flujo másico de aire, flujo másico de refrigerante, flujo másico de agua en fase líquida y vapor.

Aire

$$\dot{m}_{a,ent} = \dot{m}_{a,sal} \quad (5)$$

Refrigerante

$$\dot{m}_{ref,ent} = \dot{m}_{ref,sal} \quad (6)$$

Vapor de Agua

$$\dot{m}_{v,ent} = \dot{m}_{v,sal} + \dot{m}_c \quad (7)$$

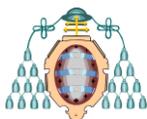
4.4 Balance de energía en el condensador

Para este balance tenemos en cuenta lo siguiente:

Energía del refrigerante, energía del vapor de agua, energía del líquido condensado, energía del aire, energía eléctrica del condensador y pérdidas de calor.

$$\dot{m}_{ref} (h_{ref,ent} - h_{ref,sal}) + \dot{m}_{v,ent} \cdot h_{v,ent} - \dot{m}_{v,sal} \cdot h_{v,sal} - \dot{m}_c \cdot h_c + \dot{m}_a \cdot (h_{a,ent} - h_{a,sal}) + \dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{per,cond} = 0 \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{per,cond} = \dot{m}_{ref} (h_{ref,ent} - h_{ref,sal}) + \dot{m}_{v,ent} \cdot h_{v,ent} - \dot{m}_{v,sal} \cdot h_{v,sal} - \dot{m}_c \cdot h_c + \dot{m}_a \cdot (h_{a,ent} - h_{a,sal}) + \dot{Q}_{cond} \quad (9)$$



5. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Se realizarán 12 experimentos diferentes, 6 de ellos con temperatura de saturación de 46.1 °C. De estos, 3 tendrán agua de refrigeración a 20 °C y cada uno con fracciones másicas de aire de 0.02, 0.05 y 0.1 respectivamente.

Los 3 experimentos restantes tendrán agua de refrigeración a 30°C y de igual manera con fracciones másicas de aire de 0.02, 0.05 y 0.1 respectivamente.

Los siguientes 6 experimentos trabajarán con temperatura de saturación de 65.6°C, nuevamente los 3 primeros con agua de refrigeración a 20°C, y cada uno con fracciones másicas de aire de 0.02, 0.05 y 0.1 respectivamente.

Los 3 experimentos últimos tendrán agua de refrigeración a 30°C y de igual manera con fracciones másicas de 0.02, 0.05 y 0.1 respectivamente.

Las condiciones generales de los experimentos se muestran en la [tabla 1](#). La fracción másica de aire se calcula de la siguiente manera:

$$W_a = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_a + \dot{m}_v} \quad (10)$$

Condiciones de los experimentos				
Experimento	T _{sat} (°C)	P _{sat} (mbar)	T _{ref} (°C)	W _a
1A	46,1	101	20	0.02
2A	46,1	101	20	0.05
3A	46,1	101	20	0.1
4A	46,1	101	30	0.02
5A	46,1	101	30	0.05
6A	46,1	101	30	0.1
1B	65,6	260	20	0.02
2B	65,6	260	20	0.05
3B	65,6	260	20	0.1
4B	65,6	260	30	0.02
5B	65,6	260	30	0.05
6B	65,6	260	30	0.1

Tabla. 1. Condiciones generales de los experimentos

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados experimentales se especifican en la [tabla 2](#). Las curvas características de los valores obtenidos se muestran en las [figuras 2y3](#).

Resultados				
Experimento	\dot{m}_c (kg/h)	\dot{m}_v (kg/h)	\dot{m}_c/\dot{m}_v	$\dot{Q}_{per,cal}$ (w)
1A	1,2778	1,3035	0,9803	178,29
2A	1,2707	1,3078	0,9716	351,96
3A	1,242	1,2839	0,9674	160,55
4A	1,2029	1,2956	0,9284	166,31
5A	1,1889	1,2882	0,9229	164,13
6A	1,1616	1,3826	0,8402	145,25
1B	1,2924	1,351	0,9566	154,91
2B	1,2812	1,4388	0,8905	93,33
3B	1,2456	1,4235	0,8751	63,60
4B	1,1939	1,307	0,9135	168,93
5B	1,1651	1,2911	0,9024	164,89
6B	1,1077	1,3181	0,8404	152,91

Tabla. 2. Resultados de los experimentos

Los valores de \dot{m}_c se obtienen dividiendo la masa total de condensado recogido en régimen permanente, entre el tiempo transcurrido en dicho régimen.

Los valores de \dot{m}_v se obtienen del balance de masa en la caldera (1).

Los valores de \dot{m}_c/\dot{m}_v representan el rendimiento de nuestro proceso de condensación.

Los valores de $\dot{Q}_{per,cal}$ (w) representan las pérdidas de potencia en la caldera calculadas en su balance de energía (4).

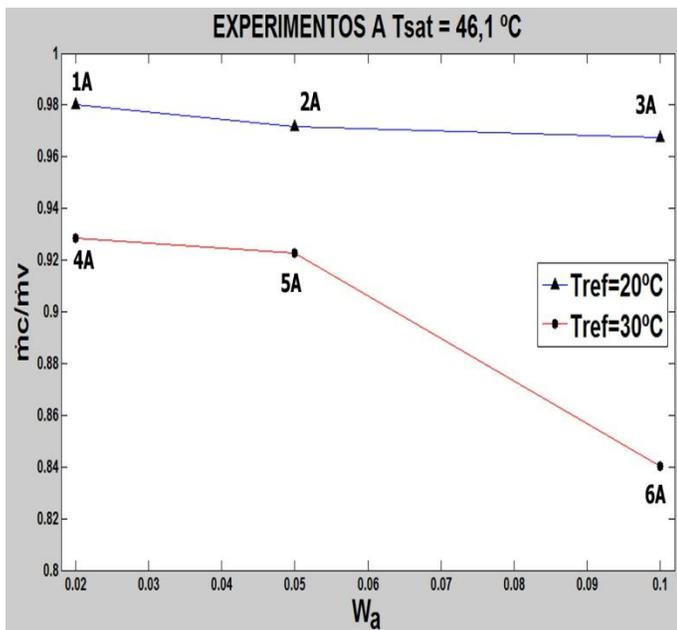
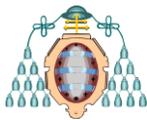


Fig.2. Efecto del aire en la condensación a 46,1°C

Con $T_{sat}=46,1^{\circ}C$, vemos que incluso el menor aporte de aire hace disminuir el rendimiento de la condensación, notándose mayor efecto cuando se trabaja con temperaturas superiores en líquido refrigerante.

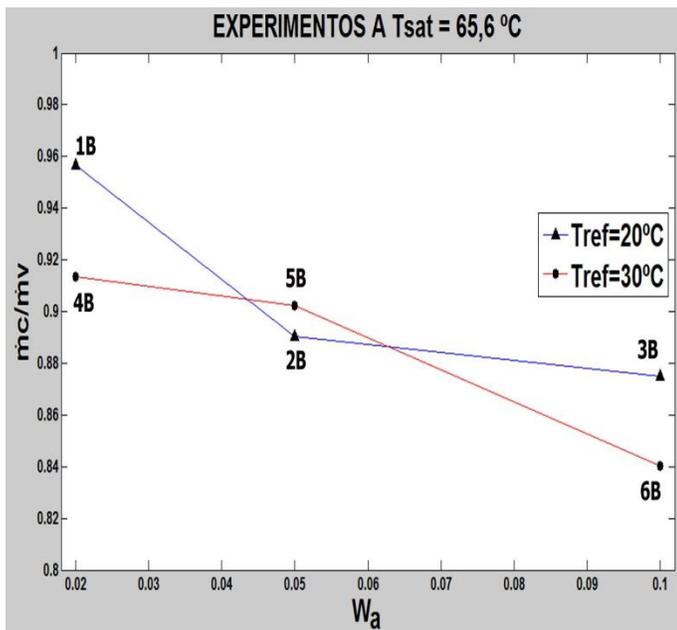


Fig.3. Efecto del aire en la condensación a 65,6°C

Con $T_{sat}=65,6^{\circ}C$, el efecto del aire en la condensación da lugar a caídas aún más significativas que el caso anterior (a $T_{sat}=46,1^{\circ}C$) y de igual manera continúa disminuyendo el rendimiento de la condensación cuando se trabaja con temperaturas superiores en líquido refrigerante. El punto 2B de la figura 3, muestra un descenso brusco comparado con el punto 2A de la figura 2, cabe suponer que si realizáramos más experimentos podríamos encontrar que esta variación puede ser debida a incertidumbre en la medidas o recogida de datos, ya que en términos generales los experimentos reflejan un patrón de comportamiento muy similar, al que nos referimos como la disminución del rendimiento en el proceso de condensación a medida que se aumenta la fracción másica de gas incondensable (aire)

7. CONCLUSIONES

Se realizó un proceso experimental para comprobar el comportamiento de la condensación del vapor de agua en presencia de gases incondensables, en nuestro caso trabajamos con aire, en proporciones de 0.02, 0.05 y 0.1 sobre el caudal másico de aire, se observó que incluso en pequeñas concentraciones de gas incondensable es notorio el decaimiento del rendimiento de la condensación siendo más evidente cuando se aumenta la presión del sistema y las temperaturas del líquido refrigerante.

Para validar nuestros resultados se deberían realizar varios trabajos experimentales en iguales condiciones, pudiéndose aumentar el porcentaje de aire en la mezcla, ya que el condensador de la planta es de gran capacidad.

El método y proceso utilizado en esta experimentación es de alta calidad, ya que se dispone de elementos de medida y control muy precisos y de un sistema de adquisición de datos que permite registrar todas las variables de temperaturas, presión, caudal de aire y voltajes, a esto se suma un minucioso post-proceso de datos que analiza en detalle todo el comportamiento de la condensación del vapor de agua en presencia de gases incondensables.



AGRADECIMIENTOS

Expreso mi gratitud al profesor Francisco Javier Fernández y al Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo, quienes pusieron a mi disposición la planta piloto de condensación y me permitieron desarrollar este trabajo investigativo, que a título personal me ha aportado mucho conocimiento y experiencia práctica en el manejo de procedimientos experimentales, que para mí abre las puertas a un futuro encaminado a la investigación.

REFERENCIAS

- [1] A.P. Colburn, O.A. Hougen, Design of cooler condensers for mixture of vapors with noncondensing gases, *Ind.Eng. Chem.* 26 (1934) 260–267
- [2] E.M. Sparrow, W.J. Minkowycz, M. Saddy, Forced convection condensation in the presence of a noncondensable gas and interfacial resistance, *Int. J. Heat Mass Transf.* 10 (1967) 1829–1845.
- [3] Çengel, Y. Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones. McGraw-Hill, 2011.
- [4] S. Oh, S.T. Revankar, Experimental and theoretical investigation of filmcondensation with noncondensable gas, *Int. J. Heat Mass Transfer* 49 (2006) 2523–2534