

4. Descripción del dispositivo experimental.....	4.1
4.1. Intercambiador de placas ensayado.....	4.2
4.2. Selección de las condiciones de ensayo del intercambiador.....	4.3
4.3. Descripción de la instalación experimental.....	4.3
4.3.1. Circuito de solución.....	4.4
4.3.2. Circuitos auxiliares de la instalación.....	4.6
4.4. Instrumentación y control.....	4.8
4.4.1. Sensores de temperatura.....	4.8
4.4.2. Medición de caudal.....	4.8
4.4.3. Sensores de presión.....	4.8
4.4.4. Sensor de nivel.....	4.9
4.4.5. Sistema de control.....	4.9
4.4.6. Sistema de adquisición de datos.....	4.10
4.5. Carga de la mezcla amoniaco/agua y determinación de la concentración de la mezcla.....	4.11
4.6. Obtención de datos experimentales en los ensayos realizados.....	4.11
4.6.1. Reducción de datos experimentales en los experimentos de simple fase..	4.12
4.6.2. Reducción de datos experimentales en cambio de fase.....	4.13
4.7. Resultados típicos obtenidos.....	4.15

4. Descripción del dispositivo experimental

El objetivo del trabajo experimental era el estudio de la ebullición forzada de la mezcla amoniaco/agua en un intercambiador de placas. Para evitar la mala distribución de flujos en el intercambiador, que provocaría una mayor indeterminación de los coeficientes de transferencia de calor, se contó con un sólo canal de un intercambiador de placas. En este capítulo se muestra el dispositivo experimental ensayado, el sistema de obtención de datos experimentales y el método de cálculo de los coeficientes de transferencia de calor.

En la decisión del método de calentamiento de este canal se consideraron las siguientes posibilidades

Calentamiento directo

- Calentamiento por medio de una resistencia eléctrica. Esta configuración tiene la ventaja de que en principio es posible establecer condiciones de flujo de calor constante en el intercambiador. Sin embargo, debido a la corrugación del canal, sería muy difícil adaptar una resistencia eléctrica a la corrugación, por lo que el objetivo de flujo de calor constante en el canal no se conseguiría.
- Calentamiento por medio de la aplicación directa de una diferencia de voltaje en las placas del intercambiador. Esta configuración, (Margat (1997)), elimina la necesidad de adaptar un dispositivo a la corrugación de las placas, aunque sin embargo, en los puntos de contacto de las placas se formarían caminos preferenciales de la corriente eléctrica.

Calentamiento indirecto

- Calentamiento por medio de otro fluido. Esta configuración necesita dos canales más en el intercambiador. Sin embargo, tiene la ventaja añadida de que el comportamiento de los coeficientes de ebullición se acercan más al comportamiento real del intercambiador. Este tipo de configuración hace más complicado el poder obtener temperaturas de pared o fluido en el intercambiador, por lo que generalmente se tienden a poner sensores de temperatura a las entradas y a las salidas del mismo, obteniéndose el coeficiente global de transferencia de calor como dato experimental, e infiriendo el coeficiente de ebullición a partir del coeficiente del lado de calentamiento obtenido previamente por una correlación de simple fase. Claesson (2004) propuso una técnica que permitía obtener el flujo de calor local en el intercambiador con esta configuración, pero la configuración del dispositivo es compleja, lo que encarece la instalación, y lleva asociado riesgos de fugas, no admisibles con la mezcla que se pretende estudiar en esta tesis.

Se ha considerado la opción de calentamiento indirecto del intercambiador como la adecuada medir coeficientes de transferencia de calor en ebullición forzada en el canal del intercambiador de placas. Este intercambiador ha sido proporcionado por la compañía Alfa Laval, era un intercambiador tipo NB51, con corrugación de 30° con la horizontal. El intercambiador de placas constaba de cuatro placas formando tres canales, y se utilizaba agua como fluido de calentamiento, circulando esta en los canales exteriores. Este intercambiador de placas ha sido instalado en un banco de ensayos diseñado y construido en el CREVER en el transcurso de esta tesis, donde tanto el flujo de líquido como el flujo de vapor fluyen de abajo hasta arriba. Se obtuvieron datos experimentales para diversas condiciones de entrada al intercambiador, gracias a un sistema de precalentamiento, donde la mezcla podía entrar ligeramente subenfriada, saturada o con un cierto grado de título de vapor.

La cantidad de datos experimentales obtenidos han sido también una medida de la fiabilidad de los equipos considerados en este estudio. Se han estimado las horas de trabajo experimental

en unas 2000, y parte de estas experimentaciones se encontraban cerca de los límites máximos de trabajo de los equipos considerados.

4.1. Intercambiador de placas ensayado

En la Figura 4.1 se muestra el intercambiador de placas utilizado. Este intercambiador de placas corresponde a un prototipo construido expresamente para este estudio por la firma Alfa Laval. Las placas utilizadas en este intercambiador corresponden a las del intercambiador comercial NB51 de acero inoxidable, termosoldadas con níquel, y con una corrugación tipo “chevron”, formando un ángulo de 30° con la horizontal. Este prototipo consta de 4 placas, formando 3 canales, donde en el canal central circula la solución y en los canales laterales circula el fluido de calentamiento. En la Figura 4.1 a) se muestran los sentidos de circulación del intercambiador. La solución de amoniaco/agua entra por la parte inferior del intercambiador (flechas verdes) y tanto el vapor como el flujo de líquido circulan en el mismo sentido hacia arriba, en los canales exteriores circula el fluido de calentamiento (en rojo). Este intercambiador es un intercambiador típico en sistemas de refrigeración como evaporador de amoniaco, por lo que era de esperar que no debiera de tener incompatibilidades con la mezcla estudiada. Las dimensiones de este intercambiador se muestran en la Tabla 4.1.

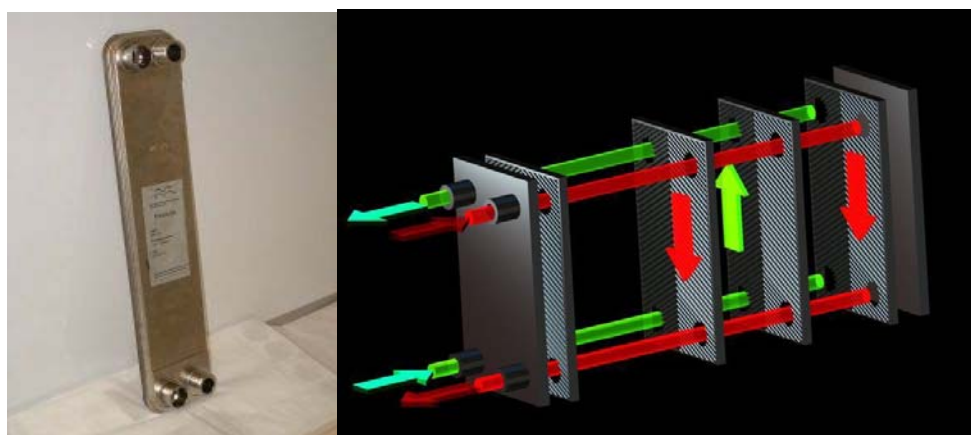


Figura 4.1 a) Intercambiador de placas utilizado b) Sentidos de circulación del fluido de calentamiento y de la mezcla.

Tabla 4.1 Características del intercambiador NB 51.

Geometría	Valor
Área de la placa, (m ²)	0.05
Longitud, (m)	0.536
Ancho, (m)	0.112
Área de paso del canal, cm ²	2
Separación de placas, (mm)	2
Espesor de la placa, (mm)	0.4
Diámetro de los puertos, (mm)	18/25 (int./ext.)
Presión máx/min de trabajo (bar)	21/vacío
Temperatura max/min (°C)	225/(-160)
Diámetro hidráulico(m)	0.004
Volumen canal (litros)	0.095
Caudal máximo por puertos (m ³ /h)	3.6

4.2. Selección de las condiciones de ensayo del intercambiador

El intercambiador de placas utilizado en la experimentación, tiene como límite máximo de trabajo unos 21 bares. En cuanto a las temperaturas máximas de trabajo se encuentran a unos 225 °C. En la experimentación se han elegido como presiones máximas de 15 bares, típicas de sistemas de absorción, y permitía un margen de seguridad considerable, considerando que era un prototipo y la poca cantidad de placas disminuye la resistencia mecánica de este tipo de intercambiadores.

Aunque el método de obtención de los coeficientes de ebullición experimental es independiente del número de Reynolds de solución, cuando se quiere comparar este coeficiente experimental con las predicciones de las correlaciones, si que se necesita este número adimensional. En la experimentación realizada con agua en los dos lados del intercambiador, se observó una transición para números de Reynolds inferiores a 1000, y para no tener que cambiar de correlación, el flujo de solución mínimo escogido en la experimentación fue de 50 kg/m²s. El flujo másico máximo de 170 kg/m²s fue seleccionado por una cuestión de potencia de la instalación. La mezcla amoniaco/agua tiene una entalpía de ebullición relativamente grande y la potencia necesaria para generar título de vapor tendía a ser excesiva.

Los flujos de calor ensayados en el intercambiador se establecieron entre 20 y 70 kW/m². El máximo flujo de calor corresponde a la potencia máxima de la resistencia de calentamiento, y en cuanto al mínimo, fue elegido porque se ha considerado suficientemente pequeño, para generar una cierta cantidad de vapor en el intercambiador. Se ha escogido una temperatura máxima de 140 °C en los circuitos de la instalación, lo que redundaba en una operación del dispositivo experimental más segura, suficientes para generar títulos de vapor nunca superiores al 40 %, que se han creído adecuados a las condiciones típicas de un generador de una máquina de absorción de amoniaco/agua. El límite autoimpuesto de temperatura máxima de trabajo no se ha superado nunca, pues se han encontrado inestabilidades para títulos de vapor superiores al 0.3, probablemente debidas a las conexiones de salida del intercambiador, aunque no se ha comprobado.

4.3. Descripción de la instalación experimental

El banco de ensayos fue concebido de forma que era posible variar los parámetros que se habían identificado como de mayor influencia en los coeficientes de transferencia de calor en ebullición forzada, como caudal de solución, flujo de calor, título medio en el intercambiador, concentración de amoniaco y presión.

En la Figura 4.2 se muestra un esquema de la instalación experimental. En color verde se puede apreciar el circuito de la solución amoniaco/agua, y en la esquina inferior izquierda se aprecia la sección de test, donde se ha instalado el intercambiador de placas que se ha ensayado. Se pueden apreciar tres circuitos auxiliares que son los que proporcionan el intercambio de calor con el circuito de solución. Se identifica el *circuito del preevaporador*, que es el circuito que proporciona las condiciones de entrada de la solución al intercambiador de placas, el *circuito de calentamiento* del intercambiador, que es el que proporciona el flujo de calor de ensayo al intercambiador, y el circuito del condensador, que permite condensar la solución para poder recircularla al tanque de solución.

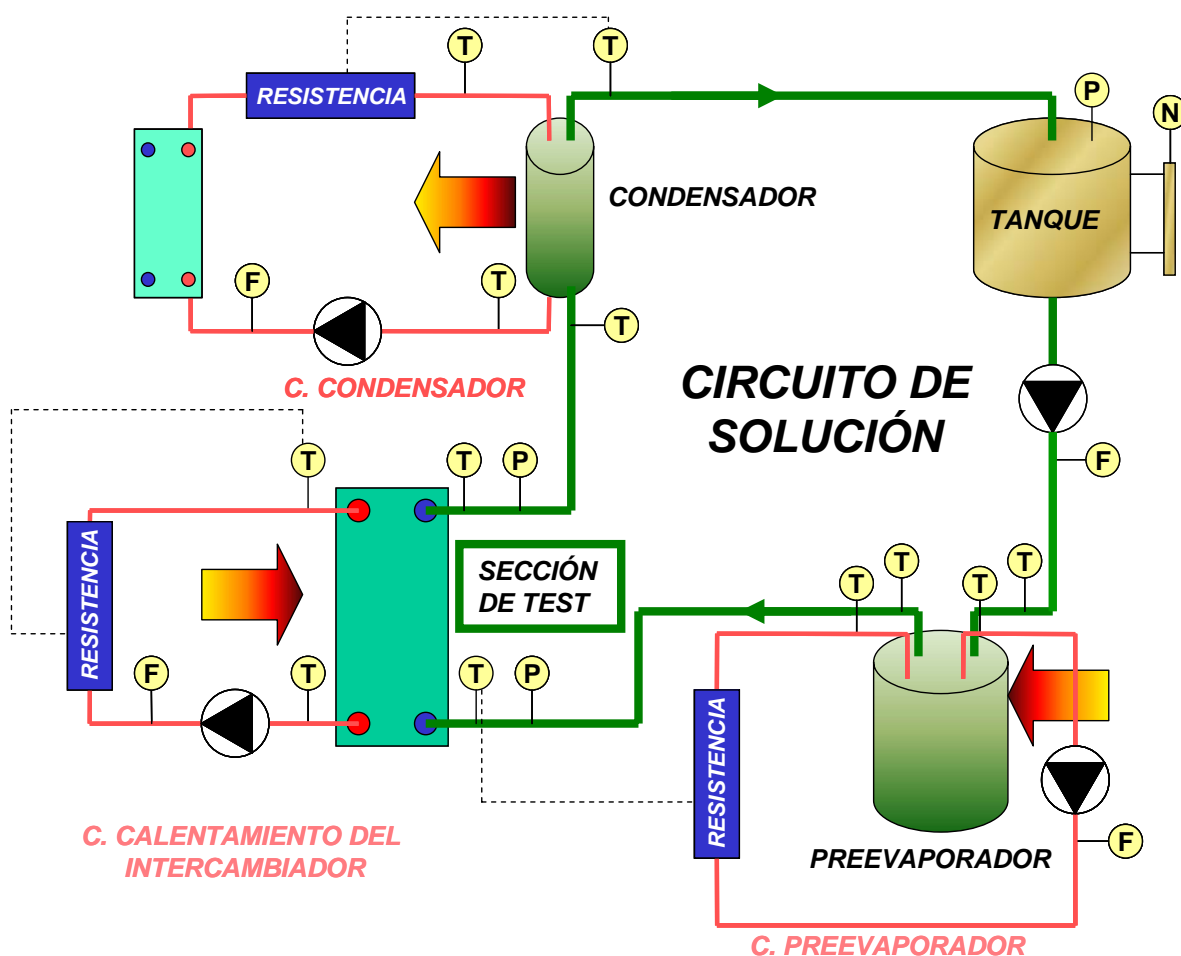


Figura 4.2 Vista esquemática del dispositivo experimental.

4.3.1. Circuito de solución

En la Figura 4.3 se muestra esquemáticamente el circuito principal de la instalación construida. Este circuito consta de la sección de test (intercambiador de placas a ensayar), un condensador, para condensar el vapor generado, un tanque de almacenamiento de solución, una bomba de recirculación, y un preevaporador para establecer las condiciones de entrada al intercambiador.

La solución almacenada en el tanque de solución se bombea a través del preevaporador, donde la solución se precalienta para establecer las condiciones de entrada de la solución al intercambiador, que pueden ir desde condiciones de subenfriamiento a una cierta generación de título de vapor. Atravesando el preevaporador, la solución entra en el intercambiador de placas, donde por medio del aporte de calor del circuito de calentamiento se produce la ebullición de la solución. El flujo bifásico resultante a la salida del intercambiador se condensa por medio del condensador y se almacena la solución en el tanque de almacenamiento. De este circuito se miden temperaturas en la entrada y en la salida del intercambiador de placas que permitiría obtener los coeficientes de transferencia de calor experimentales, y la temperatura de salida de la solución del condensador. Las temperaturas de entrada y de salida del preevaporador se tenían como dato accesorio para verificar que el comportamiento de la instalación fuese el correcto, pues las temperaturas de operación suponían un riesgo. Además de la medida de temperaturas se dispuso de medidas de presión a la entrada y a la salida del intercambiador de placas, y la presión del tanque de solución, que junto con la temperatura de

salida del condensador permitía establecer la concentración de equilibrio. Además se dispuso de un sensor de nivel que permitía obtener el nivel de llenado del circuito. La carga total del circuito eran sobre 12 litros.

El material utilizado para todo el circuito de solución era acero inoxidable. La bomba utilizada ha sido proporcionada por Micropump, correspondiendo al modelo 220 0/C GC M35 PTSF, y fue ensamblada por Axflow. Esta bomba está construida en acero inoxidable y es una bomba de engranajes de acople magnético. Las especificaciones se muestran en la Tabla 4.2.



Figura 4.3 Esquema del circuito principal del dispositivo experimental.

Tabla 4.2. Descripción técnica de la bomba de arrastre magnético.

Bomba arrastre magnético para circuito solución (Modelo 220 (0C GC M35PTSF))	
Diseño de engranajes	Zapata de presión
Caudal máximo (l/min)	10
Velocidad máxima (rpm)	4000
Presión diferencial máxima (bar)	8,7
Máxima presión del sistema (bar)	103
Rango de viscosidad (cps)	0,2 a 1500
Máxima temperatura	177
Tipo de conexiones	3/8"

El tanque de almacenamiento de la solución era un depósito de acero inoxidable estándar. Un esquema de este depósito se muestra en la Figura 4.4. Este depósito constaba de varias conexiones de entrada y de salida, y dos conexiones auxiliares que se utilizaron para conectar un nivel de boya. Se escogió el más pequeño de los disponibles en el CREVER para la realización de anteriores tesis con el objetivo de minimizar la carga de la solución. La concentración de amoníaco en el dispositivo experimental se estableció considerando condiciones de saturación con la temperatura de salida del condensador y la presión del tanque. Estas medidas se compararon con las medidas de densidad obtenidas en el caudalímetro de tipo coriolis, y con medidas de densidad en un densímetro de laboratorio de tipo tubo vibrante, lo que permitió establecer el error en la determinación de la concentración de la solución en un 1 %.

El resto de elementos del dispositivo experimental son comunes a los circuitos auxiliares de la instalación, y por tanto se describen en los siguientes apartados.

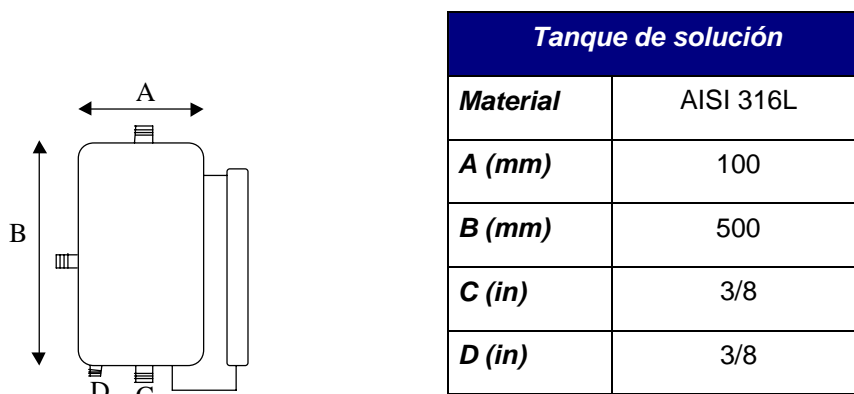


Figura 4.4 Dimensiones del tanque usado como tanque de solución.

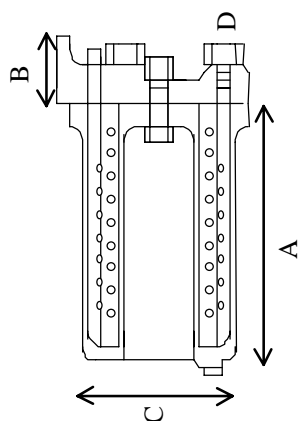
4.3.2. Circuitos auxiliares de la instalación

Como se ha visto en la Figura 4.2 existen tres circuitos auxiliares: el circuito de preevaporación, el circuito de calentamiento, y el circuito de condensación. En estos circuitos se ha utilizado agua como fluido de trabajo. Para controlar las temperaturas de operación del dispositivo se utilizaron resistencias eléctricas controladas por PID y comandadas por tiristores.

4.3.2.1. Circuito del preevaporador

El circuito del preevaporador tenía como objetivo el precalentamiento de la solución antes de entrar en el intercambiador de placas. Este circuito es un circuito cerrado que consta de una resistencia eléctrica, una bomba de recirculación y el preevaporador. El preevaporador constaba de dos intercambiadores de serpentín de acero AISI 304, en una carcasa de acero al carbono. La solución se hizo pasar por el lado de tubos, y el agua por el lado de la carcasa, conectándose los dos intercambiadores en serie. En la Figura 4.5 se muestran las dimensiones de estos intercambiadores.

La bomba de recirculación tenía como requerimiento buscado que fuese capaz de aguantar temperaturas de 140 °C. Esta bomba utilizada corresponde al modelo GET - E de la marca Salmson, diseñada para agua como fluido de trabajo, con temperaturas máximas de 210 °C. La única tarea de mantenimiento que se realizó fue el cambio de los retenes y el cambio de los rodamientos, y estas tareas se realizaron al comienzo de la experimentación.



Intercambiador de calor marca BW/IP	
Modelo	NX 0750 FW
Material tubo	AISI 304
Material envolvente	Acero al Carbono
Diámetro exterior del serpentín (mm)	19
Área intercambio (m²)	0.54
Peso (kg)	54
A (mm)	406
B (mm)	106
C (mm)	205
D (in)	¾

Figura 4.5 Dimensiones geométricas de los intercambiadores utilizados como preevaporador.

4.3.2.2. Circuito de calentamiento

El circuito de calentamiento tenía como elemento común al circuito de solución el intercambiador de placas ensayado, el cual ya se ha descrito anteriormente. Este circuito constaba de una resistencia eléctrica que proporcionaba el calor necesario en el intercambiador de placas, una bomba de recirculación, y el intercambiador de placas. La bomba también tenía el requerimiento de temperaturas máximas de trabajo de 140°. La bomba utilizada corresponde a un modelo de la marca SIHI de tipo centrífugo modelo AKHE1201BN137010 de 0.75 kW. Esta bomba es capaz de aguantar 320 °C a 10 bares en servicio, muy lejos de las especificaciones requeridas.

4.3.2.3. Circuito del condensador

El circuito del condensador constaba de un intercambiador de calor como condensador, una resistencia eléctrica para controlar la temperatura de la mezcla a la salida del condensador, un intercambiador de placas convencional de juntas de goma para intercambiar calor entre el agua de refrigeración del condensador y agua de red, y una bomba de recirculación.

El condensador utilizado en la experimentación es un intercambiador compacto de tipo espiral, modelo K4N construido por SPIREC, especialmente diseñados para cambio de fase. La configuración de los flujos es algo compleja, como se puede apreciar en la Figura 4.6. La marca recomienda utilizar el lado de carcasa para que se produzca la condensación del fluido, respecto a la posición recomiendan que sea vertical. El funcionamiento del condensador no ha planteado problemas en su funcionamiento.

La bomba de recirculación era una bomba de recirculación tipo centrífuga convencional, con temperatura máxima de servicio de 90 °C. El intercambiador de placas utilizado para la transferencia de calor del circuito cerrado del condensador con el agua de red se instaló debido a la cantidad de sólidos disueltos que tenía el agua de red disponible. Este tipo de intercambiador se eligió por su facilidad de limpieza. De hecho durante toda la experimentación (2000 horas de trabajo estimadas), ha sido necesario limpiarlo varias veces.

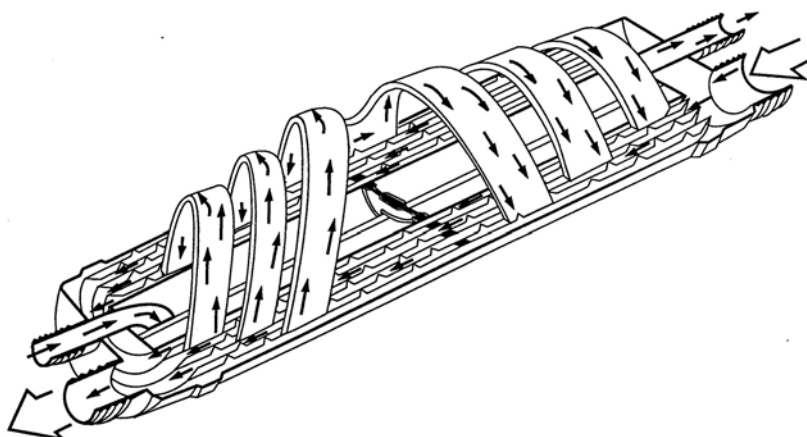


Figura 4.6. Esquema de flujos del intercambiador de calor instalado como condensador.

4.4. Instrumentación y control

Se han descrito hasta ahora los dispositivos de la instalación, con una breve descripción de cada uno de ellos. Los sensores y el sistema de control se describen a continuación.

4.4.1. Sensores de temperatura

Para la medida de la temperatura de las corrientes de solución y de agua de enfriamiento se emplearon termo-resistencias Pt 100, de 4 hilos, con un límite de temperatura máxima de 250 °C, y una precisión de ± 0.10 °C a 0 °C y de ± 0.35 °C a 100 °C sin calibración. Como esta precisión no era admisible para la obtención de datos experimentales se propuso una calibración de las mismas. Todas las temperaturas se calibraron utilizando un baño térmico marca HAAKE C35, modelo F6-C35, con una estabilización de las temperaturas en las experiencias de ± 0.04 K. A partir de estas medidas se establecieron rectas de calibración para cada uno de los sensores, de forma que se pudo asegurar para cada uno de los sensores una repetitibilidad con esta calibración de ± 0.1 K.

4.4.2. Medición de caudal

La medición del caudal de solución se ha hecho por medio de un caudalímetro de tipo coriolis, de la marca MicroMotion Elite y modelo CMF025M. Además de la buena precisión que tienen en la obtención de caudales, obtiene medidas de densidad por el método de tubo vibrante. Esto es especialmente útil cuando se trabaja con una mezcla binaria con suficiente diferencia de densidades entre los dos fluidos. La precisión en la medida del caudal se encuentra en el $\pm 0.1\%$ del fondo de escala, de ± 0.5 kg/m³ en la medida de la densidad. Este caudalímetro estaba conectado a un transmisor modelo RFT9739.

Para el caso del lado de calentamiento, debido a su coste, no estaba en ningún momento justificado el uso de un caudalímetro de tipo Coriolis. En su lugar se utilizó un caudalímetro tipo Vórtex, fabricado por Emerson Process, con una precisión de $\pm 0.65\%$ para números de Reynolds en la sección de medida superiores a 20000.

4.4.3. Sensores de presión

Se dispuso de dos transmisores de presión de la marca Wika modelo Unitrans, que medían las presiones de entrada y de salida del intercambiador con límite superior de 16 bar. Este tipo de transmisores constan de un sensor de presión, una interfaz de control, y un encapsulado con display. El rango de salidas es 4- 20 mA típicos de transmisores industriales. Este tipo de sensores de presión se han escogido en primer lugar por su display y en segundo lugar por su

precisión. La precisión de los equipos es inferior a 0.1 % del rango de medida, lo que equivale $\pm 0.016 \text{ bar}$.

En el caso del sensor de presión del tanque de solución, corresponde a un modelo más sencillo de la marca Wika modelo S10, sin display. Este sensor se caracteriza por los siguientes errores en su medición. Ninguno de los sensores de presión se han podido calibrar, así que se han considerado estos errores.

Tabla 4.3. Precisión del transmisor de presión situado en el tanque.

	Error
Precisión	$\pm 0.04 \text{ bar}$
Histéresis	$\pm 0.016 \text{ bar}$
Repetibilidad	$\pm 0.008 \text{ bar}$
Estabilidad a un año	$\pm 0.032 \text{ bar}$

4.4.4. Sensor de nivel

En el tanque de solución se situó un nivel, para la verificación de carga del equipo. Constaba de un transmisor de nivel de acero inoxidable de tipo flotador de la marca Kluber, modelo AEV 1.5 VK5 L500, dispuesto con convertidor R/I con señal de salida 4 20 mA.

Para el caso del nivel instalado el funcionamiento fue el correcto salvo para concentraciones altas de amoniaco donde la boya no era capaz de flotar, lo que obligó al vaciado de la máquina para verificar su funcionamiento. Cuando se comprobó que el único problema era la densidad del fluido, la máquina operaba a "ciegas". Este funcionamiento no planteó problemas debido al conocimiento previo de la carga de solución.

4.4.5. Sistema de control

Por motivos de seguridad de operación, el sistema de control instalado en la máquina era independiente del sistema de adquisición de datos, El sistema de control constaba de tres reguladores de tipo PID con programación por bloques. Este tipo de controladores corresponden a la serie LS-3000 de la marca Desin Instruments, con numerosas opciones de programación por teclado, que también pueden ser modificados por software. La señal de entrada de estos controladores provenía de sondas de temperatura tipo Pt100 situadas en la entrada de la solución al intercambiador, entrada del agua caliente al intercambiador, y la temperatura de condensación de la solución. Los controladores actuaban con una señal de mando de tipo 0-10 V sobre tres tiristores trifásicos modelo UPTF de 45 A máx. de Desin Instruments. Los tiristores constaban con un sistema de disipación de tipo forzado sobre una superficie aleteada de aluminio. La relación entre temperaturas y resistencias del circuito se puede apreciar en la Tabla 4.4, y el esquema de control se puede apreciar en la Figura 4.7.

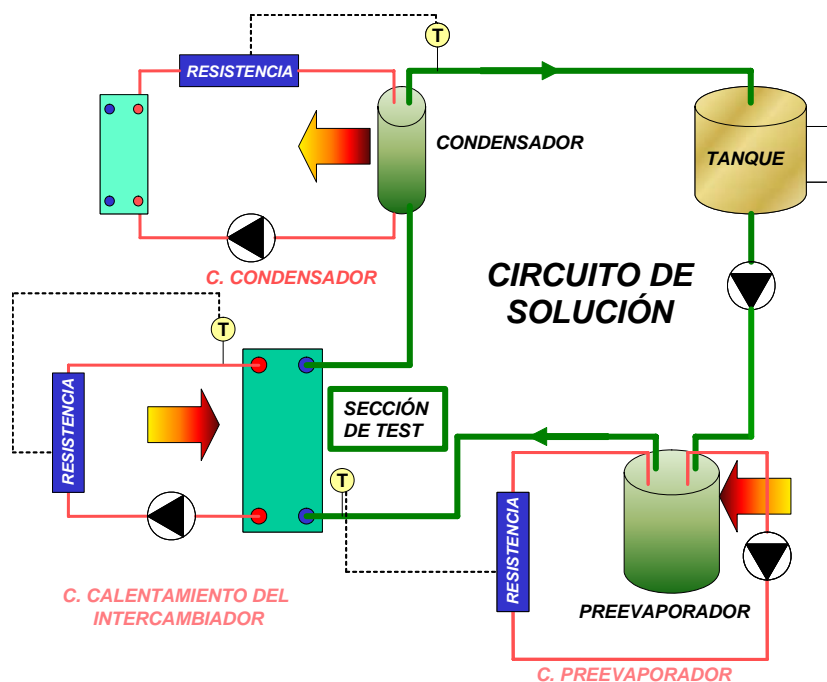


Figura 4.7. Esquema de mando de la instalación.

Tabla 4.4. Relación entre las resistencias eléctricas y las variables controladas.

<i>Resistencia</i>	<i>Temperatura controlada</i>
Resistencia circuito de preevaporador	Entrada de la solución al intercambiador
Resistencia circuito de condensación	Salida de la solución del condensador
Resistencia circuito calentamiento	Entrada del agua de calentamiento al intercambiadorde placas

4.4.6. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos utilizado fue proporcionado por la marca Keithley, modelo 2700 de 6 1/2-dígitos. Este equipo puede medir voltajes, corrientes continua y alterna, resistencias de sensores a 2 y 4 hilos, temperaturas (termopar, termo-resistores y RTD de 4 hilos), frecuencias y periodos y realizar test de continuidad. Dispone de dos alojamientos para conectar tarjetas de adquisición de datos con 40 canales cada una, haciendo un total de 80 canales.

Este sistema de adquisición de datos se conecta a un PC vía conexión GPIB o RS-232, para el registro de las señales de medidas. El programa del mismo fabricante permite guardar los datos y generar gráficas que emulan un registrador industrial, además de leer los valores instantáneos. El escaneo es secuencial, y gracias a una sencilla interfaz gráfica es posible configurar el calibrado de señales por medio de funciones lineales, el tiempo entre diferentes medidas y el tiempo de retardo entre la medida de los canales.

La principal conclusión de la utilización de este equipo ha sido la de un funcionamiento muy sencillo, siendo los tiempos de aprendizaje del software muy cortos.

4.5. Carga de la mezcla amoniaco/agua y determinación de la concentración de la mezcla

La primera carga realizada en la máquina se preparó en el exterior, cargando en un depósito externo donde previamente se había hecho el vacío, la carga deseada de agua, para después, refrigerando el depósito por medio de un serpentín ir realizando la carga de amoniaco. A la hora de introducir la solución en la planta, se hacía vacío en la instalación y la mezcla se iba introduciendo en la máquina desde la fase líquida. Las cargas posteriores se hicieron directamente en el tanque de solución, en un primer lugar introduciendo el agua y posteriormente el amoniaco.

En cuanto al cálculo de la concentración de los ensayos se han probado diferentes métodos de cálculo. En primer lugar se ha equipado el dispositivo experimental con un caudalímetro de tipo coriolis, lo que permitía establecer densidades del fluido que circula por el interior. Se había inferido también la concentración del equilibrio formado en el tanque de solución, con la presión del tanque y la temperatura de entrada de la solución al tanque en cada uno de los experimentos. Los resultados de estos dos métodos se compararon con mediciones de densidades en un densímetro de laboratorio de tipo tubo vibrante haciendo extracciones puntuales. Las diferencias entre los tres métodos de cálculo se han estimado en un 1 % en peso. Obtener mejores datos en la estimación de la concentración se consideró que era probablemente difícil, pues influye el error de las expresiones que estiman la concentración a partir de la densidad y el equilibrio.

4.6. Obtención de datos experimentales en los ensayos realizados

En la experimentación se obtienen datos experimentales de temperatura de entrada y salida del agua de calentamiento y temperatura de entrada y salida de la solución al intercambiador. Se obtienen además los datos experimentales de caudal en los dos lados del intercambiador y la presión de entrada y la presión de salida de la solución del intercambiador. De esta forma y conociendo la concentración de la mezcla en ebullición se obtiene experimentalmente el coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador. Eq. (4.1).

$$U_{\text{exp}} = \frac{Q_{\text{medio}}}{(A_{\text{int}} \Delta T_{\text{lm}})} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

Con Q_{medio} calculado por medio de Eq. (4.2)

$$Q_{\text{medio}} = \frac{(Q_{w,\text{cal}} + Q_{s,\text{sol}})}{2} \quad \text{Eq. (4.2)}$$

Y tanto $Q_{w,\text{cal}}$ como $Q_{s,\text{sol}}$ obtenidos por medio de Eq. (4.3) y Eq.(4.4), respectivamente

$$Q_{w,\text{cal}} = m_{\text{cal}} C_{p,\text{cal}} \Delta T_{\text{cal}} \quad \text{Eq. (4.3)}$$

$$Q_{s,\text{sol}} = m_{\text{sol}} \Delta h_{\text{sol}} \quad \text{Eq.(4.4)}$$

El uso de la media logarítmica de la diferencia de temperaturas se obtiene como expresión si se considera un coeficiente global de transferencia de calor constante en el intercambiador, afirmación que no es cierta para condiciones de ebullición. A tal efecto Claesson (2005), hizo un estudio donde se discutía la validez de esta simplificación, donde encontró que estas diferencias podían ser pequeñas para determinadas condiciones. A efectos de simplificación por conveniencia se considerará como válida esta consideración.

En la Eq. (4.1) el coeficiente global de transferencia de calor experimental obtenido en el intercambiador, depende tanto del coeficiente de transferencia de calor del lado de calentamiento como el coeficiente de transferencia de calor del lado de la solución siendo la expresión Eq.(4.5), la que relaciona los dos coeficientes de convección.

$$U_{global,teórico} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_{w,cal}}\right) + \left(\frac{1}{\alpha_{s,sol}}\right) + \frac{e}{\kappa_{pared}}} \quad \text{Eq. (4.5)}$$

Para calcular el coeficiente de ebullición a partir del coeficiente global de transferencia de calor experimental se necesita conocer de antemano el coeficiente de transferencia de calor en simple fase el fluido de calentamiento. Con el objetivo de obtener los coeficientes del lado de calentamiento se hicieron ensayos de transferencia de calor con agua en los dos lados del intercambiador obteniéndose una correlación experimental, según el procedimiento que se proporciona en el apartado siguiente.

4.6.1. Reducción de datos experimentales en los experimentos de simple fase

Para la obtención de la correlación de simple fase que permita obtener los coeficientes de experimentales de ebullición transferencia de calor en ebullición, han sido realizados experimentos de transferencia de calor en simple fase con agua en los dos lados del intercambiador. Estos experimentos han sido realizados con varios flujos máxicos, dentro del rango de temperaturas de los ensayos de ebullición. El procedimiento de obtención de la correlación de simple fase se describe a continuación.

El balance de energía del lado de calentamiento se puede expresar con la Eq. (4.6)

$$Q_{w,cal} = m_{w,cal} C_{p,w,cal} \Delta T_{cal} \quad \text{Eq. (4.6)}$$

En el lado de solución, con agua en el interior del circuito, se puede plantear el balance de energía también según Eq. (4.7).

$$Q_{w,sol} = m_{w,sol} C_{p,w,sol} \Delta T_{sol} \quad \text{Eq. (4.7)}$$

El valor usado para el calor intercambiado fue tomado como la media de los valores obtenidos por Eq. (4.6) y Eq. (4.7), según Eq. (4.8)

$$Q_{medio} = \frac{Q_{w,cal} + Q_{w,sol}}{2} \quad \text{Eq. (4.8)}$$

El coeficiente global de transferencia de calor experimental U_{exp} de Eq. (4.9), fue calculado con el valor del calor medio obtenido en la expresión Eq. (4.8), el área nominal de transferencia de calor A_{int} y diferencia media logarítmica de temperaturas ΔT_{lm} , según la expresión Eq. (4.9).

$$U_{exp} = \frac{Q_{medio}}{(A_{int} \Delta T_{lm})} \quad \text{Eq. (4.9)}$$

El valor experimental obtenido en el coeficiente de transferencia de calor U_{exp} obtenido en Eq. (4.9), se compara posteriormente con el coeficiente de transferencia de calor global teórico calculado ($U_{teórico}$), usando las ecuaciones Eq.(4.10-12), sustituyendo los valores de $\alpha_{w,cal}$ y $\alpha_{w,sol}$ calculados por medio de una ecuación de Dittus Boelter modificada, y ajustando los valores a, b, y c de Eqs. (4.11) y (4.12), por mínimos cuadrados considerando todos los experimentos realizados.

$$\left(\frac{1}{U_{calc}} \right) = \left(\frac{1}{\alpha_{w,cal}} \right) + \left(\frac{1}{\alpha_{w,sol}} \right) + \frac{e}{\kappa_{pared}} \quad \text{Eq. (4.10)}$$

$$Nu_{w,cal} = a Re_{w,cal}^b Pr_{w,cal}^c \quad \text{Eq. (4.11)}$$

$$Nu_{w,sol} = a Re_{w,sol}^b Pr_{w,sol}^c \quad \text{Eq. (4.12)}$$

4.6.2. Reducción de datos experimentales en cambio de fase

Una vez obtenidos los coeficientes de transferencia de calor del lado de calentamiento por medio de la correlación propuesta, ya es posible obtener los coeficientes experimentales de ebullición a partir del coeficiente de transferencia de calor.

El calor medido en el lado de calentamiento se calcula a partir del caudal de calentamiento y las temperaturas de entrada y de salida del agua del intercambiador. Eq.(4.13).

$$Q_{w,cal} = m_{w,cal} Cp_{w,cal} \Delta T_{w,cal} \quad \text{Eq. (4.13)}$$

El coeficiente global de transferencia de calor en el intercambiador de placas se obtiene a partir del calor del lado de calentamiento obtenido por medio de Eq. (4.13) y las temperaturas de entrada y salida del lado de calentamiento y del lado de la solución. Eq. (4.14).

$$Q_{cal} = U_{global} \cdot \Delta T_{mlog} \quad \text{Eq.(4.14)}$$

El coeficiente de transferencia de calor fue determinado por medio de Eq. (4.15), que expresa la relación entre el coeficiente de transferencia de calor experimental, con el coeficiente de transferencia de calor del lado de calentamiento, obtenido por el procedimiento descrito en el apartado anterior.

$$\left(\frac{1}{\alpha_{s,sol}} \right) = \left(\frac{1}{U_{global}} \right) - \left(\frac{1}{\alpha_{w,cal}} \right) - \frac{e}{\kappa_{pared}} \quad \text{Eq. (4.15)}$$

Las entalpías de entrada y de salida de la solución a la entrada y a la salida del intercambiador, se obtuvieron considerando condiciones de equilibrio a la entrada y a la salida del intercambiador, por medio de la concentración global de la mezcla, y la temperatura y presión medidas a la entrada y a la salida del intercambiador. Eq. (4.16) y Eq. (4.17).

$$(x_{ent,sol}, y_{ent,sol}, h_{ent,sol}) = f(T_{ent,sol}, P_{ent,sol}, w|_{\% \text{ peso}}) \quad \text{Eq. (4.16)}$$

$$(x_{sal,sol}, y_{sal,sol}, h_{sal,sol}) = f(T_{sal,sol}, P_{sal,sol}, w|_{\% \text{ peso}}) \quad \text{Eq. (4.17)}$$

El título de vapor se calculó por medio de los valores de entalpía de entrada y de salida de la solución (Eq. (4.16) y Eq. (4.17)). Cuando el fluido entra en el intercambiador en condiciones de saturación, el título de vapor a la entrada del intercambiador se calcula por medio de Eq. (4.18).

$$\text{Título} = \frac{h_{entrada} - h_{l,sat}}{h_{v,sat} - h_{l,sat}} \quad \text{Eq. (4.18)}$$

Y cuando la solución entra en condiciones de subenfriamiento, se puede expresar el título de subenfriamiento por medio de Eq. (4.19).

$$\text{Título} = -\frac{Cp\Delta T_{sub}}{h_{v,sat} - h_{l,sat}} \quad \text{Eq. (4.19)}$$

De forma que el título de vapor medio en el intercambiador se calcula como media de los títulos de vapor de entrada y de salida. Eq.(4.20).

$$\text{Título}_{medio} = \frac{\text{Título}_{ent} + \text{Título}_{sal}}{2} \quad \text{Eq. (4.20)}$$

Para verificar la validez de los experimentos, se comparó el calor calculado por medio de la ecuación Eq. (4.13), con el balance de energía obtenido en el lado de solución, Eq. (4.21). Sólo si la diferencia entre estos dos balances era inferior al 10 % en cada uno de los experimentos, los datos experimentales fueron consideradas como válidos.

$$Q_{s,sol} = m_{s,sol} \Delta h_{s,sol} \quad \text{Eq. (4.21)}$$

4.7. Resultados típicos obtenidos

En la Figura 4.8 se muestran los resultados típicos obtenidos en la instalación para las temperaturas medidas en el intercambiador. Los datos experimentales han sido obtenidos para un flujo másico de $140 \text{ kg/m}^2\text{s}$, con un flujo de calor medio de 30 kW/m^2 . En la Figura 4.9 se muestra la evolución de la temperatura de entrada de la solución al intercambiador, donde se pueden apreciar las inestabilidades que sufría el dispositivo experimental.

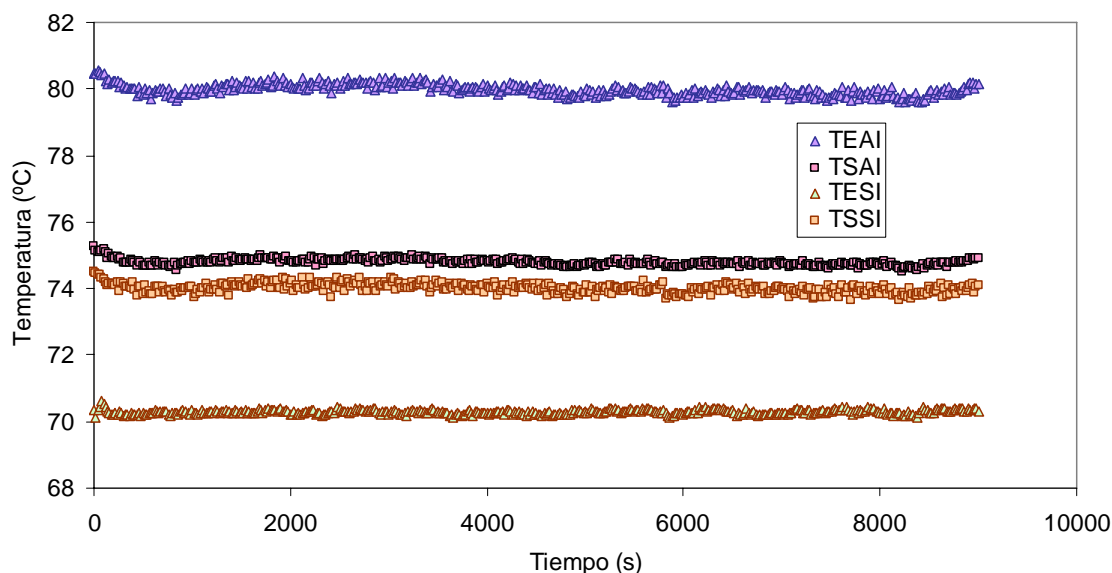


Figura 4.8 Resultados típicos de temperatura de entrada al intercambiador

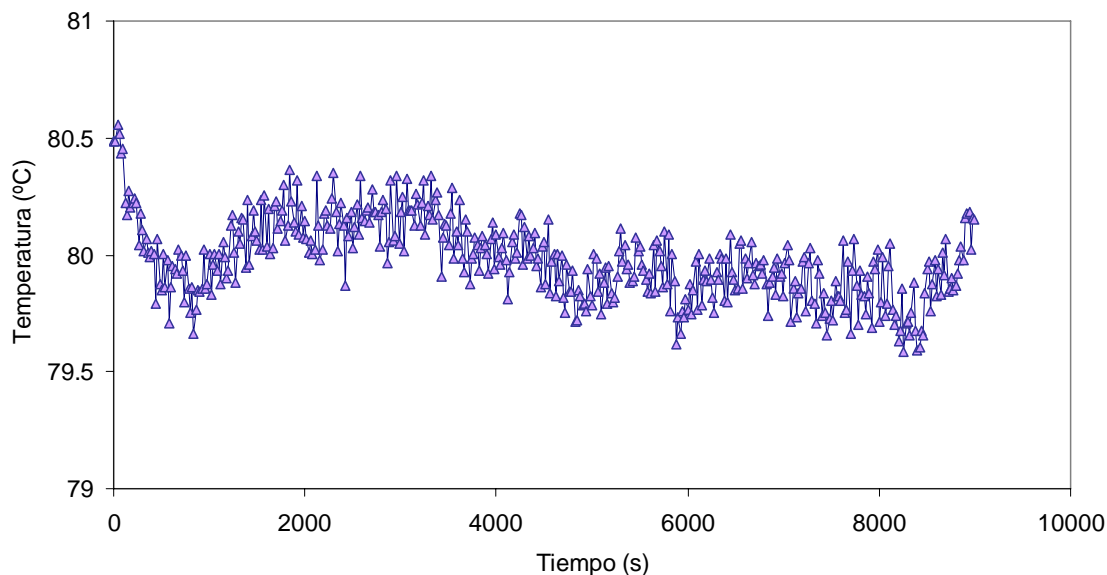


Figura 4.9 Evolución de la temperatura de entrada del agua al intercambiador para un ensayo experimental típico.

En cuanto a los cálculos realizados en el intercambiador, en la Figura 4.10 se muestra el flujo de calor calculado para el lado de calentamiento y para el lado de la solución. Como se puede apreciar, si bien para el flujo de calor calculado para el lado del calentamiento se puede considerar estable, en el caso de la solución, se tenían unas ciertas inestabilidades. Esto se debe a la relación de caudales considerados en las experimentaciones, provocando que las inestabilidades apreciadas en el lado de calentamiento, queden amplificadas en el lado de la solución.

En la Figura 4.11 se muestra el coeficiente experimental calculado para esta experiencia típica. En este caso, se puede apreciar que el coeficiente se mostraba razonablemente estable en las experiencias.

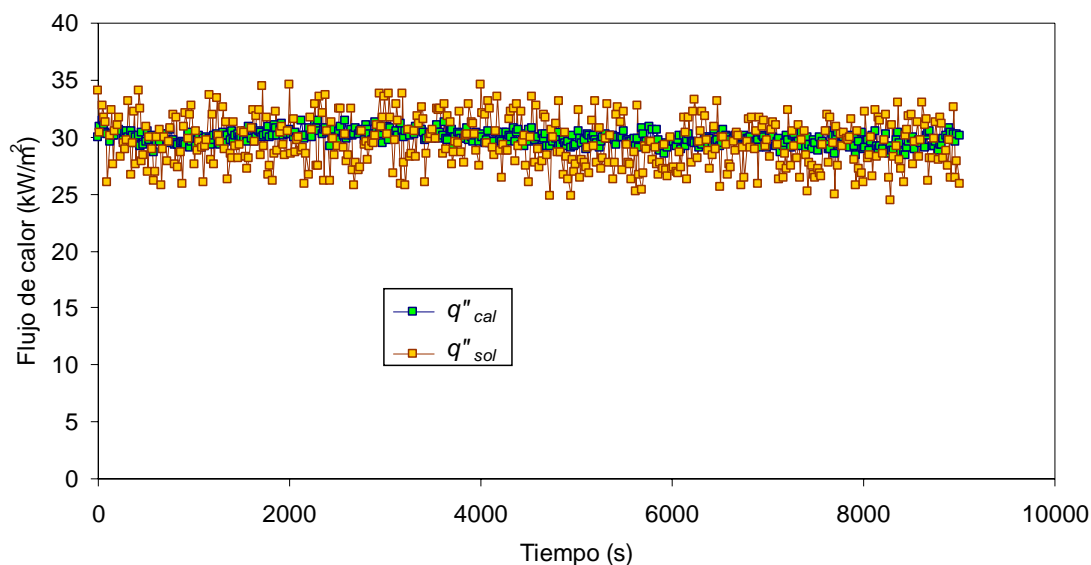


Figura 4.10 Evolución de los flujos de calor de calentamiento y solución calculados para un ensayo experimental típico.

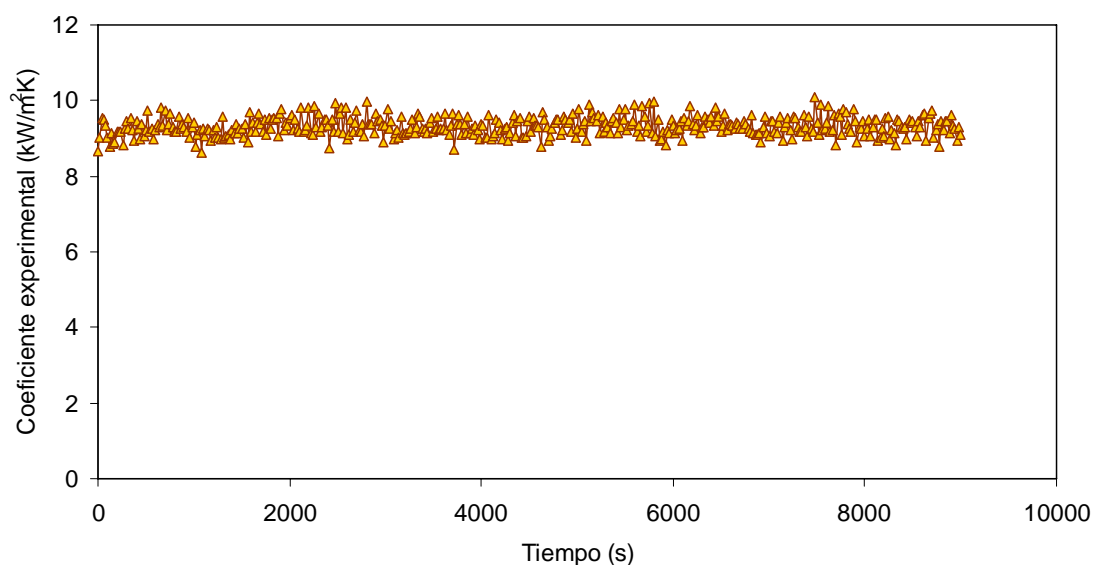


Figura 4.11 Evolución de los coeficientes de ebullición de la mezcla para un ensayo experimental típico.

El cálculo del título de vapor depende principalmente de las entalpías de entrada y de salida de la mezcla, que fueron calculadas a partir de las condiciones de equilibrio consideradas en el intercambiador. Como se puede apreciar en la Figura 4.12, a pesar de que los balances de energía en el lado de la solución daban dispersiones grandes, el título de vapor medio en el intercambiador se muestra aceptablemente estable.

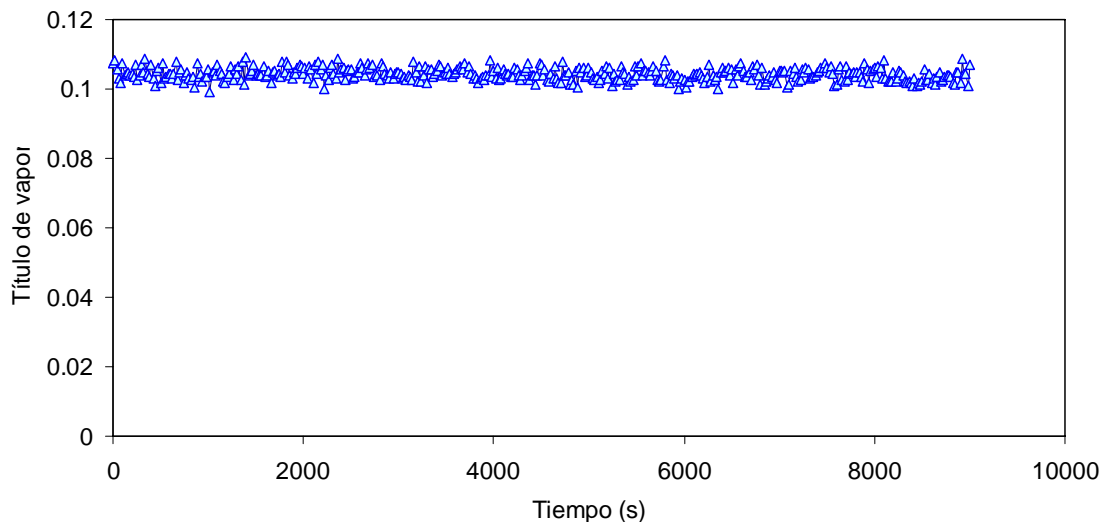


Figura 4.12 Evolución de los coeficientes de ebullición de la mezcla para un ensayo experimental típico.

UNIVERSITAT ROVIRA I VIRGILI
ESTUDIO DEL PROCESO DE EBULLICIÓN FORZADA DE LA MEZCLA AMONIACO/AGUA EN INTERCAMBIADORES DE PLACAS PARA EQUIPOS DE
REFRIGERACIÓN POR ABSORCIÓN.
Francisco Táboas Touceda
ISBN: 978-84-690-7588-3 / DL: T.1587-2007

Bibliografía

Claesson, J. (2004). Thermal and Hydraulic performance of compact brazed plate heat exchangers operating as evaporators in domestic heat pumps. Stockholm, KTH (Royal institute of technology): 252.

Claesson, J. (2005). *Correction of Logarithmic Mean Temperature Difference in a compact brazed plate evaporator assuming heat flux governed flow boiling heat transfer coefficient*. International Journal of Refrigeration-*Revue Internationale Du Froid* **28**(4): 573-578.

Margat, L. (1997). Étude thermohydraulique en evaporation de la charge en fluide diphasique dans un canal corrugué brasé. Grenoble, Université de Provence Aix-Marseille: 306.