

<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>6.1</b>
6.1. Conclusiones del análisis bibliográfico de ebullición.....	6.1
6.2. Conclusiones del análisis de la experimentación.....	6.2
6.3. Conclusiones del modelo de cálculo de la ebullición de amoníaco agua.....	6.3
6.4. Futuros trabajos a desarrollar.....	6.3
6.5. Bibliografía.....	6.5

## 6. Conclusiones

El trabajo desarrollado en esta tesis ha permitido avanzar en el conocimiento del proceso de ebullición forzada de la mezcla amoniaco/agua en intercambiadores de placas. Además, la información recopilada en la revisión bibliográfica aporta información sobre el proceso de ebullición de la mezcla en otras geometrías que pueden ser de gran interés para el diseño de generadores de equipos de absorción de amoniaco/agua.

Un resumen de las principales conclusiones de cada una de las partes de esta tesis se presenta a continuación.

### 6.1. Conclusiones de la revisión bibliográfica sobre intercambiadores de placas

En la revisión bibliográfica realizada se ha visto que la caracterización de la transferencia de calor y las pérdidas de carga en flujo forzado en simple fase se encuentra bien establecida, con resultados similares para todas las correlaciones consideradas. Estas correlaciones incluyen parámetros geométricos del intercambiador lo que permite establecer las diferencias de comportamiento de las diferentes corrugaciones de los intercambiadores de placas existentes en el mercado.

La revisión bibliográfica ha puesto de manifiesto la escasez de datos disponibles de ebullición forzada en estos intercambiadores. Los resultados hasta ahora no permiten concluir si en los intercambiadores de placas predomina la ebullición nucleada, convectiva, o coexisten los dos mecanismos. Los autores de dichos trabajos utilizan correlaciones de ebullición nucleada, otros autores plantean correlaciones de ebullición en flujo forzado en tubos, e incluso algunos se plantean correlaciones de ebullición específicas para la geometría ensayada con el fluido ensayado.

### 6.2. Conclusiones del análisis bibliográfico de la transferencia de calor de la ebullición nucleada y convectiva de fluidos puros y mezclas

Dado que las correlaciones recomendadas por la bibliografía para predecir los coeficientes de ebullición en intercambiadores de placas han incluido tanto correlaciones de ebullición en flujo forzado como correlaciones en ebullición nucleada, la revisión bibliográfica se ha extendido a datos experimentales de la mezcla amoniaco/agua en otras geometrías.

Los datos experimentales considerados del fluido puro agua en ebullición en recintos cerrados presentan desviaciones de hasta el 40 % para las correlaciones que mejor predicen el coeficiente de ebullición nucleada. En el caso del amoniaco estas desviaciones son mayores. Para el caso del agua, la mayoría de las correlaciones proporcionan resultados similares siendo las correlaciones de Gorenflo y la de Mostinski las que mejor explican el comportamiento experimental. En el caso del amoniaco, sin embargo, las dispersiones son mayores, siendo la correlación de Mostinski la que obtiene mejores predicciones.

La comparación de los datos experimentales de la mezcla amoniaco/agua en recintos cerrados se ha realizado a partir de los datos de Arima et al. (2003), Inoue et al. (2002b) e Inoue et al. (2002a). Con estos datos se ha propuesto una nueva correlación de ebullición nucleada en recintos cerrados que explica mejor el comportamiento de los coeficientes de ebullición nucleada frente a la concentración y el flujo de calor para la mezcla amoniaco/agua. El cálculo de la reducción de los coeficientes de ebullición nucleada mediante la correlación propuesta, tiene en cuenta tanto la diferencia de las temperaturas de rocío y de burbuja de la mezcla,

como la diferencia de concentraciones de las fases líquida y de vapor. Esta correlación será útil para el diseño de generadores de plantas de refrigeración de absorción industriales.

El análisis de datos bibliográficos de ebullición en flujo forzado de agua ha revelado el buen comportamiento de las correlaciones de ebullición de Shah, de Kandlikar y de Steiner-Taborek. La correlación de Jung ofrece una mejor predicción de los coeficientes en la zona de ebullición nucleada, aunque su tendencia es a ofrecer valores del coeficiente de ebullición superiores al del resto de correlaciones.

En el caso del amoníaco en flujo forzado en tubos, la precisión de las correlaciones consideradas es similar al obtenido para el agua. Sin embargo, los datos de Barthau (1976) se aproximan solamente a los obtenidos con la correlación de Steiner y Taborek, lo cual se puede justificar por el hecho de que estos autores utilizaron precisamente los datos experimentales de Barthau para ajustar el término de ebullición nucleada de su correlación.

En cuanto a la ebullición forzada de la mezcla amoníaco/agua sólo se han encontrado dos referencias. La primera corresponde a Rivera y Best (1999) para flujos máscicos inferiores a 10 kg/m<sup>2</sup>s, siendo los coeficientes experimentales superiores a las predicciones de las correlaciones. La segunda referencia corresponde a los trabajos de Khir et al. (2005a) y Khir et al. (2005b). Uno de estos trabajos corresponde a flujos máscicos altos de hasta 2700 kg/m<sup>2</sup>s para el cual las correlaciones consideradas predicen coeficientes de ebullición superiores a los datos experimentales. El otro trabajo realizado con flujos máscicos entre 30 y 90 kg/m<sup>2</sup>s, para títulos de vapor inferiores al 30% muestran una escasa dependencia del título de vapor lo que indicaría un predominio de la ebullición nucleada. Las correlaciones consideradas obtienen valores inferiores a los experimentales y la tendencia de las predicciones es fundamentalmente convectiva.

### **6.3. Conclusiones del análisis de la experimentación realizada en el intercambiador de placas**

El dispositivo experimental ha permitido realizar ensayos con flujos máscicos de solución entre 50 y 170 kg/m<sup>2</sup>s con flujos de calor entre 20 y 70 kW/m<sup>2</sup>, en las condiciones típicas de presión y concentración de un generador de un equipo de absorción de amoníaco/agua. Se han obtenido datos experimentales con una generación máxima de vapor de 30 %. Para títulos de vapor superiores se han encontrado problemas de inestabilidad.

En los experimentos realizados en el dispositivo experimental se han distinguido tres tendencias de los coeficientes de transferencia de calor en ebullición conforme se avanza en la curva de ebullición: Una primera tendencia de crecimiento rápido de los coeficientes de transferencia de calor hasta un título de un 10%. Una segunda tendencia a partir de este título, donde los coeficientes descienden ligeramente conforme el título de vapor aumenta, siendo el tamaño de esta zona menor cuanto mayor es el flujo máscico ensayado, y una tercera zona de ligero crecimiento de los coeficientes. Este tercer comportamiento de los coeficientes solo fue apreciado para los flujos máscicos grandes.

De todas las variables consideradas, el flujo máscico influencia en mayor medida los coeficientes de ebullición. El flujo de calor solo influye en el valor de los coeficientes de ebullición en la zona donde la tendencia de los coeficientes se estabiliza pero su efecto es pequeño frente al flujo máscico. Los datos experimentales obtenidos a concentraciones y presiones diferentes no mostraron ninguna tendencia concluyente.

Los datos experimentales obtenidos experimentalmente han manifestado, dependiendo del flujo máscico de la mezcla, la presencia de efectos de nucleación y efectos convectivos para las

condiciones ensayadas. La calidad de los datos experimentales se han considerado como satisfactorios y dentro de lo adecuado en este tipo de experimentos.

## 6.4. Conclusiones del análisis de correlaciones aplicadas a los datos experimentales de ebullición de la mezcla amoniaco agua

Ninguna de las correlaciones bibliográficas consideradas es capaz de predecir aceptablemente el comportamiento de los datos experimentales obtenidos en este trabajo, en las condiciones consideradas, sobretodo en la zona de aparente nucleación. Como se considera que los coeficientes de transferencia de calor en ebullición en recintos cerrados se encuentran bien establecidos con la correlación propuesta, se entiende que puede existir algún efecto sobre los coeficientes de ebullición nucleada que no se encuentre reflejado en estas correlaciones.

Dado que ninguna de las correlaciones propuestas explica la tendencia de los datos experimentales, se han propuesto tres tipos de correlaciones modificando las constantes de los mismos:

- Correlación de ebullición convectiva pura, donde los efectos de nucleación no se consideran.
- Correlación propuesta por Kandlikar (1990), para establecer el comportamiento de los coeficientes de ebullición en intercambiadores de placas.
- Correlación de tipo asintótico donde los efectos de nucleación y convección se suprimen mutuamente.

Los tres tipos de correlaciones consideradas no son capaces de predecir el comportamiento de los coeficientes de ebullición en la zona de aparente nucleación. El modelo de Kandlikar se acerca mucho a los datos experimentales, sólo considerando una corrección en el exponente del número convectivo, lo que manifiesta que los modelos de ebullición convectiva si son modificados pueden ser aplicados a geometrías complejas.

Para mejorar la predicción de los coeficientes en la zona de ebullición nucleada se propone una nueva correlación que considera dos zonas de ebullición en función de la velocidad del líquido y de vapor en el intercambiador. El criterio ha sido elegido por conveniencia, por lo cual debiera de ser verificado en otros intercambiadores de placas. La predicción de los coeficientes se ajusta a las tendencias de los datos experimentales tanto en la zona de ebullición convectiva como en la zona de aparente nucleación.

## 6.5. Futuros trabajos a desarrollar

A partir de este trabajo de investigación se plantean futuros trabajos de investigación:

- Se propone la obtención de nuevos datos experimentales de la mezcla en ebullición en recintos cerrados, pues el modelo de cálculo de coeficientes de ebullición nucleada con la mezcla amoniaco/agua no está suficientemente contrastado, al haberse comparado con datos experimentales de dos fuentes bibliográficas que pertenecen al mismo grupo investigador.
- Se propone como trabajo futuro la construcción de un dispositivo experimental capaz de medir coeficientes de transferencia de calor en ebullición con la mezcla amoniaco/agua en tubos lisos, pues los datos experimentales de ebullición de la mezcla amoniaco/agua en tubos lisos se han considerado como escasos para establecer conclusiones.

En cuanto al dispositivo experimental se plantean como trabajos futuros los siguientes:

- Se sugiere modificar tanto el circuito de entrada al intercambiador, como el circuito de salida del intercambiador hasta el condensador. A pesar de que

obtener experimentalmente títulos de vapor más altos no son de aplicación en equipos de absorción, estos datos permitirían el desarrollo de correlaciones más precisas en la zona de ebullición convectiva.

- Sería necesario plantear otros métodos de toma de datos en el dispositivo experimental, si se quiere estudiar un intercambiador de placas como generador por termosifón que incluyan las pérdidas de carga y el estudio de la fracción de vacío en el intercambiador.