

3. Análisis crítico de correlaciones de ebullición.....3.1

3.1. Ebullición en recintos cerrados.....	3.2
3.1.1. Resultados de las correlaciones con datos experimentales de agua.....	3.3
3.1.2. Resultados de las correlaciones con datos experimentales de amoníaco.....	3.6
3.1.3. Resultados y discusión de las predicciones de las correlaciones en su aplicación a la mezcla amoníaco/agua.....	3.9
3.1.4. Correlación propuesta para el cálculo de los coeficientes de ebullición de la mezcla en recintos cerrados.....	3.13
3.2. Ebullición forzada	3.16
3.2.1. Resultados de las correlaciones con datos experimentales de agua.....	3.16
3.2.2. Resultados de las correlaciones con datos experimentales de amoníaco.....	3.21
3.2.3. Resultados y discusión de las predicciones de las correlaciones en su aplicación a la mezcla amoníaco/agua.....	3.28
3.3. Conclusiones.....	3.32

3. Análisis crítico de correlaciones de ebullición

Si bien el objetivo de esta tesis ha sido el estudio de intercambiadores de placas como generadores de equipos de absorción de amoniaco/agua, la inexistencia de datos experimentales de ebullición de esta mezcla en estos intercambiadores, y el relativo poco conocimiento experimental en ebullición de esta mezcla en otras geometrías ha condicionado este estudio. Según Thonon et al. (1997), en intercambiadores compactos es posible encontrar los dos regímenes de ebullición encontrados en tubos lisos: ebullición nucleada y ebullición convectiva, prevaleciendo uno de los dos fenómenos en función de las características del flujo pero también de la geometría del intercambiador. Del trabajo de Thonon et al. (1997), puede extraerse que es posible considerar una correlación de ebullición forzada en tubos lisos (donde se incluyesen los fenómenos convectivos y de ebullición nucleada) y adaptarla a intercambiadores compactos, aunque debiera de ser modificada para considerar el efecto de la geometría en el intercambiador. Otros autores, Tran (1999) y Wadekar (1995), por contra, muestran que para intercambiadores compactos, los coeficientes de ebullición no dependen del título de vapor en el intercambiador, manifestando que los fenómenos convectivos son inexistentes.

Los datos experimentales de esta tesis obtenidos en el intercambiador de placas muestran una dependencia del título de vapor, y una ligera dependencia del flujo de calor, manifestando la existencia de los dos tipos de mecanismos de transferencia de calor en ebullición, acercándose a las conclusiones obtenidas por Thonon et al. (1997). Este hecho ha supuesto la necesidad de realizar una revisión bibliográfica de datos experimentales y correlaciones tanto de ebullición en recintos cerrados, como de los modelos de ebullición en flujo forzado de tubos lisos e intercambiadores compactos.

En este capítulo se muestra la revisión de datos experimentales en comparación con las predicciones de las correlaciones, con datos experimentales de ebullición los fluidos puros agua y amoniaco y mezclas de sus componentes, en condiciones de ebullición en recintos cerrados y ebullición en forzada en tubos. En la Tabla 3.1 se muestra un resumen de las correlaciones consideradas en este estudio, mientras que las expresiones de las correlaciones se encuentran en el Anexo I.

Tabla 3.1 Correlaciones consideradas en la revisión bibliográfica de correlaciones de ebullición.

<i>Ebullición en recintos cerrados</i>		<i>Ebullición forzada en tubos</i>	
<i>Fluidos puros</i>	<i>Mezclas</i>	<i>Fluidos puros</i>	<i>Mezclas</i>
Mostinski (1963)	Schlünder (1982)	Chen (1963)	Steiner (1993)
Cooper (1984)	Thome y Shakir (1987)	Jung et al. (1989)	Jung et al. (1989)
Stephan y Abdelsalam (1980)	Fujita y Tsutsui (1997)	Shah (1982)	Kandlikar (1990)
Gorenflo (1997)		Gungor y Winterton (1987)	
		Steiner y Taborek (1992)	
		Liu y Winterton (1991)	
		Kandlikar (1990)	
		Wadekar (1995)	

3.1. Ebullición en recintos cerrados

Se denomina ebullición en recintos cerrados, cuando el único movimiento del fluido se produce por corrientes de convección natural y la interacción de las burbujas en el seno del líquido. En la ebullición en recintos cerrados, las burbujas se forman en la superficie de calentamiento y este proceso se encuentra fuertemente influenciado por la diferencia de temperaturas entre la superficie de calentamiento y el líquido, siendo en el caso de fluidos puros, una relación de ΔT^3 . En la práctica, es muy difícil establecer una correlación capaz de calcular los coeficientes de ebullición con precisión, bajo todas las condiciones experimentales posibles, debido a que los coeficientes de ebullición también dependen del tipo de fluido, acabado de la superficie, geometría de la pared, e incluso de variables difíciles de controlar como impurezas.

En cuanto a ebullición en recintos cerrados con mezclas, se sabe que existe una fuerte reducción de los coeficientes de transferencia de calor incluso con pequeñas concentraciones de otro componente. Esta reducción de los coeficientes se debe a que en la interfase líquido/vapor se forma una resistencia a la transferencia de masa debido a fenómenos de difusión.

Las correlaciones utilizadas para modelizar los efectos de la mezcla, utilizan las características de las curvas de burbuja y de rocío para establecer esta reducción del coeficiente de ebullición ideal calculado a partir de correlaciones de fluidos puros. En este apartado se ha establecido una pequeña base de datos experimentales de ebullición en recintos cerrados de los fluidos agua pura, y amoníaco puro, y la mezcla amoníaco/agua, con el objetivo de establecer la correlación que mejor prediga el comportamiento de estos fluidos en condiciones de ebullición en recintos cerrados.

3.1.1. Resultados de las correlaciones con datos experimentales de agua

En la bibliografía se pueden encontrar muchos datos publicados acerca de la ebullición nucleada de agua. En los últimos años, los estudios realizados se han centrado en experimentos a presión atmosférica con diversos tipos de superficies.

Para este trabajo, se han seleccionado los datos de la clásica referencia de Addoms (1948) obtenidos en un filamento de platino de diámetro $D=0.122$ mm con un rango amplio de condiciones de flujo de calor y presiones. Se han considerado también los datos experimentales de Kang (2000), obtenidos a presión atmosférica con tubos en posición horizontal, en su estudio del efecto de la rugosidad en la ebullición en tubos colocados en diferentes posiciones con respecto a la horizontal (de 0° , 45° , y 90°). Además de estos datos, se ha contado con los datos experimentales de diferentes autores recopilados por Gorenflo (1997) en el VDI Heat Atlas. Con respecto a esta última referencia, estos datos se han obtenido a presiones relativas diferentes y sólo se han considerado en el análisis de errores.

Los datos experimentales de esta base de datos se han comparado con los datos experimentales de Arima et al. (2003) y los datos experimentales de Inoue et al. (2002a) e Inoue et al. (2002b), que realizaron un estudio experimental de ebullición en recintos cerrados con los fluidos puros agua y amoniaco y mezclas de estos componentes. Arima et al. (2003), obtuvieron datos experimentales de agua en una superficie plana horizontal de plata a las presiones de 2, 4 y 7 bar. Inoue et al. (2002a) e Inoue et al. (2002b), por contra, obtuvieron la curva de ebullición nucleada de agua a la presión de 1 bar en un rango de flujos de calor de 20 a 1600 kW/m^2 , y datos experimentales de ebullición de agua pura a 4 y 7 bar con flujos de calor de 400 kW/m^2 y 1500 kW/m^2 , en un alambre de 0.3 mm de diámetro y 37 mm de longitud.

En la Figura 3.1 a) se representan los datos de ebullición de agua de Addoms (1948) y Kang (2000) e Inoue et al. (2002a), a presión atmosférica, y se comparan con las correlaciones de la bibliografía seleccionadas. Como puede apreciarse, las correlaciones consideradas predicen coeficientes de transferencia de calor similares para flujos de calor entre 50 y 100 kW/m^2 . Para flujos de calor por debajo de 50 kW/m^2 , la correlación de Gorenflo se acerca más a los datos experimentales y, finalmente, para flujos de calor por encima de 100 kW/m^2 , todas las correlaciones consideradas predicen valores similares y se encuentran cercanos a los datos experimentales de Addoms (1948), aunque sin embargo, los datos experimentales de Inoue et al. (2002a), se sitúan por debajo de las predicciones. En este caso, la correlación de Mostinski, que ofrece los valores más altos parece la correlación más adecuada para correlacionar los datos experimentales de estos autores a esta presión.

La Figura 3.1 b) muestra los datos experimentales presentados por Arima et al. (2003) de ebullición nucleada de agua sobre la superficie horizontal de plata a la presión de 2 bar. En contraste con los datos experimentales a la presión de 1 bar de Inoue et al. (2002a), los puntos experimentales se sitúan por encima de las predicciones de las correlaciones, incrementándose la diferencia a flujos de calor elevados. Esta apreciación muestra las diferencias obtenidas entre superficie plana de Arima y el alambre de platino de Inoue.

Para presiones superiores a la presión atmosférica hay muchos menos datos disponibles en la bibliografía. En la Figura 3.2 a), se muestran los datos experimentales obtenidos por Inoue et al. (2002a), donde se puede apreciar que la correlación de Mostinski (1963) sigue ofreciendo la mejor predicción de los datos experimentales. En cambio, los resultados experimentales de Addoms se ajustan muy bien a las predicciones de las correlaciones, como se puede apreciar en la Figura 3.2.b). La mejor predicción de los resultados experimentales en este caso se obtiene en este caso con las correlaciones de Stephan y Abdelsalam y la correlación de Gorenflo.

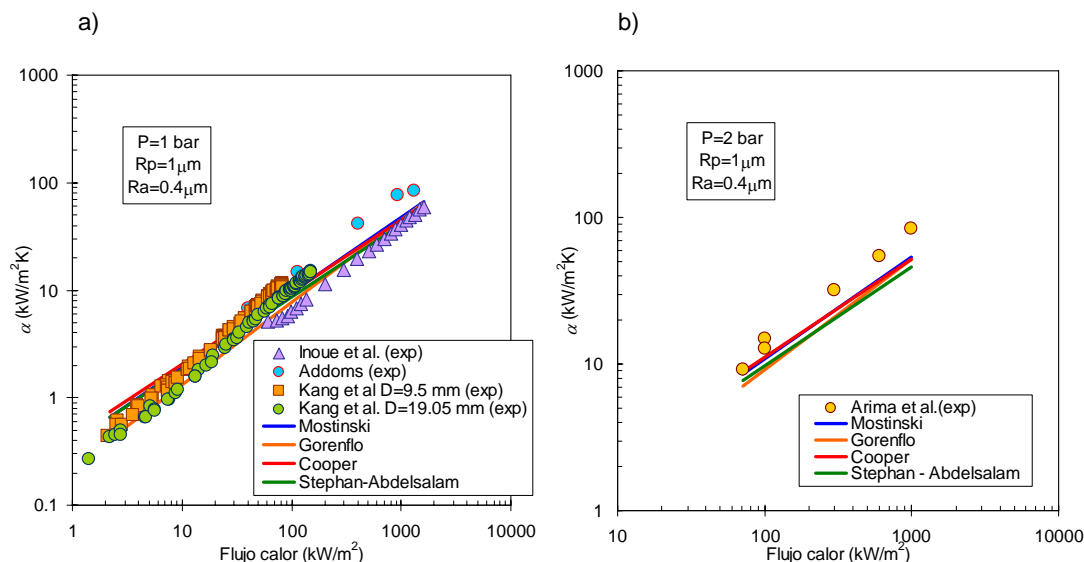


Figura 3.1. a) Comparación de los datos experimentales Inoue et al. (2002a) y de Inoue et al. (2002b), Addoms (1948) y los datos de Kang (2000) en comparación con los modelos analizados. b) Comparación de los datos experimentales de Arima et al. (2003) de ebullición de agua a 2 bar, con las correlaciones consideradas.

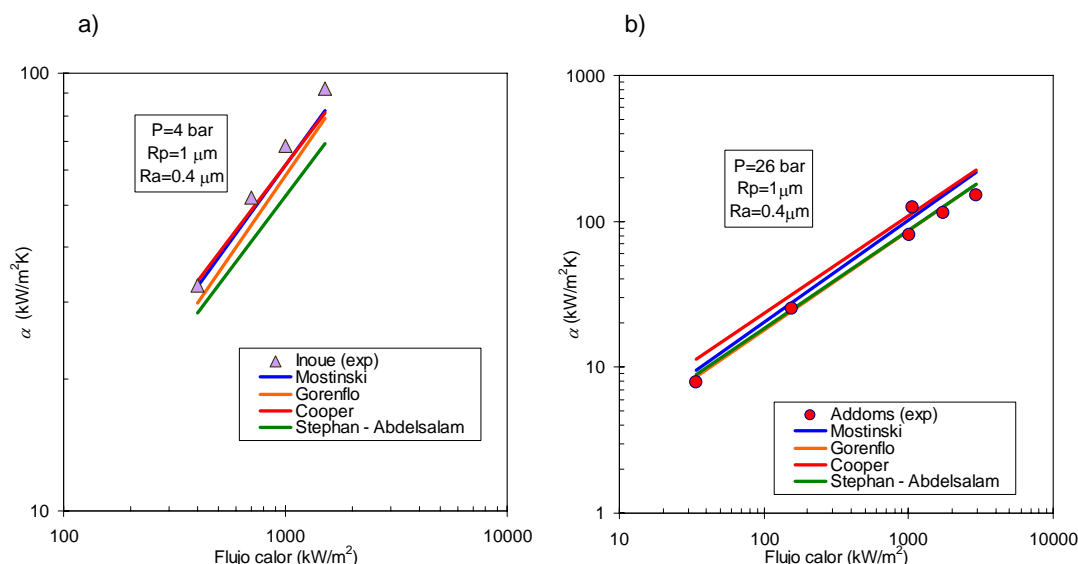


Figura 3.2. Comparación de datos experimentales de ebullición nucleada de agua de a) Inoue et al. (2002a) a 4 bar b) Addoms (1948) a 26 bar en comparación con los modelos considerados.

En la Figura 3.3 se muestran la comparación de los coeficientes de ebullición experimentales frente a las predicciones de las correlaciones para todos los datos considerados. En esta figura se incluyen los datos recopilados por Gorenflo (1997) en ebullición nucleada, que no se habían considerado hasta ahora por la imposibilidad de utilizarlos en las anteriores figuras. Como se puede apreciar la bondad de ajuste de todas las correlaciones consideradas es semejante.

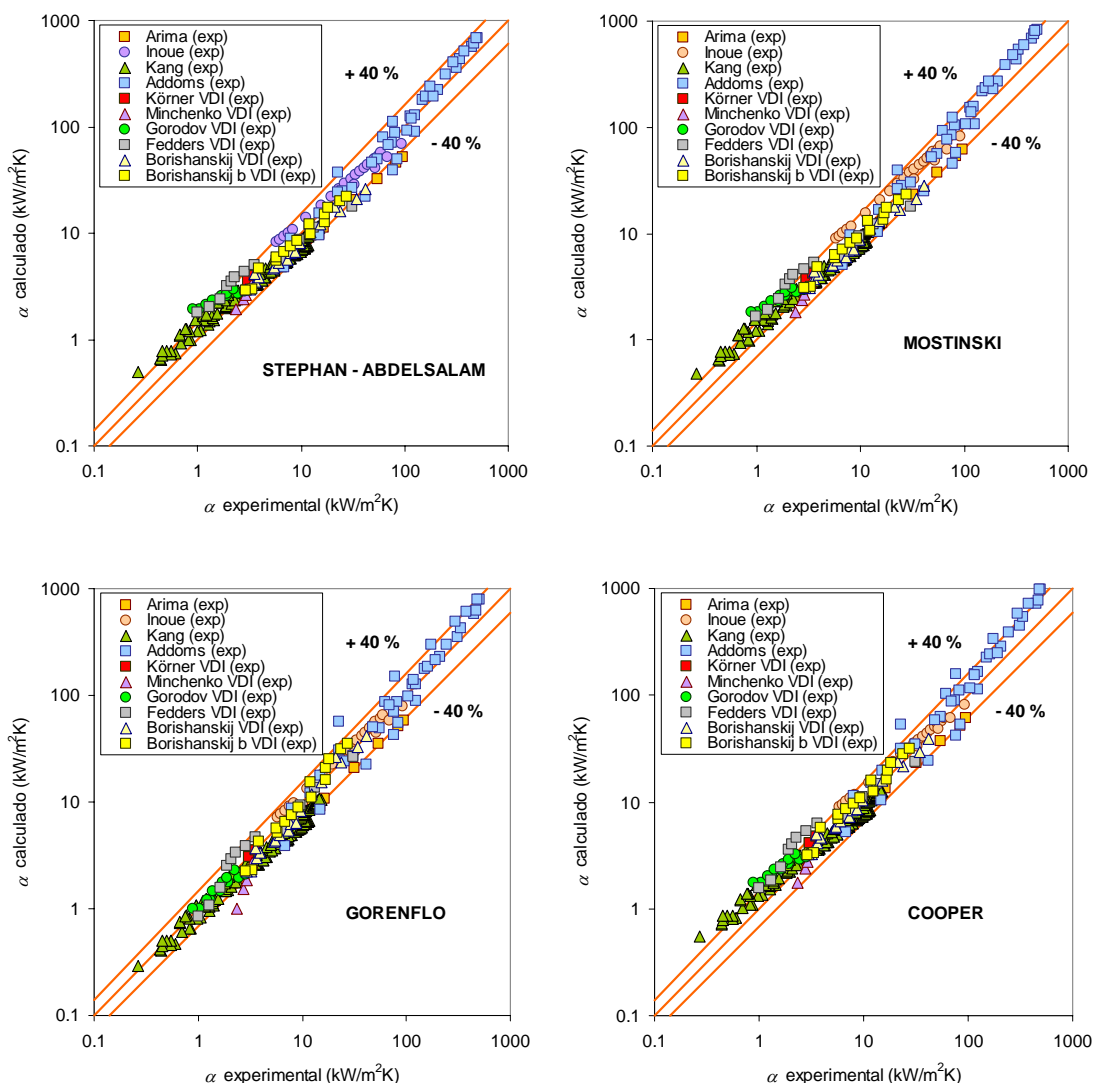


Figura 3.3. Comparación de datos experimentales de ebullición nucleada de agua de Inoue et al. (2002a) Inoue et al. (2002b), Arima et al. (2003), Kang (2000), Addoms (1948) y datos de diferentes autores recopilados por Gorenflo (1997) frente a las predicciones de las correlaciones.

En este estudio se ha visto que a pesar de que existe una cierta dispersión de las predicciones frente a los datos experimentales, la mayoría de las correlaciones predicen resultados similares, lo que provoca que, dependiendo de la fuente consultada, una correlación se ajusta mejor que otra. Atendiendo a la tendencia de las predicciones frente a los datos experimentales, la correlación de Gorenflo, que contempla la posibilidad de que el exponente n

de $\left(\frac{q''}{q_0''}\right)^{n(p_r)}$ se modifique en función de la presión, como la que mejor muestra la tendencia de

los datos experimentales.

Considerando que la mezcla amoniaco/agua es la mezcla de interés en este estudio, y que los datos de Arima e Inoue tienden a acercarse a las predicciones de la correlación de Mostinski, se ha escogido esta correlación para la modelización del fluido puro agua. De todas formas, como ya se ha dicho, las diferencias apreciadas entre las correlaciones para este fluido son escasas, por lo que puede considerarse cualquiera de ellas como válida para este fluido.

3.1.2. Resultados de las correlaciones con datos experimentales de amoniaco

La mayoría de datos experimentales obtenidos para el amoniaco en condiciones de ebullición en recintos cerrados se han obtenido en los años 60 y gran parte de ellos no se han publicado. Al igual que para agua, también se han recogido datos experimentales recopilados por Gorenflo (1997) en el VDI Heat Atlas, que corresponden a datos experimentales de Barthau. De datos experimentales actuales, se han encontrado los datos experimentales de Zheng et al. (2001). Este trabajo se había orientado a la obtención de coeficientes de transferencia de calor en un serpentín de tubos horizontales como reboiler, aunque para validar el procedimiento experimental obtuvieron datos experimentales de ebullición en recintos cerrados para un único tubo, donde encontraron que la correlación de Stephan y Abdelsalam (1980) se ajustaba bien a los datos experimentales obtenidos. Esta base de datos experimental se ha comparado con los datos de ebullición de amoniaco puro en los experimentos de Arima et al. (2003) e Inoue et al. (2002a) con la mezcla amoniaco/agua.

En la Figura 3.4 se representan los datos experimentales de Zheng et al. (2001), frente a las cuatro correlaciones seleccionadas. Como puede verse en las figuras la correlación de Stephan y Abdelsalam se ajusta muy bien a los resultados experimentales mientras que las demás predicen coeficientes muy superiores. También se puede apreciar que las diferencias en las predicciones de las correlaciones son superiores a las observadas en agua.

Presiones cercanas a 15 bar son de interés en este trabajo, considerando las presiones típicas en los sistemas de absorción. La única fuente disponible de datos para esta presión es la de Arima et al. (2003), y las predicciones de estas correlaciones se muestran en la Figura 3.5. Se puede apreciar que la tendencia de la curva para flujos de calor bajos tiende a acercarse a la correlación de Stephan y Abdelsalam (1980), mientras que para flujos superiores, Mostinski ofrece mejores resultados en las predicciones.

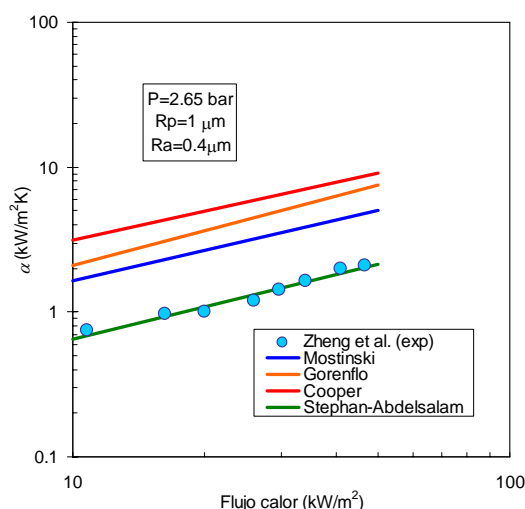


Figura 3.4. Predicción de las correlaciones para amoniaco frente a los datos experimentales de Zheng et al. (2001) en tubos horizontales. P=2.65 bar.

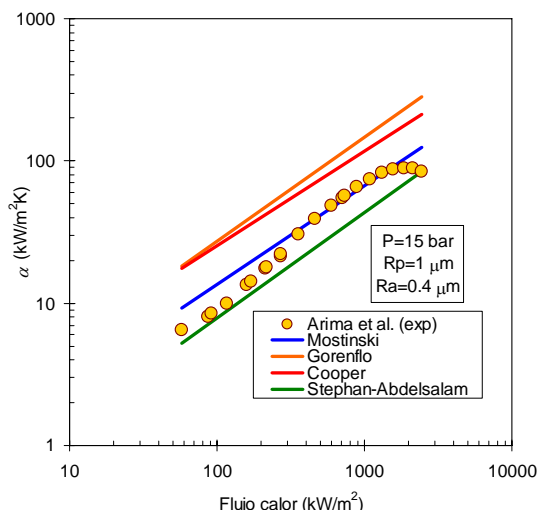


Figura 3.5 Predicción de las correlaciones consideradas en comparación con datos experimentales de Arima et al. (2003), obtenidos en una superficie plana, P= 15 bar.

En la Figura 3.6 a) se presenta la comparación de los datos experimentales de Inoue et al. (2002a) e Inoue et al. (2002b) obtenidos en un hilo de platino, un único dato de Barthau obtenido de los datos recopilados por Gorenflo (1997). En primer lugar cabe destacar que entre los datos experimentales de Barthau y de Zheng a pesar de haber sido obtenidos en las mismas condiciones, estos autores obtienen experimentalmente valores muy diferentes. Este hecho puede deberse al tipo de superficie empleada en los experimentos, aunque sin embargo llama la atención la precisión con la cual la correlación de Stephan y Abdelsalam es capaz de reproducir los datos experimentales de Zheng et al. (2001). Para datos cercanos a 7 bar sin embargo, Figura 3.6 b), se puede apreciar una cierta continuidad de las experiencias de Inoue et al. (2002a), e Inoue et al. (2002b), con los datos de Zheng et al. (2001).

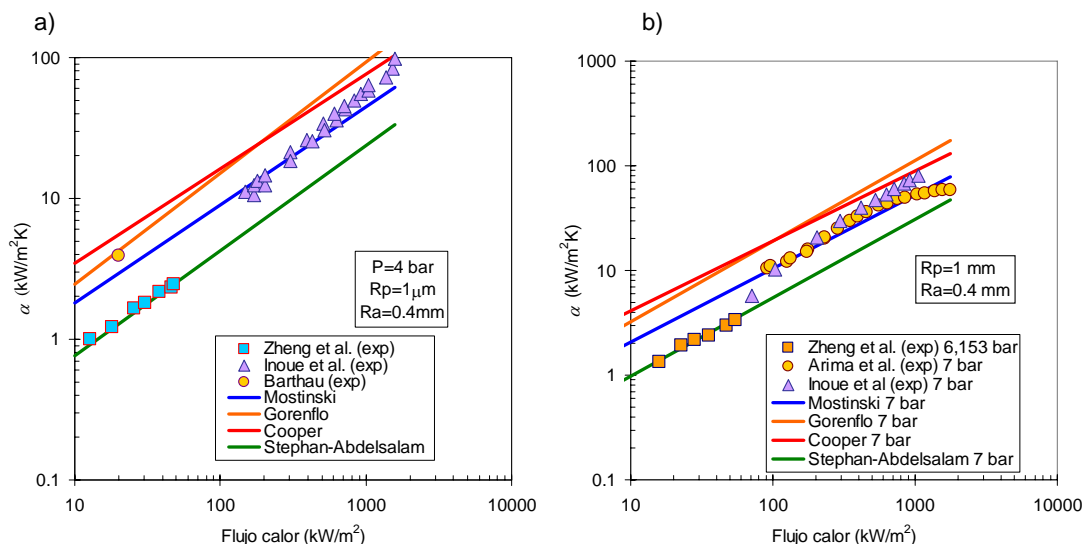


Figura 3.6. Predicción de las correlaciones consideradas frente a los datos experimentales a de Zheng et al. (2001), Barthau (Gorenflo (1997)), Inoue et al. (2002a) y Arima et al. (2003). a) Presión 4 bar b) 6.153<Presión<7 bar.

Estas diferencias encontradas entre los resultados experimentales de los distintos autores considerados, confirman que serían necesarios más datos experimentales sobre el proceso de ebullición nucleada de amoníaco. En la Figura 3.7 se muestra la predicción de las correlaciones para todas las experiencias de amoníaco consideradas. En esta figura se puede apreciar que la correlación de Stephan y Abdelsalam (1980), tiende a dar valores inferiores que los experimentales, y las correlaciones de Cooper (1984) y Gorenflo (1997) tiende a dar valores superiores. La correlación de Mostinski (1963), sin embargo, tiende a predecir bastante bien los datos experimentales de Arima y de Inoue, aunque tiene tendencia a dar valores superiores en las condiciones de flujos de calor bajos. Con los datos experimentales disponibles se puede concluir que la correlación de Mostinski es la más indicada para calcular el coeficiente de ebullición con tubos horizontales, a pesar de que la capacidad de predicción de las correlaciones se puede considerar como mala, en comparación con las predicciones en agua.

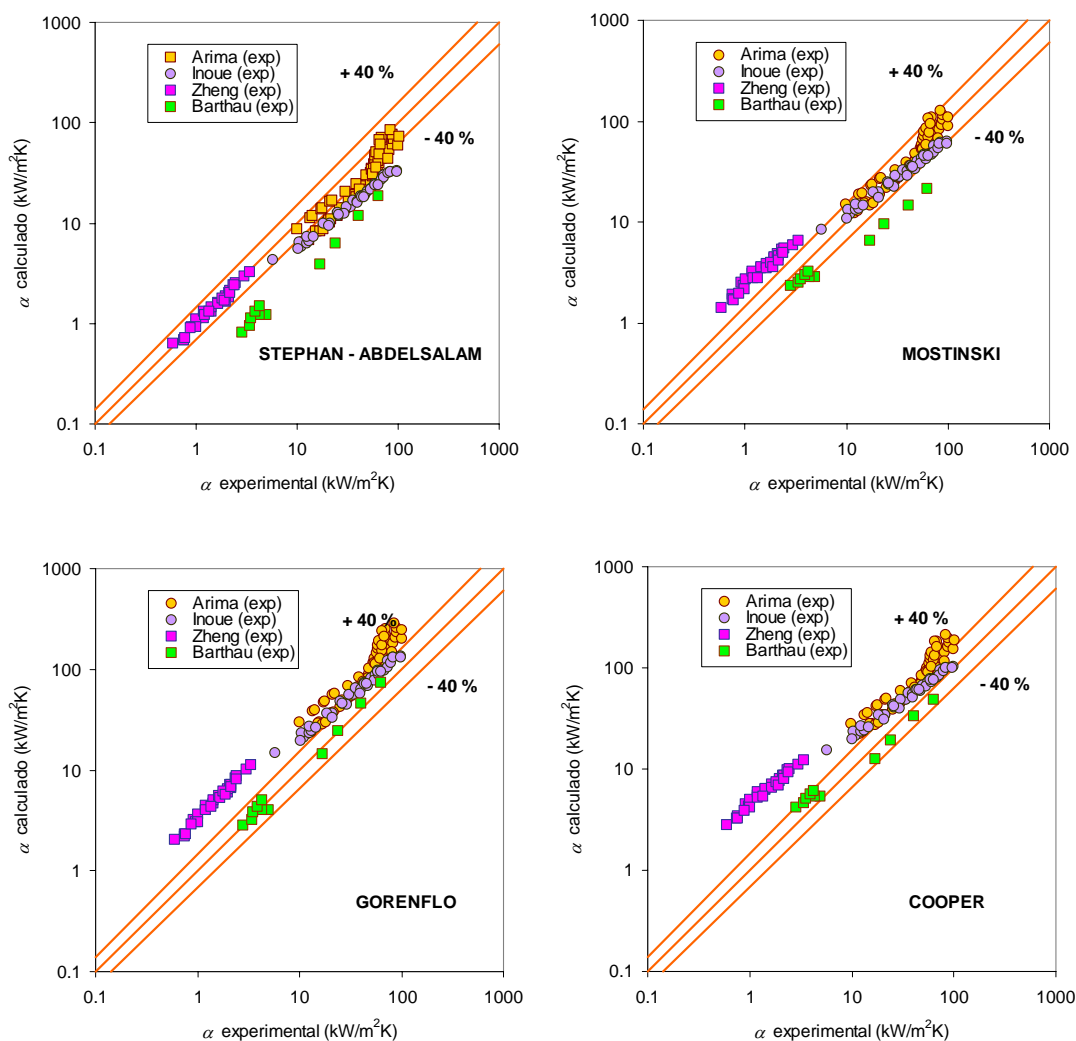


Figura 3.7. Comparación de datos experimentales de ebullición nucleada de agua de Inoue et al. (2002a) Inoue et al. (2002b), Arima et al. (2003) y datos de diferentes autores recopilados por Gorenflo (1997) frente a las predicciones de las correlaciones consideradas.

3.1.3. Resultados y discusión de las predicciones de las correlaciones en su aplicación a la mezcla amoniaco/agua

Como ya se ha dicho, se han encontrado tres referencias del mismo grupo investigador donde se obtienen datos experimentales de ebullición en recintos cerrados de la mezcla amoniaco/agua, estas son Inoue et al. (2002a), Inoue et al. (2002b) y Arima et al. (2003). En estas referencias, se comenta la existencia de datos anteriores de ebullición de la mezcla amoniaco/agua, datos obtenidos por Filatkin (1969), de los que no se ha dispuesto.

En el estudio de Inoue et al. (2002a) e Inoue et al. (2002b), se midieron coeficientes de transferencia de calor en ebullición de mezclas binarias en un filamento de platino de 0.3 mm de diámetro y una longitud de 37 mm horizontal a presiones de 4 y 7 bar, y con flujos de calor inferiores a 2000 kW/m² en todo el intervalo de fracción másica de amoniaco.

En el estudio de la ebullición en recintos cerrados realizada por Arima et al. (2003), se obtuvieron datos experimentales de ebullición para una superficie plana de plata. Los ensayos incluían datos experimentales para rangos de concentración superiores al 50 % de amoniaco para tres presiones de 7, 10 y 15 bar, y datos experimentales para tres presiones de 2, 4 y 7 bar para concentraciones inferiores al 30 %.

La principal conclusión de la serie de trabajos realizada por el grupo investigador, ha sido la de manifestar la incapacidad de las correlaciones actuales de predecir el comportamiento de los coeficientes de ebullición de la mezcla amoniaco/agua.

Para hacer la comparación de las predicciones de las correlaciones, se seleccionaron las correlaciones de Schlünder (1982), Thome y Shakir (1987), y Fujita y Tsutsui (1997). En la Figura 3.8 se muestra la comparación de los datos experimentales de Arima et al. (2003) con datos experimentales de ebullición de la mezcla amoniaco/agua a presiones de 7 y 15 bar. Como puede verse en las figuras, para concentraciones altas de amoniaco la correlación de Schlünder es la que mejor sigue la tendencia de los resultados experimentales. Para presiones de 7 bar, sin embargo, la predicción de la correlación de Schlünder tiende a dar valores superiores, a pesar de que es la correlación que más se acerca a la predicción de los datos experimentales.

Las correlaciones de Thome y Shakir y las correlaciones de Fujita y Tsutsui predicen resultados muy similares y, como puede verse en Figura 3.8, pero sin embargo, a concentraciones altas de amoniaco las correlaciones predicen un coeficiente de ebullición inferior al experimental y tampoco siguen la tendencia de los datos experimentales. La dependencia de estas correlaciones de la diferencia entre la temperatura de rocío y la temperatura de burbuja lleva a pronosticar un mínimo del coeficiente de ebullición muy próximo al amoniaco puro, que les aparta de la tendencia de los resultados experimentales.

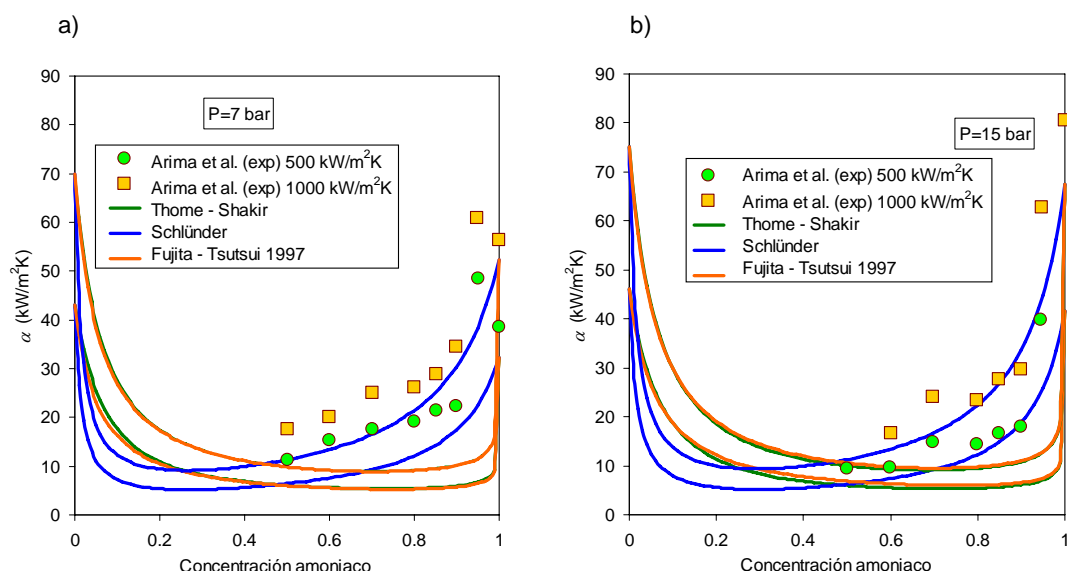


Figura 3.8. Comparación de los datos experimentales de Arima et al. (2003) Presiones de 7 bar y 15 bar con las predicciones de las correlaciones consideradas.

Para concentraciones de amoníaco inferiores al 30 %, Figura 3.9, al contrario que para concentraciones altas se puede apreciar como la correlación de Schlünder ofrece una tendencia que no se corresponde con los resultados experimentales observados y en este caso mejora el comportamiento de las correlaciones de Thome y Shakir y la correlación Fujita y Tsutsui de 1997, aunque la reducción de los coeficientes no es en ningún momento la que predicen estas correlaciones.

Como se ha visto, las dos tendencias de las correlaciones existentes (Schlünder (1982) por un lado, y Thome y Shakir (1987) y Fujita y Tsutsui (1997) por otro) muestran un comportamiento muy diferente entre si. Los errores en las predicciones se atribuyeron a que las dos tendencias en las correlaciones existentes hasta ahora, pretenden reducir el coeficiente ideal de transferencia de calor en ebullición nucleada por medio de términos que, o bien son dependientes de la diferencia de concentraciones o dependientes de la diferencia de temperaturas de burbuja y de rocío.

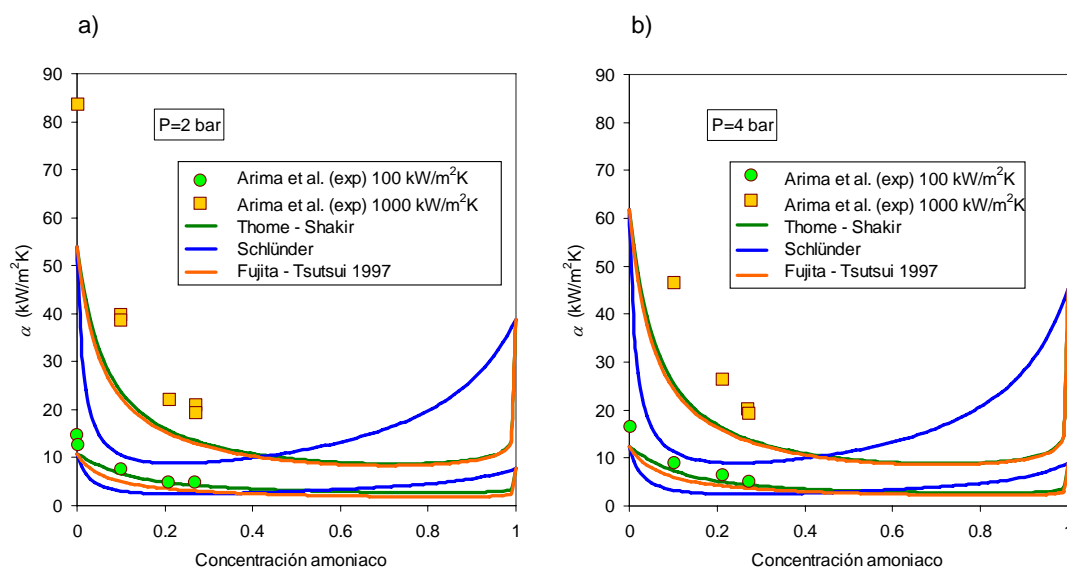


Figura 3.9. Comparación de los datos experimentales con las predicciones de Thome, Schlünder y Fujita para concentraciones inferiores al 30 %. Datos a 2 y 4 bar. Flujos de calor de 100 y 1000 kW/m².

Inoue et al. (2002a) e Inoue et al. (2002b) mostraron las grandes diferencias que se obtienen para el caso de esta mezcla en los cálculos del coeficiente de ebullición nucleada, debido a que los máximos se encuentran en concentraciones diferentes. Para mostrar estas diferencias, en la Figura 3.10 se ha representado la curva de equilibrio de la mezcla amoniaco/agua a 1 bar, y la representación de la diferencia de temperaturas entre burbuja y rocío, y la diferencia de concentraciones entre el líquido y el vapor, donde se puede apreciar que los máximos de estas diferencias se encuentran muy desplazados entre sí. Asimismo Inoue et al, hicieron una comparación con el resto de las mezclas estudiadas en ebullición nucleada, mostrando como la mezcla amoniaco/agua puede ser considerada como una mezcla singular.

En la Figura 3.11 se muestran los datos experimentales de la curva completa de ebullición de amoniaco a 4 bares, publicado por Inoue et al. (2002b). En este caso los datos experimentales corresponden a una presión de 4 bar y flujos de calor de 400 y 1000 kW/m². Como puede verse en la figura, a bajas concentraciones de amoniaco, la correlación de Schlünder, por su dependencia de la diferencia de concentraciones del equilibrio líquido/vapor, predice coeficientes más bajos que las correlaciones de Thome y Shakir, y Fujita y Tsutsui alejándose mucho de los datos experimentales. Para esta presión, se observa también que se separan las predicciones de las correlaciones Thome y Shakir y Fujita y Tsutsui.

Los datos experimentales muestran que el coeficiente de transferencia de calor en ebullición nucleada tiene una fuerte dependencia de la concentración de amoniaco, y el mínimo del coeficiente de transferencia de calor se tiene a concentraciones medias, frente a las predicciones de las correlaciones, que predicen este mínimo a altas o bajas concentraciones de acuerdo con la dependencia de las correlaciones en la diferencia de concentraciones o la diferencia de temperaturas.

En la Figura 3.12 se muestran los resultados de las predicciones de las correlaciones de ebullición nucleada de mezclas, considerando todos los datos de ebullición nucleada de la mezcla amoniaco/agua presentados por Arima et al. (2003), Inoue et al. (2002a) e Inoue et al. (2002b). Como se puede apreciar, todas las correlaciones consideradas tienen errores en las predicciones en algunos casos excesivos, mostrando que no son capaces de explicar el comportamiento de la mezcla en función de la concentración. De entre todas las correlaciones consideradas, la correlación de Schlünder (1982) es la que más se acerca a los datos experimentales, aún con grandes diferencias en parte de los datos considerados.

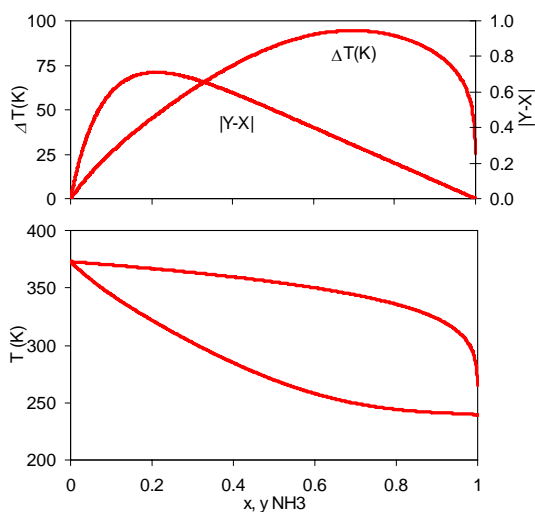


Figura 3.10. Diagrama de fases de la mezcla amoniaco/agua a la presión de 1 bar.

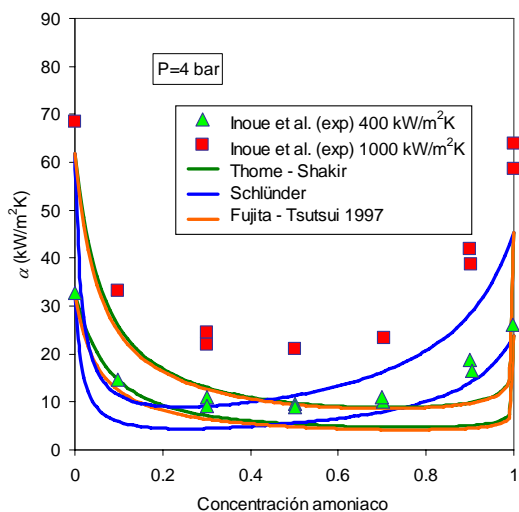


Figura 3.11. Comparación de los datos experimentales con las predicciones de Thome y Shakir (1987), Schlünder (1982) y Fujita y Tsutsui (1997) para concentraciones inferiores al 30 % de amoníaco. Datos a 2 y 4 bar. Flujos de calor de 400 y 1000 kW/m².

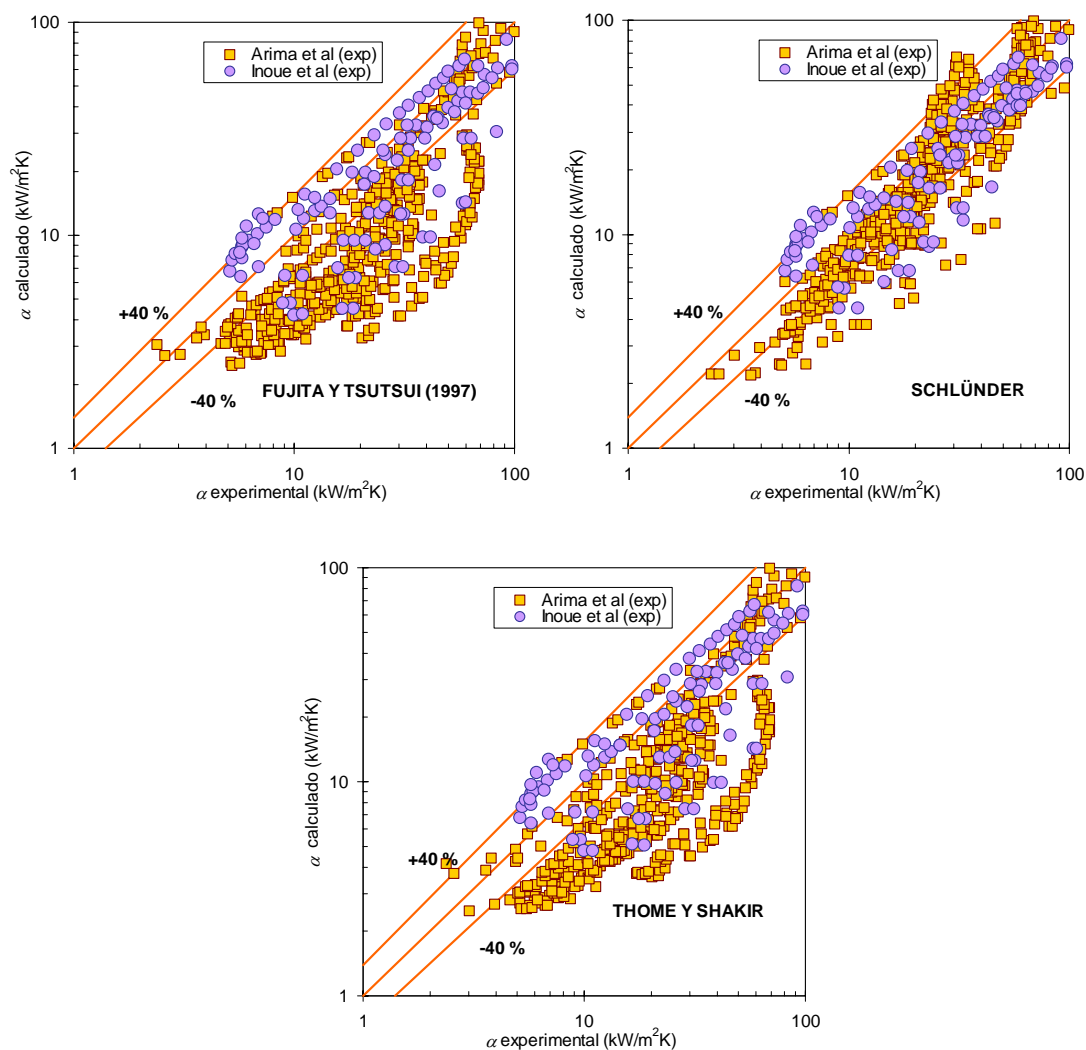


Figura 3.12. Comparación de los datos experimentales de Arima et al. (2003), Inoue et al. (2002a) e Inoue et al. (2002b) con las predicciones de Thome y Shakir (1987), Schlünder (1982) y Fujita y Tsutsui (1997)

3.1.4. Correlación propuesta para el cálculo de los coeficientes de ebullición de la mezcla en recintos cerrados.

Dado que todas las correlaciones analizadas en este trabajo, y las correlaciones analizadas por Arima et al. (2003), Inoue et al. (2002a), y Inoue et al. (2002b) fallan en la predicción de los coeficientes de ebullición, se ha propuesto una nueva correlación, que es aplicable a la mezcla, obteniendo unos resultados que claramente mejoran las predicciones.

Como se ha visto hasta ahora, todas las correlaciones muestran su tendencia a marcar un mínimo en el coeficiente en uno u otro extremo de la concentración dependiendo de la diferencia de concentraciones entre el líquido y el vapor, o de la diferencia de temperaturas entre el punto de burbuja o el punto de rocío. Se puede apreciar también, que la correlación que mejor predice los coeficientes de ebullición de la mezcla para concentraciones altas de amoníaco es la correlación de Schlünder, y para concentraciones bajas es la correlación de Thome la que mejor se ajusta a los datos experimentales.

El modelo propuesto en este trabajo aúna las características de las correlaciones de Thome y Shakir y la correlación de Schlünder en una sola. La idea propuesta consiste en darle mayor importancia a la correlación de Thome y Shakir en la zona de concentración baja de amoníaco (lejos del mínimo de esta correlación), y dar mayor importancia en la zona de concentraciones altas de amoníaco a la correlación de Schlünder (lejos también del mínimo de esta correlación). El resultado es una correlación que predice una reducción de los coeficientes mucho más suave que las mismas por separado, y que explica mejor el efecto de la concentración de la mezcla en los coeficientes de ebullición nucleada. Para ello, se ha utilizado un nuevo coeficiente A que se ve ponderado por el título de vapor. El factor K necesario para la ecuación Eq.(3.1) se calcula por medio de la Eq. (3.2).

En la Figura 3.13 se muestra el ajuste de la nueva correlación propuesta para flujos de calor inferiores a 1000 kW/m²K. Como se puede apreciar el ajuste de las correlaciones puede ser considerado como excelente, incluso considerando que para el caso de estos datos experimentales, los fluidos puros han sido difíciles de correlacionar.

$$\frac{\alpha_{pool}}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1+K} \quad \text{Eq. (3.1)}$$

$$K = A(x) \frac{\alpha_{id}}{q''} (T_{sat,1} - T_{sat,2}) (\tilde{y}_1 - \tilde{x}_1) \left[1 - \exp\left(\frac{B_0 q''}{\rho_L h_{LV} \beta_L}\right) \right] + A(1-x) \frac{\alpha_{id}}{q''} \Delta T_{bp} \left[1 - \exp\left(\frac{B_0 q''}{\rho_L h_{LV} \beta_L}\right) \right] \quad \text{Eq. (3.2)}$$

El valor del parámetro A de la ecuación Eq. (3.2) que mejor ajusta todos los valores se ha encontrado es el valor 0.5. En el caso del parámetro $\frac{B_0}{\beta_L}$, Schlünder (1982) y Thome y Shakir (1987), utilizan diferentes valores del mismo. Las diferencias entre uno y otro son pequeñas, se ha escogido el valor $\frac{B_0}{\beta_L} = 5 \cdot 10^3 \left[\frac{s}{m} \right]$ recomendada por Schlünder.

En la Figura 3.14 se muestran los resultados obtenidos por la correlación propuesta para todos los datos experimentales considerados en las anteriores gráficas. La tendencia de las curvas se ajusta mejor a los datos experimentales y se ha podido apreciar que en los extremos de todas las curvas la influencia de la predicción de los fluidos puros es importante, decayendo su importancia para concentraciones medias.

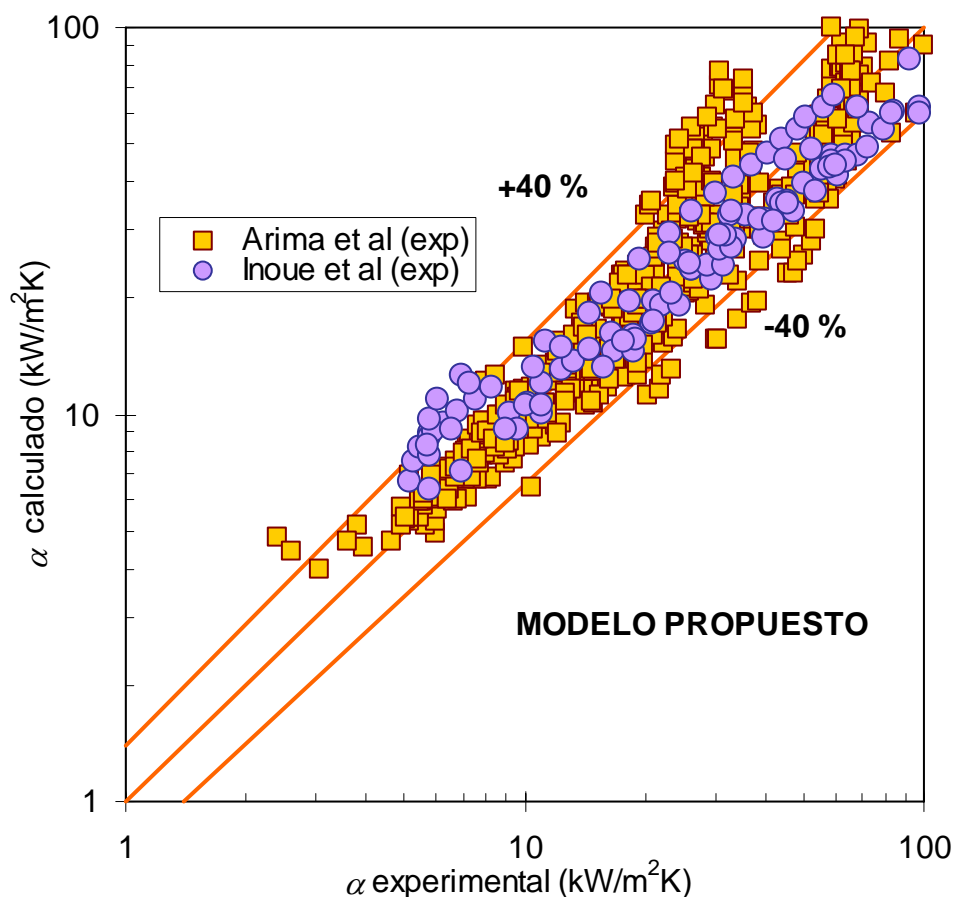


Figura 3.13. Comparación de las predicciones de la correlación propuesta con los datos experimentales de Arima et al. (2003), Inoue et al. (2002a) y Inoue et al. (2002b).

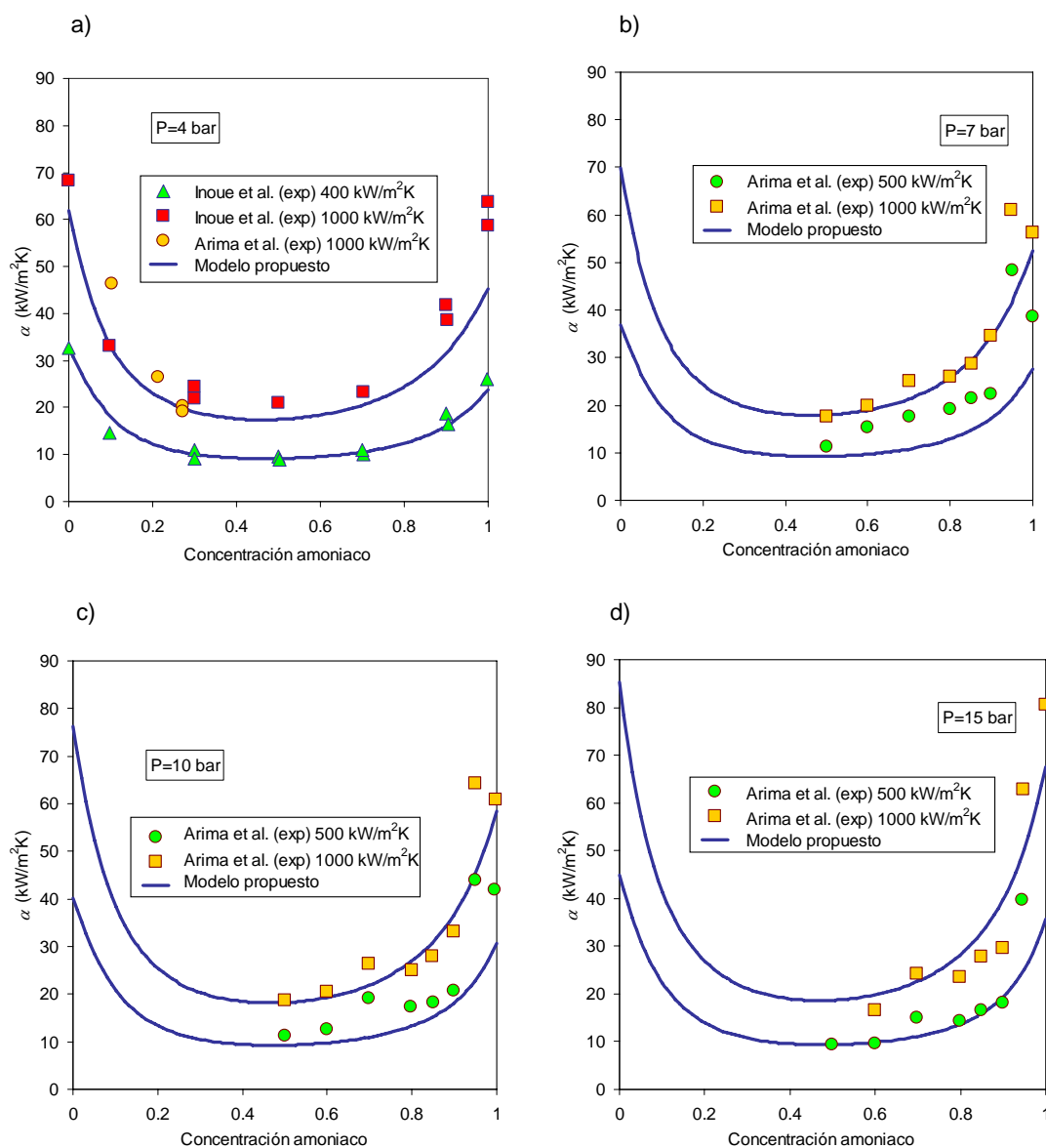


Figura 3.14. Resultados de la nueva correlación propuesta en comparación con los datos considerados de ebullición de la mezcla amoniaco/agua. a) Presión 4 bar. b) Presión 7 bar. c) Presión 10 bar. d) Presión 15 bar.

3.2. Ebullición forzada

Las correlaciones de ebullición de fluidos puros calculan dos efectos de ebullición en los coeficientes de transferencia de calor: ebullición nucleada y ebullición convectiva. El término de ebullición nucleada se suele calcular con correlaciones de ebullición en recintos cerrados, y el término convectivo de la correlación se calcula por medio de correlaciones de simple fase, aumentadas por un factor F de aumento de la ebullición convectiva, dependiente del título de vapor.

En los estudios de ebullición de mezclas, se ha mostrado como principalmente la reducción de los coeficientes de transferencia de calor se produce principalmente en la zona de influencia de la ebullición nucleada. Como ejemplo, Jung et al. (1989) manifiesta que en la zona de ebullición convectiva la reducción de los coeficientes puede considerarse que en torno a un 80% se debe al empeoramiento de las propiedades termofísicas, mientras que el 20% restante se debe a los fenómenos de resistencia a la transferencia de masa por fenómenos de difusión. Este hecho explica porque algunos modelos de mezclas utilizan correlaciones planteadas para fluidos puros, corrigiendo el término de ebullición nucleada con correlaciones de ebullición de mezclas en recintos cerrados, y no incluyen ninguna corrección de los términos de ebullición convectiva.

3.2.1. Resultados de las correlaciones con datos experimentales de agua

La mayoría de estudios de ebullición forzada realizados en los últimos años con agua como fluido, se han centrado en ensayar el fluido en flujos críticos de ebullición. El principal interés del agua como fluido refrigerante es la tecnología nuclear donde la densidad de flujo de calor a disipar es alta. Para flujos de calor algo más moderados, se han encontrado los datos experimentales de Bennett et al. (1961), los datos experimentales de Collier et al. (1964), y la referencia de Kenning y Cooper (1989).

Kenning y Cooper (1989), publicaron datos experimentales de ebullición de agua en dos tubos verticales de 9.6 y 14.4 mm de diámetro interior. Las principales conclusiones que encontraron al trabajo fueron que la correlación de Chen predecía bien el comportamiento del fluido en la zona de flujo anular y que los efectos de la ebullición nucleada y la ebullición convectiva no eran aditivos. Los flujos ensayados por estos autores son flujos de calor de entre 20 y 300 kW/m², que pueden considerarse flujos moderados, y flujos másicos de 65 a 300 kg/m²s. En este estudio se muestran una gran cantidad de datos experimentales de ebullición y se hace una revisión bibliográfica de correlaciones. Con respecto a la revisión bibliográfica observaron que en condiciones de ebullición convectiva, las correlaciones mostraban un buen comportamiento, mientras que el efecto del flujo de calor en la predicción de los coeficientes de ebullición podía considerarse bastante malo y lo justifican considerando que siendo el flujo de calor proporcional al cubo con la diferencia de temperaturas ΔT_s , y debido también a que existen parámetros de influencia difíciles de controlar, como los sitios de nucleación existentes en la superficie, hacen que las predicciones del cálculo de los coeficientes en ebullición tengan una incertidumbre de incluso el 200 %.

En la Figura 3.15.a) se muestran los coeficientes experimentales de ebullición de agua a diferentes flujos de calor para los datos experimentales de Kenning y Cooper (1989) (D=9.6 mm Presión= 1.6 bar G=123 kg/m²s). Para este flujo másico se puede apreciar la nula influencia del flujo de calor en los coeficientes de convección, lo que manifiesta que cuando la ebullición convectiva se muestra presente, los efectos de "aparente nucleación" desaparecen. En la Figura 3.15, se muestran el resultado de las predicciones de las correlaciones consideradas, donde se puede apreciar que tanto la correlación de Chen, como la correlación

de Shah, la correlación de Steiner y Taborek y la correlación de Kandlikar ofrecen buenos resultados en las predicciones para todas las condiciones de flujo de calor y flujo másico consideradas en este estudio. Con comportamientos erráticos se muestra la correlación de Jung, que para todos los casos considerados ofrece valores superiores a los experimentales y las correlaciones de Liu y Winterton, Gungor y Winterton y la correlación de Wadekar, que no muestran la tendencia de los datos experimentales y los errores en las predicciones son grandes. También sirve este grupo de figuras para manifestar que las correlaciones de Shah, Kandlikar y la correlación de Chen, tienden a aumentar el valor de la predicción de los coeficientes de ebullición conforme el flujo de calor aumenta, algo no apreciado en los experimentos, como ya se pudo apreciar en la Figura 3.1.a). Aún con este comportamiento no observado, estas correlaciones son capaces de hacer una buena predicción de los coeficientes.

La segunda referencia analizada corresponde a los datos de Bennett et al. (1961) que corresponden a datos experimentales obtenidos en un tubo vertical de 9.5 mm de diámetro interior, calentado eléctricamente. Estos experimentos se centraron en analizar el comportamiento del flujo de calor, flujo másico y título de vapor, de los cuales graficaron parte de los datos experimentales obtenidos.

En la Figura 3.16 se muestran dos gráficas para un mismo flujo de calor de 400 kW/m^2 y diferentes flujos másicos de 150 y $290 \text{ kg/m}^2\text{s}$. De las correlaciones consideradas y comparando las dos gráficas se aprecia como tanto la correlación de Kandlikar como la correlación de Steiner y Taborek tienden a acercarse al comportamiento del fluido, y de entre ellas, la correlación de Kandlikar tiende a ofrecer mejor tendencia con la predicción, aunque tiende a sobrevalorar los coeficientes de transferencia de calor. Se aprecia también como la correlación de Jung et al. muestra un buen comportamiento con el flujo másico, aunque tiende a dar valores superiores a los experimentales.

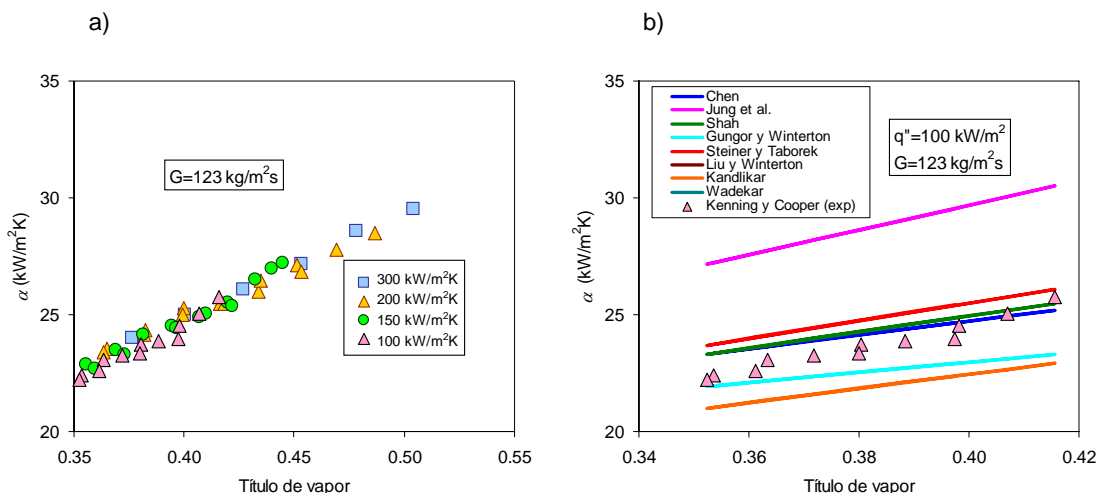
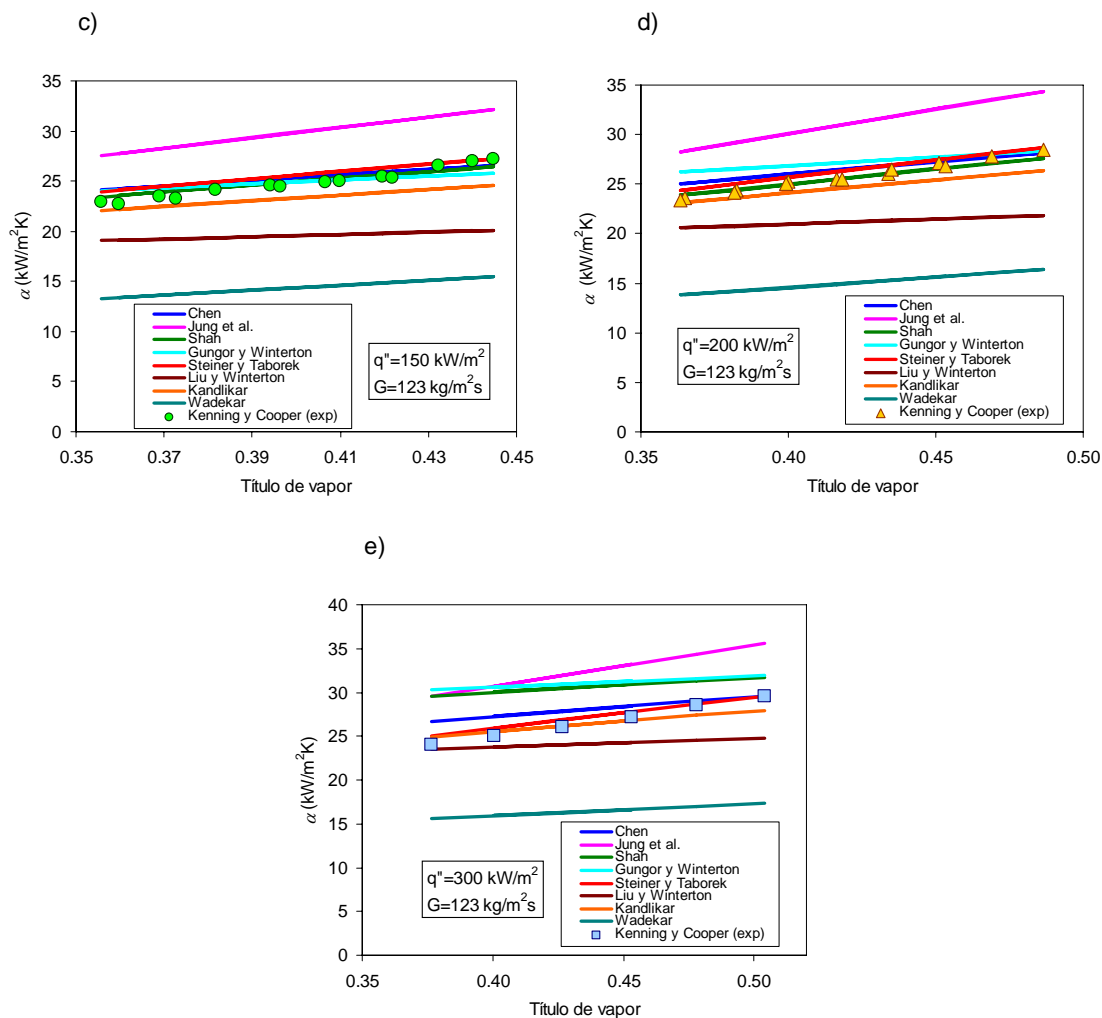


Figura 3.15. Datos experimentales de ebullición de Kenning y Cooper (1989) ($D=9.6 \text{ mm}$ Presión= 1.6 bar $G=123 \text{ kg/m}^2\text{s}$). a) Resultados experimentales con diferentes flujos de calor de 100 hasta 300 kW/m^2 . b) Predicción de las correlaciones a 100 kW/m^2 . **(Continúa en la página siguiente)**



(Continuación) Figura 3.15 Datos experimentales de ebullición de Kenning y Cooper (1989) ($D=9.6 \text{ mm}$ Presión= 1.6 bar $G=123 \text{ kg/m}^2\text{s}$). c) Predicción de las correlaciones a 150 kW/m^2 . d) Predicción de las correlaciones a 200 kW/m^2 . e) Predicción de las correlaciones a 300 kW/m^2 .

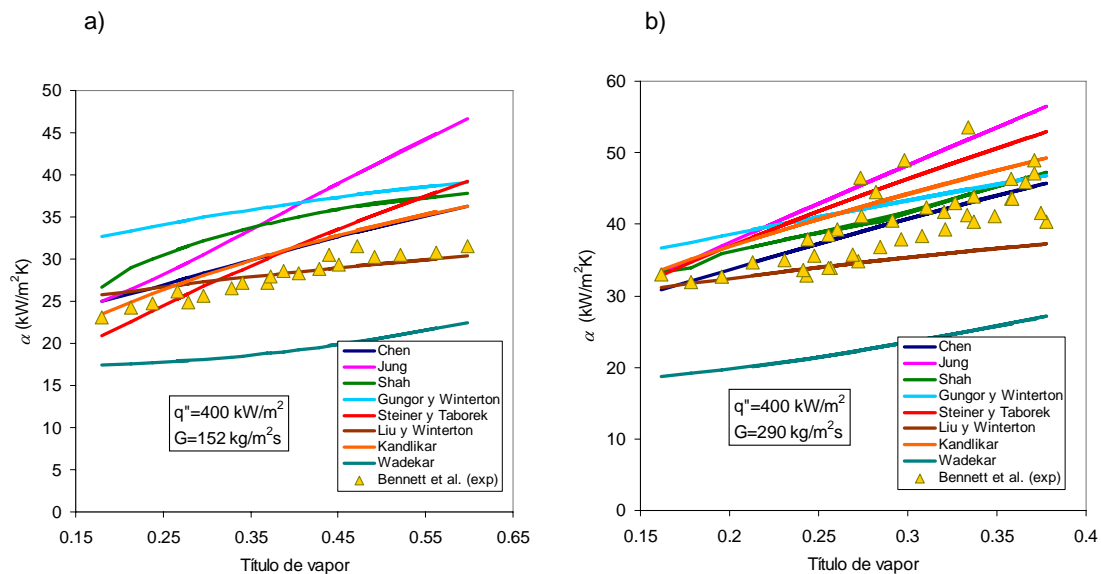


Figura 3.16. Resultados experimentales frente a las predicciones de las correlaciones consideradas para los datos de Bennett et al. (1961) Diámetro 9.5 mm, presión media de 1.7 bar, flujo calor 400 kW/m^2 . a) flujo másico $152 \text{ kg/m}^2\text{s}$ b) flujo másico $290 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

La tercera referencia corresponde a datos experimentales de Collier et al. (1964) obtenidos para un tubo de 16.13 mm de diámetro interior con flujos máscicos de 135 y 257 kg/m²s, con flujos de calor de 200 y 400 kW/m² respectivamente. En la Figura 3.17 se muestran los resultados de las predicciones. Los datos experimentales muestran como la correlación de Kandlikar si bien tiende a ofrecer valores superiores a los experimentales la tendencia de las predicciones es la adecuada. Se aprecia también como para títulos de vapor bajos, incluso esta correlación tiende a predecir el comportamiento del fluido.

En la Figura 3.18 se muestran las predicciones de los distintos modelos para los datos experimentales de Collier et al. (1964) Bennett et al. (1961) y Kenning y Cooper (1989). Como se puede apreciar para el caso del agua, asimismo como sucede en ebullición nucleada, el comportamiento de las correlaciones se encuentra bastante igualado. Un análisis más minucioso muestra como para el caso de la correlación de Jung et al. y la correlación de Steiner y Taborek, los valores de las predicciones muestran coeficientes superiores a los experimentales, y para el caso de la correlación de Kandlikar, y la correlación de Shah tienen unas gráficas de error muy parecidas. El error medio observado decide que la correlación de Kandlikar como adecuada para el cálculo de coeficientes de transferencia de calor. De todas las correlaciones consideradas, tanto la correlación de Liu y Winterton como la correlación de Gungor y Winterton, se alejan del comportamiento de los datos experimentales, y las predicciones tienden a establecer errores de cálculo superiores. En el caso de la correlación de Wadekar, las predicciones de los coeficientes son inferiores a los experimentales.

Los datos experimentales de Bennett et al. (1961), Collier et al. (1964) y Kenning y Cooper (1989) muestran como el comportamiento de las correlaciones es muy parejo para el caso del fluido puro agua en ebullición forzada. Con las tres referencias consideradas parece adecuado considerar la correlación de Kandlikar como la correlación adecuada para calcular coeficientes de transferencia de calor en ebullición forzada para este fluido, aunque tanto la correlación de Steiner y Taborek como las correlaciones de Shah y la correlación de Kandlikar tienden a dar valores similares en las predicciones.

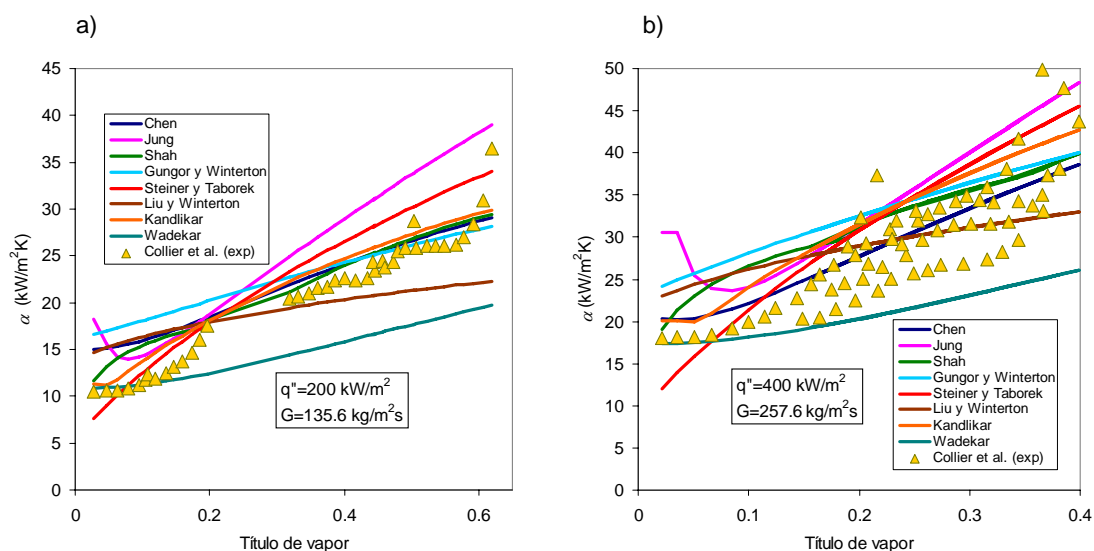


Figura 3.17. Datos experimentales de Collier et al. (1964) obtenidos en un tubo vertical de 16.13 mm de diámetro interior. a) Flujo calor 200 kW/m², flujo máscico 135.6 kg/m²s. b) Flujo calor 400 kW/m², flujo máscico 257.6 kg/m²s.

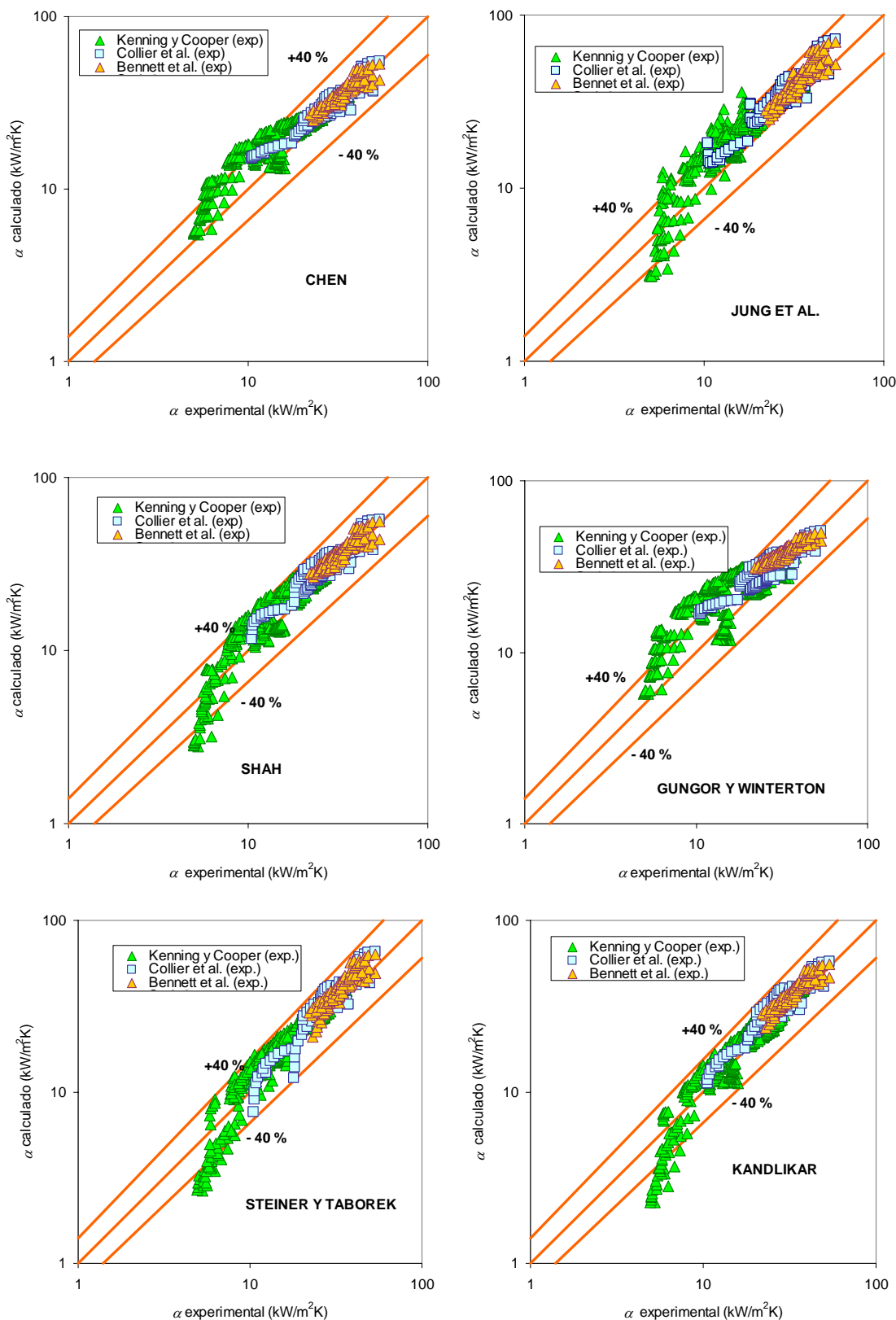
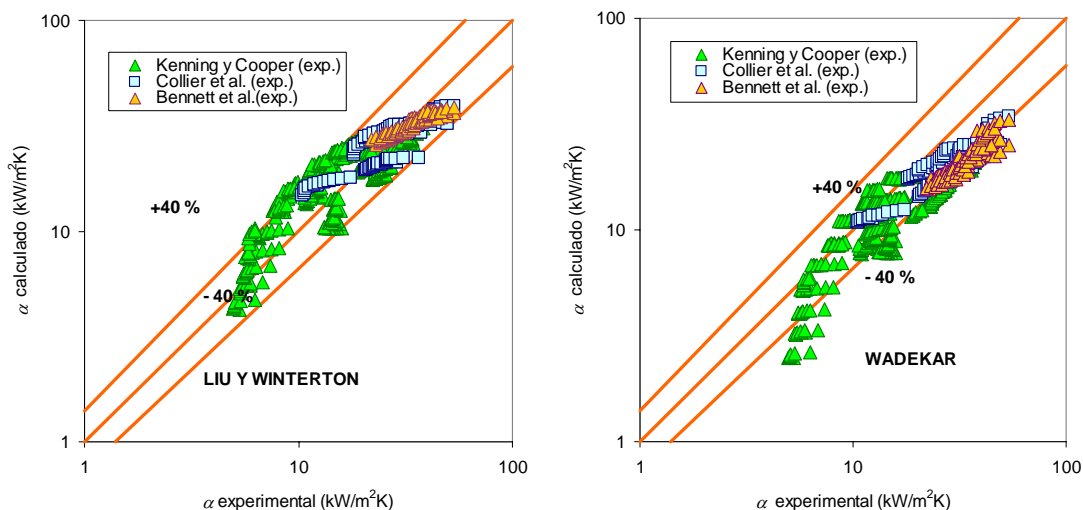


Figura 3.18. Predicción de los resultados experimentales de Collier et al. (1964), Bennett et al. (1961) y Kenning y Cooper (1989), frente a las predicciones de las correlaciones. Diferentes características de los ensayos. **(Continúa en la página siguiente).**



(Continuación). Figura 3.18. Predicción de los resultados experimentales de Collier et al. (1964), Bennett et al. (1961) y Kenning y Cooper (1989), frente a las predicciones de las correlaciones. Diferentes características de los ensayos.

3.2.2. Resultados de las correlaciones con datos experimentales de amoníaco

En cuanto al amoníaco, dado que se utiliza como refrigerante, los flujos de calor de los estudios son moderados, cerca de los flujos de calor de este trabajo. La aplicación de este fluido a equipos de refrigeración por compresión ha condicionado los estudios de ebullición de flujo forzado, tendiendo en general a estudios en tubos lisos en posición horizontal.

Los datos experimentales de ebullición de amoníaco en evaporadores operando en plantas de frío no se debieran de considerar, por lo que es posible que en los experimentos existan trazas de aceite. El aceite utilizado en compresores no es miscible con el amoníaco, por lo que los coeficientes de transferencia de calor se ven empeorados. Para manifestar los problemas de las correlaciones consideradas, se muestran los resultados experimentales obtenidos por Chaddock y Buzzard (1986) en un evaporador con un serpentín helicoidal de 6 vueltas. En la Figura 3.19 se puede apreciar, si bien para títulos inferiores a 0.1, el coeficiente puede ser bien correlacionado, conforme el título de vapor aumenta los errores en las predicciones aumentan también. Este hecho se debe a que la cantidad de aceite presente en el líquido, aumenta conforme se eleva la cantidad de vapor generada.

Considerando datos experimentales sin trazas de aceite, se ha encontrado el trabajo de Barthau (1976), que hizo sus experimentos con amoníaco en un tubo vertical. El equipo constaba de un tubo vertical de diámetro 30.34 mm con una sección de ensayo de 474 mm, con una rugosidad R_p medida de $5 \mu m$. Los datos experimentales presentados se obtuvieron para un flujo másico de $1000 \text{ kg/m}^2\text{s}$, variando el flujo de calor desde 50 kW/m^2 hasta 1000 kW/m^2 . En este estudio la presión relativa de los ensayos se varió desde 0.30 hasta 0.95. En la Figura 3.20 se muestra el resultado de las correlaciones para los datos experimentales de Barthau (1976). En este caso la correlación de Steiner y Taborek se acerca más a los datos experimentales que el resto de las correlaciones. Steiner y Taborek a partir de datos experimentales de Barthau, proponen una corrección al término de ebullición nucleada, por lo que parece normal que la predicción de esta correlación se ajuste mejor que otras a los datos experimentales. Del resto de correlaciones, se puede apreciar el buen comportamiento de la correlación de Jung et al. (1989), Liu y Winterton (1991), y Wadekar (1995), y no tan buena predicción del resto de correlaciones consideradas.

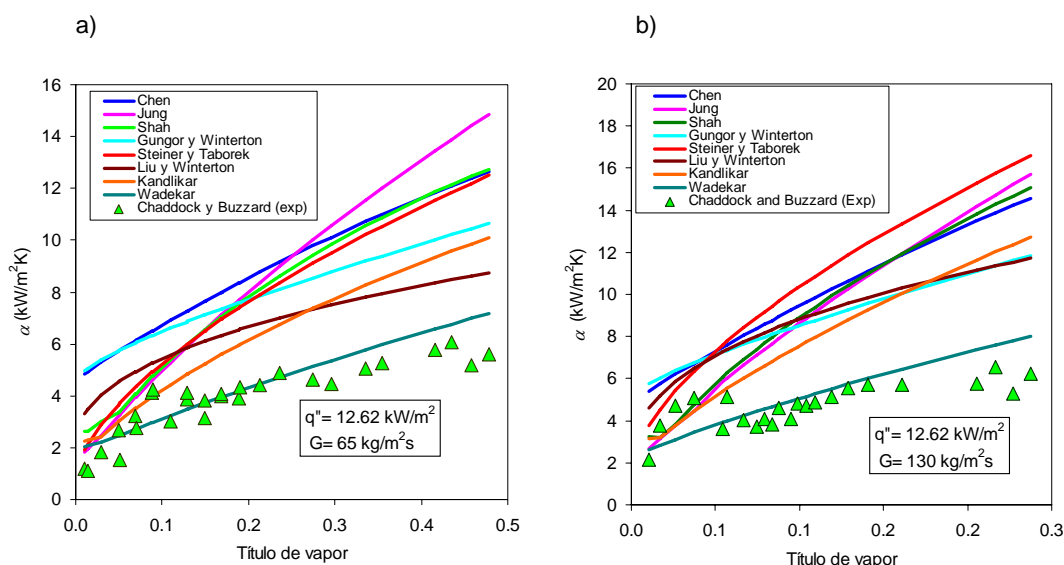


Figura 3.19. Datos experimentales obtenidos por Chaddock y Buzzard (1986), en un serpentín de tubo horizontal $D=13.39$ mm $P=1.2$ bar. a) $q''=12.62$ kW/m² $G= 65$ kg/m²s. b) $q''=12.62$ kW/m² $G= 130$ kg/m²s.

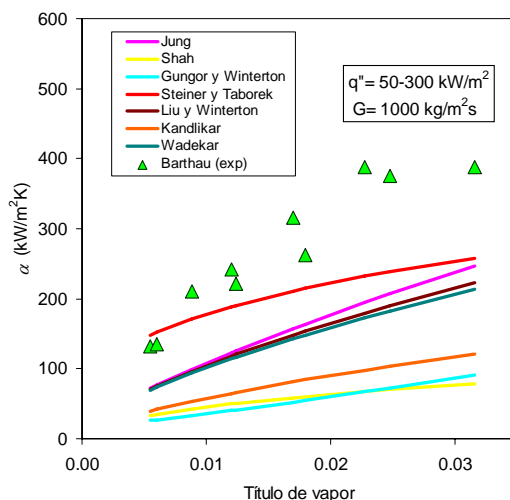


Figura 3.20. Datos experimentales de ebullición de amoniaco en tubos verticales obtenidos por Barthau (1976), en comparación con la predicción de las correlaciones.

Malek y Colin (1985) hicieron su estudio de ebullición en tubos verticales y horizontales y propusieron una correlación para la obtención del coeficiente transferencia de calor para amoniaco fluyendo en un tubo liso. El diámetro interior del tubo era 21.6 mm y de longitud de 10 m. Los flujos máscicos ensayados estaban entre 20 a 500 kg/m²s.

En la Figura 3.21 a) y b), se muestran los resultados experimentales de amoniaco realizados por Malek y Colin (1985) en un tubo vertical, frente a la predicción de los coeficientes con las correlaciones consideradas para diferentes condiciones de flujo de calor y flujo máscico superiores a 44 kg/m²s. En este caso se aprecia como la correlación de Steiner y Taborek tiende a predecir coeficientes experimentales superiores a los experimentales, y la correlación de Kandlikar tiende a predecir los datos experimentales con valores ligeramente inferiores. De todas las correlaciones consideradas, la correlación de Shah se acerca más a los datos experimentales, aunque con tendencia a dar valores inferiores conforme disminuye el flujo máscico. En la Figura 3.21 c) y d) se muestran los resultados experimentales de amoniaco realizados por Malek y Colin (1985) en un tubo vertical, frente a la predicción de los coeficientes

con las correlaciones consideradas un flujo másico inferiores a $44 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Cuando el flujo másico desciende, la correlación de Jung se acerca a los datos experimentales. Con una buena tendencia aunque con valores inferiores se encuentra las correlaciones de Kandlikar y de Shah.

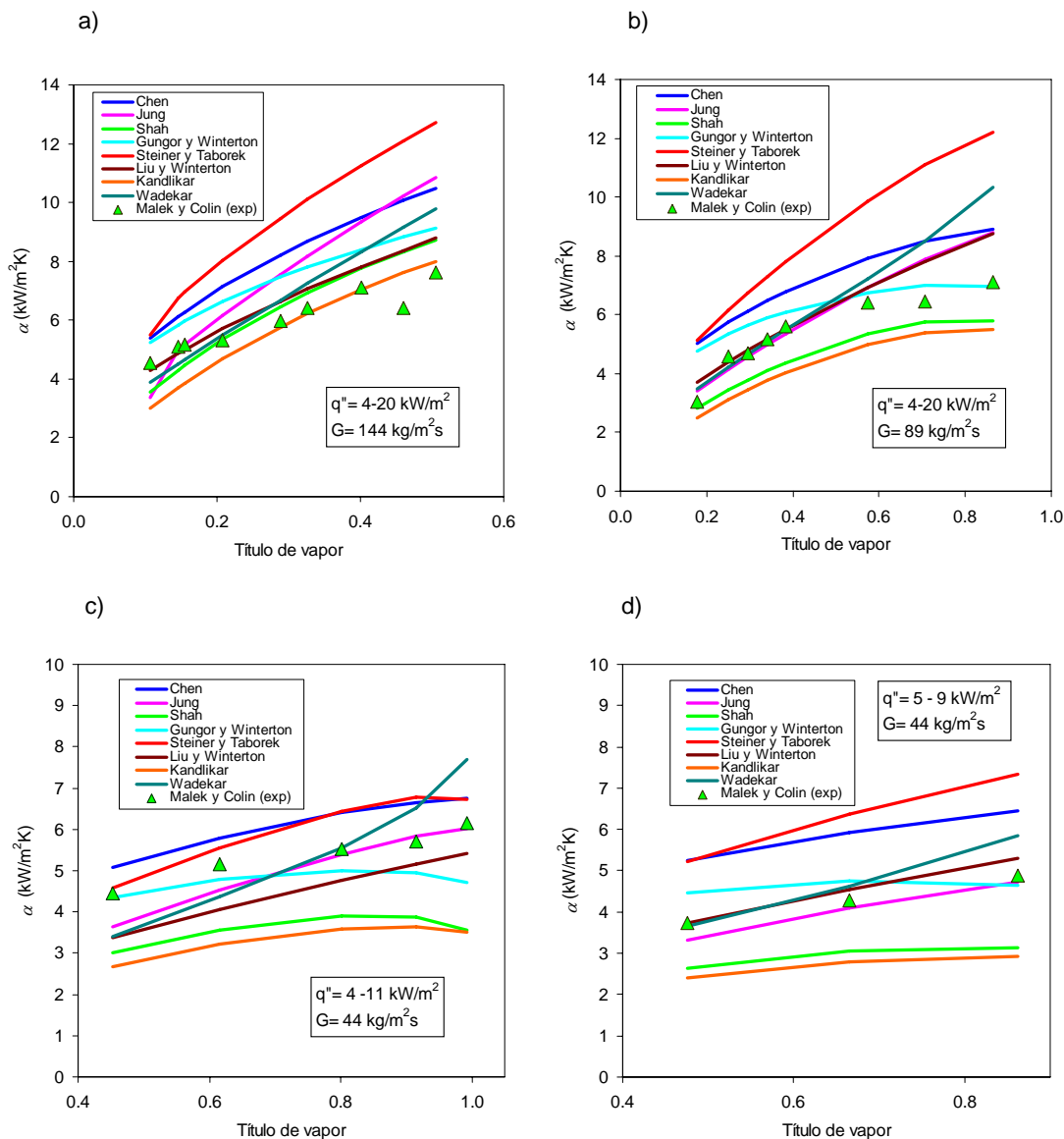


Figura 3.21. Datos experimentales de Malek y Colin (1985), en un tubo vertical, frente a las predicciones de las correlaciones consideradas para flujos másicos superiores a $44 \text{ kg/m}^2\text{s}$. a) Flujo calor de 5 a 20 kW/m^2 flujo másico $144 \text{ kg/m}^2\text{s}$. b) Flujo calor de 4 a 20 kW/m^2 flujo másico $89 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

En la década de los noventa, fue publicado por parte de Ohadi et al. (1996), un análisis crítico de las correlaciones existentes para la caracterización térmica de amoníaco en cambio de fase. En este artículo se manifestaba la inexistencia de una base de datos experimentales contrastada de coeficientes de ebullición de este fluido. Estos autores recomendaron la correlación de Shah (1982) para el cálculo de coeficientes de ebullición forzada en tubos lisos. Según los autores esta correlación predecía los datos experimentales de amoníaco con un rango de precisión del $\pm 6 \%$ salvo en los casos de flujos de calor grandes y para tubos horizontales, donde la dispersión era mayor, aunque en ningún momento se presentan los datos experimentales considerados en el estudio.

Recientemente Zamfirescu y Chiriac (2002) han obtenido unos pocos datos experimentales de ebullición de amoníaco en tubos verticales y como Barthau (1976), para títulos de vapor

pequeños. En la Figura 3.22 se muestran los resultados de las predicciones frente a los datos experimentales de estos autores. Como se puede apreciar la correlación de Steiner y Taborek (1992) ofrece buenas predicciones. Asimismo, la correlación de Jung vuelve a establecer buenos valores en los coeficientes de transferencia de calor, aunque ligeramente superiores a los de Steiner.

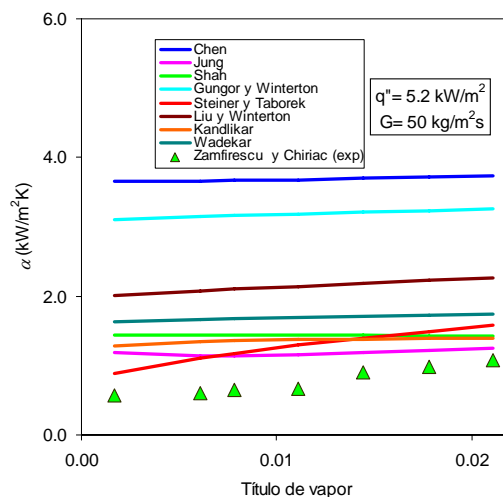


Figura 3.22. Datos experimentales de ebullición de amoníaco en un tubo vertical de 32 mm de diámetro interior, presión 4.2 bar, obtenidos por Zamfirescu y Chiriac (2002), en comparación con la predicción de las correlaciones.

Si bien el principal interés de este estudio es el centrarse en datos experimentales de ebullición en tubos verticales, debido a la escasez de referencias recopiladas, ha sido necesario considerar datos experimentales de ebullición en tubos horizontales, y seleccionar aquellos datos donde se tenga flujo anular. La aplicabilidad de las correlaciones de ebullición de tubos verticales al caso de tubos horizontales ha sido cuestionada por Kattan et al. (1998). La diferencia que existe en la ebullición de tubos verticales frente a tubos horizontales es principalmente que la gravedad actúa en el proceso de ebullición haciendo que el líquido remanente en el tubo tienda a fluir en el fondo del mismo, provocando incluso el secado de la parte superior de la sección transversal del tubo y afectando a los fenómenos de transferencia de calor. Para hacer el análisis de las correlaciones se ha utilizado el modelo de patrones de flujo de Wojtan et al. (2005), última modificación del modelo de Kattan, y se han considerado los datos experimentales que se encuentran en la región de flujo anular donde es posible en principio considerar aún correlaciones de ebullición en tubos verticales. Estos modelos tienen añadida la ventaja de que han sido validados con datos experimentales de amoníaco obtenidos por Zurcher et al. (2002).

Kabelac y de Buhr (2001) hicieron el estudio de coeficientes de transferencia de calor en ebullición en tubos horizontales tanto con tubos lisos como con ligero aleteado, en dos secciones horizontales de 45 cm de longitud y un diámetro interior de 10 mm, con una de las secciones como un tubo liso y otro con aleteado interior, en condiciones de temperatura de pared constante conseguido a través de un medio condensante en el tubo exterior. Además comprobaron los patrones de flujo existentes en la ebullición de este fluido. Los rangos de estudio han sido de $-40 < T_{\text{sat}} < 4 \text{ }^\circ\text{C}$ títulos de vapor desde 0 hasta 0.9 y flujos máxicos de 50 a $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$ con recalentamientos de la pared de hasta $15 \text{ }^\circ\text{C}$. La elección de la temperatura constante en la pared hizo que la obtención de los resultados fuese más complicada comparado con los otros métodos.

En la Figura 3.23 se muestran los datos experimentales de Kabelac y de Buhr (2001) a un flujo de calor constante de 40 kW/m^2 , resultados obtenidos en tubos horizontales. En comparación con los datos de Malek y Colin, la correlación de Jung predice coeficientes sustancialmente más altos que los obtenidos por estos autores. Para estos datos experimentales puede considerarse la correlación de Kandlikar como la más apropiada para estos datos experimentales.

Zurcher et al. (2002) han ensayado amoniaco a flujos de calor inferiores a 71 kW/m^2 , y flujos máscicos de 10 a $140 \text{ kg/m}^2\text{s}$ en tubos horizontales. En la Figura 3.24. a) se muestran los datos experimentales de ebullición de amoniaco a una presión de 5 bar , con un flujo máscico de $60 \text{ kg/m}^2\text{s}$. Se puede apreciar como para este flujo máscico, el criterio de Wojtan et al. (2005) predice que el flujo es estratificado en todas las regiones de título de vapor, y aún de esta forma el coeficiente de transferencia se puede predecir con las correlaciones de tubos verticales. En condiciones de flujo anular (Figura 3.24.b-e)) la predicción de las correlaciones de tubos verticales ofrecen buenos resultados siendo la correlación de Kandlikar y la correlación de Wadekar las que mejor predicción de los coeficientes ofrece.

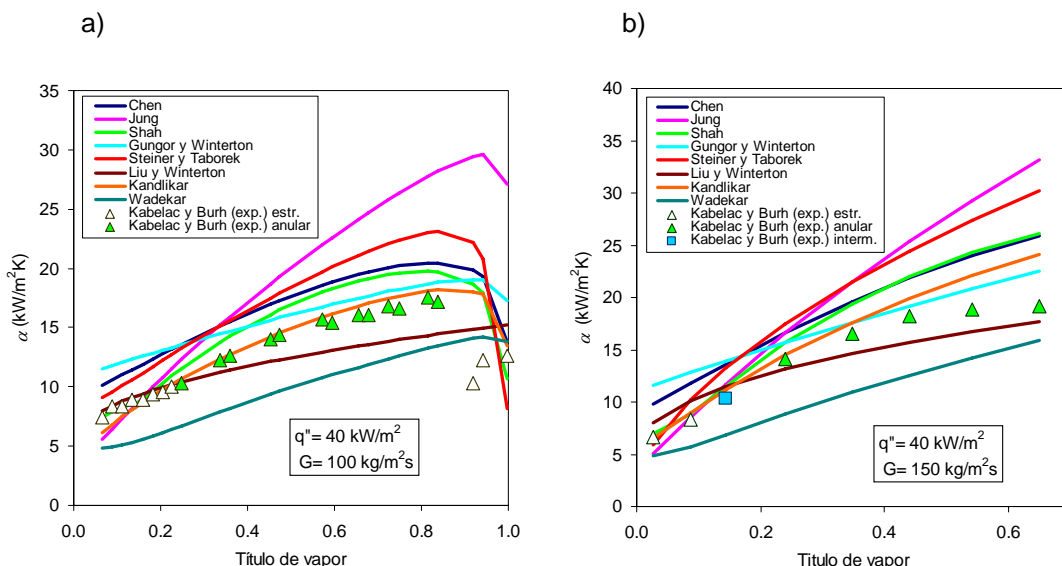


Figura 3.23. Datos experimentales de ebullición de amoniaco en tubos verticales obtenidos por Kabelac y de Buhr (2001), con un flujo de calor de 40 kW/m^2 Presión 1.9 bar a) flujo máscico $100 \text{ kg/m}^2\text{s}$ b) flujo máscico $150 \text{ kg/m}^2\text{s}$.

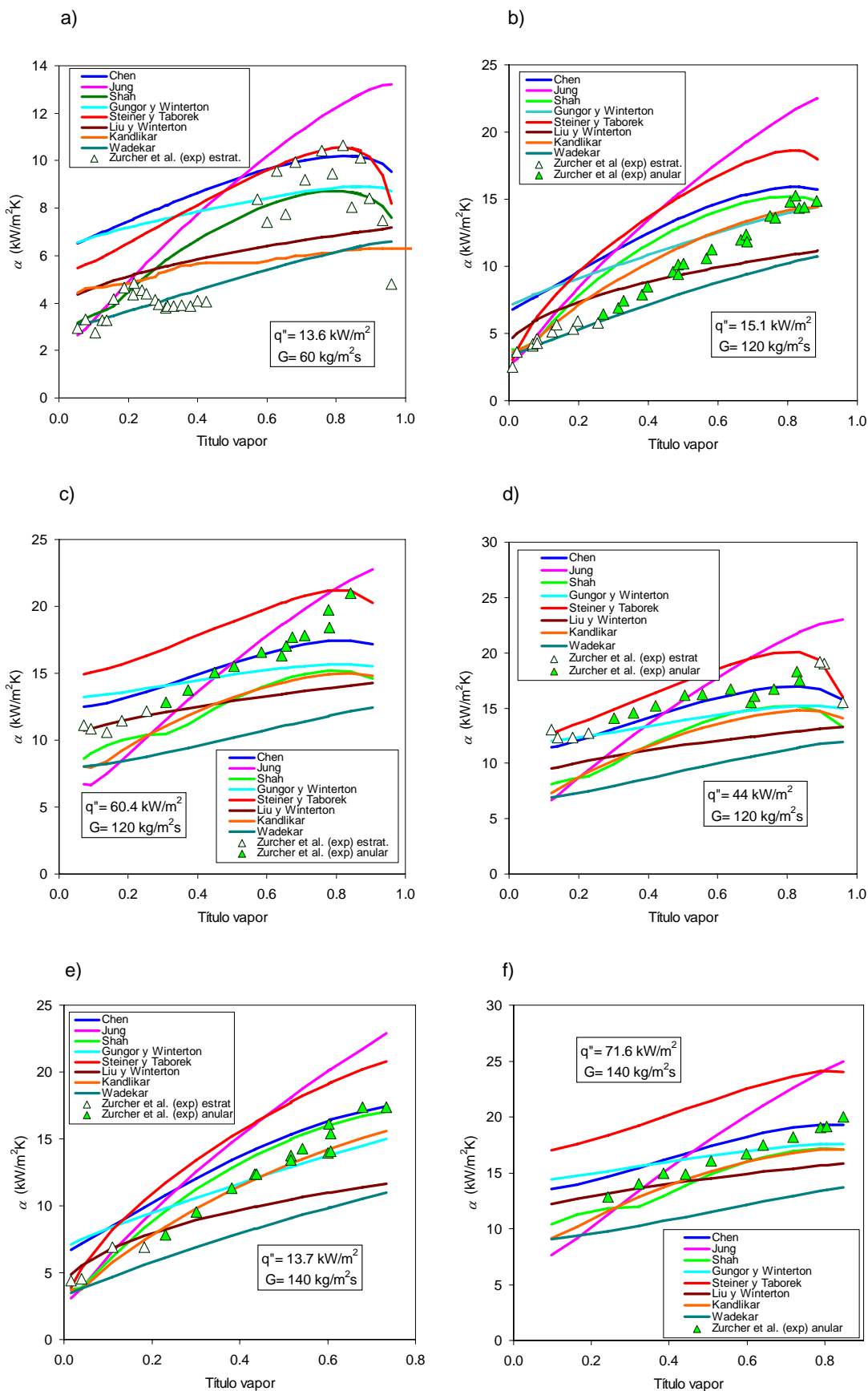


Figura 3.24. Datos experimentales de ebullición de amoníaco obtenidos por Zurcher et al. (2002) en comparación con la predicción de las correlaciones, Datos obtenidos en un tubo horizontal, $D=14 \text{ mm}$, $P=4.98 \text{ bar}$. a) $G=60 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $q''=13.6 \text{ kW/m}^2$. b) $G=120 \text{ kg/m}^2\text{s}$ $q''=15 \text{ kW/m}^2$.

En la Figura 3.25 se presentan el resumen de los datos considerados de amoniaco en condiciones de ebullición forzada. La principal conclusión de la comparativa del ajuste de los datos experimentales con las correlaciones consideradas es que la correlación de Steiner y Taborek es capaz de ajustarse mejor a todas las fuentes de datos experimentales. Steiner y Taborek corrigieron para el caso del amoniaco con los datos experimentales de Barthau (1976), y es la única correlación que es capaz de predecir el comportamiento de este fluido para estos datos. Sin considerar esta fuente de datos, la correlación de Steiner y Taborek (1992), tiende a dar valores superiores. La correlación de Jung et al. (1989), que fue definida para refrigerantes muestra un buen comportamiento para flujos máscicos relativamente pequeños. Del resto de correlaciones se aprecia que sólo la correlación de Kandlikar (1990), es capaz de predecir algún dato experimental de Zamfirescu y Chiriac (2002), dentro de la banda de error del 40 %. Con los datos experimentales considerados es difícil concluir cual es la correlación adecuada para la predicción de los coeficientes experimentales. A pesar de su tendencia a la sobreestimación de los datos experimentales parece adecuado el uso de la correlación de Steiner y Taborek en la predicción de los datos de amoniaco en ebullición en tubos.

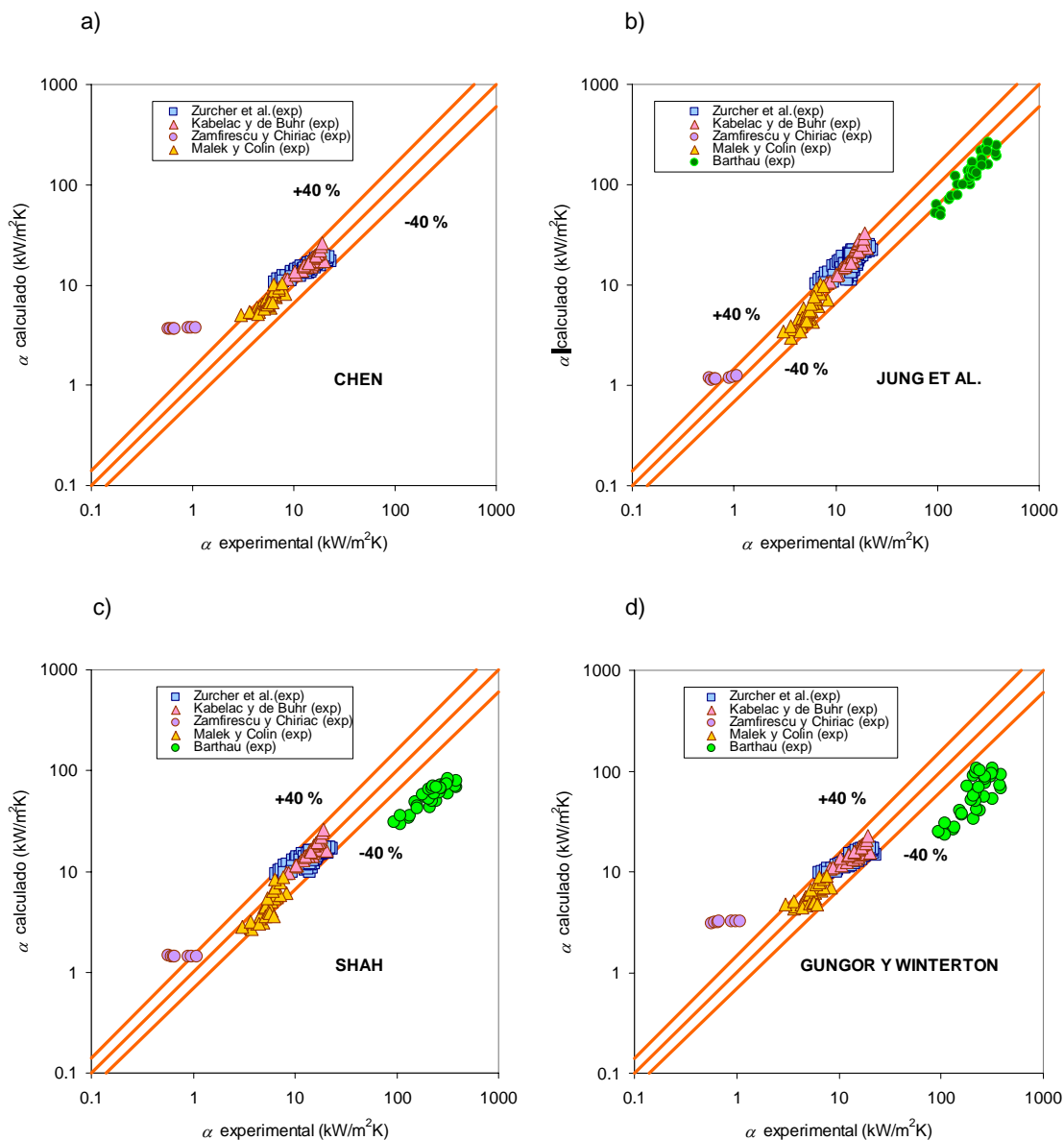
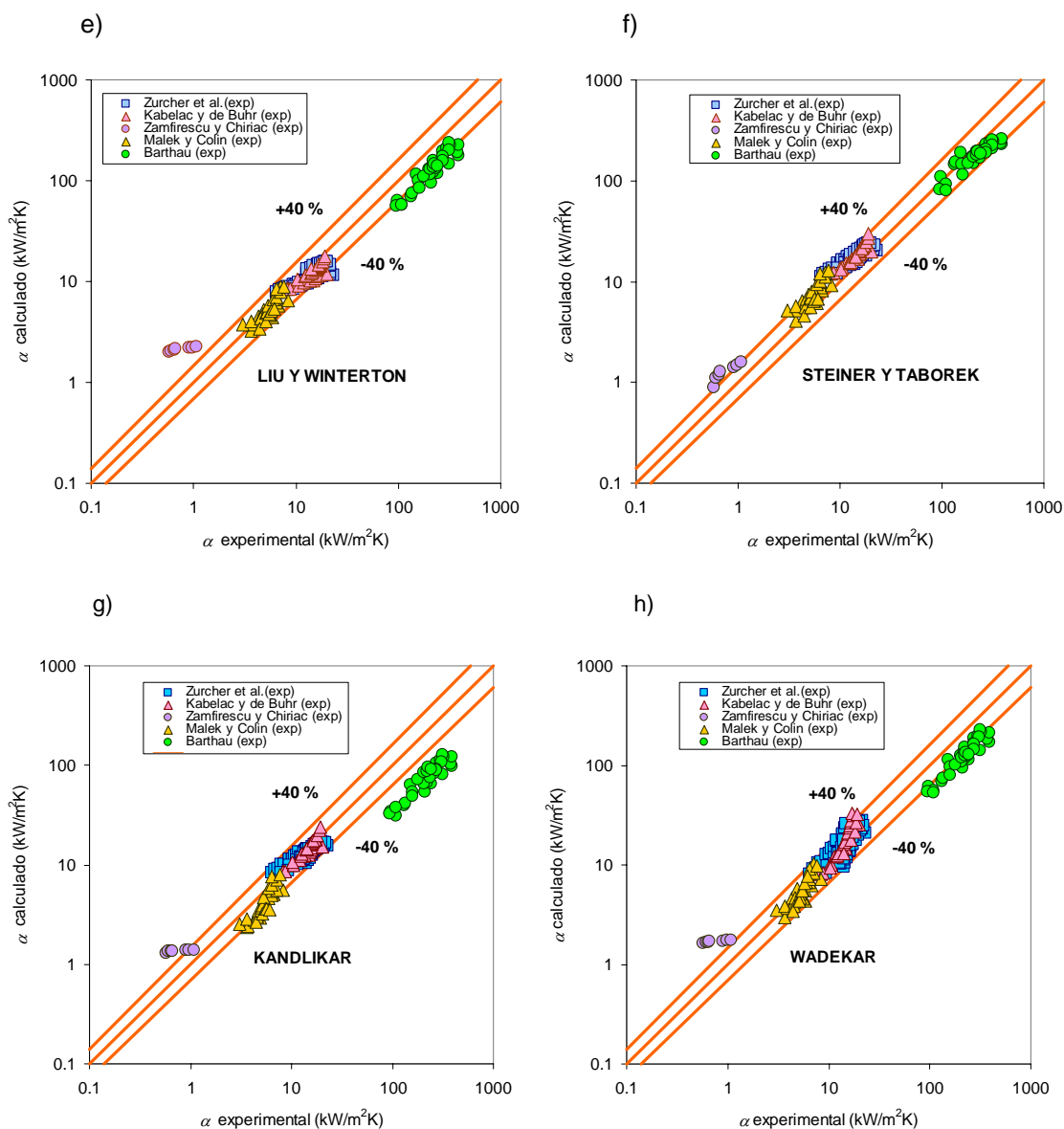


Figura 3.25. Datos experimentales de ebullición de amoniaco en comparación con la predicción de las correlaciones consideradas. (Continúa en la página siguiente).



(Continuación). Figura 3.25. Datos experimentales de ebullición de amoniaco en comparación con la predicción de las correlaciones consideradas.

3.2.3. Resultados y discusión de las predicciones de las correlaciones en su aplicación a la mezcla amoniaco/agua

Al inicio de esta tesis, los únicos datos experimentales de ebullición de la mezcla amoniaco/agua en flujo forzado eran los datos de Rivera y Best (1999), que habían sido obtenidos en un tubo vertical calentado eléctricamente, con las mezclas amoniaco/agua y amoniaco/nitrato de litio, con flujos máscicos relativamente pequeños y con flujos de calor moderados. En este trabajo observaron que el coeficiente de transferencia de calor en ebullición se veía fuertemente afectado por el flujo de calor para el caso del amoniaco/nitrato de litio, y sin embargo, para el caso de amoniaco/agua, era el título de vapor el que influía en mayor medida en el coeficiente de transferencia de calor. También apreciaron que, con flujos de calor altos, las diferencias de los coeficientes de transferencia de calor eran menores entre las distintas mezclas ensayadas, mientras que para flujos de calor pequeños, el amoniaco/agua

ofrecía mayores coeficientes de transferencia de calor. Los autores compararon los modelos de Bennett y Chen (1980) y el modelo de Mishra et al. (1981).

Posteriormente en el año 2005 han aparecido los trabajos de Khir et al. (2005a) y Khir et al. (2005b) de ebullición de la mezcla amoniaco/agua en un tubo vertical de 1 metro de longitud y de 6 mm de diámetro interior. En los datos experimentales de Khir et al. (2005a) las experiencias fueron realizadas con flujos máscicos de 35 a 99 kg/m²s, con concentraciones desde 49 a 61% y flujos de calor entre 30 y 100 kW/m²K. La segunda referencia se ensayó la mezcla en el mismo dispositivo experimental con flujos de calor de desde 8 hasta 18 kW/m², con flujos máscicos desde 700 hasta 2700 Kg/m²s, y concentraciones del 42 al 61 %. En el intento de correlacionar los datos experimentales, habían propuesto la utilización del modelo de Bennett y Chen (1980), el modelo de Jung et al. (1989) (considerando el fluido como puro) y el modelo de Mishra et al. (1981). Los autores recomiendan asimismo como sucedió con los datos de Rivera y Best (1999), la utilización de la correlación de Mishra, esta vez sin modificaciones.

En la Figura 3.26 se muestran los resultados experimentales de Khir et al. (2005a) para una misma presión de 16.76 bar y la misma concentración de 55 % de amoniaco, con distintos flujos de calor y distintos flujos máscicos. Como se puede apreciar los datos experimentales se encuentran muy por encima de las predicciones de las correlaciones.

De los resultados experimentales de estos autores se extrae que es posible que los datos experimentales se encuentren en la zona de aparente nucleación. Esto abre la puerta a una posible corrección de las correlaciones en el término de ebullición nucleada. Como se pudo apreciar en el apartado 3.1.3, la predicción de los modelos de mezclas en ebullición en recintos cerrados tiende a infravalorar los coeficientes de ebullición de la mezcla amoniaco/agua, y de esta manera en el apartado 3.1.4 se ha propuesto una nueva correlación aplicable a la mezcla y que ha sido validada con los datos de Arima et al. (2003), Inoue et al. (2002a) e Inoue et al. (2002b). La ecuación para el cálculo de coeficientes de transferencia de calor en ebullición nucleada corresponde a Eq (3.3).

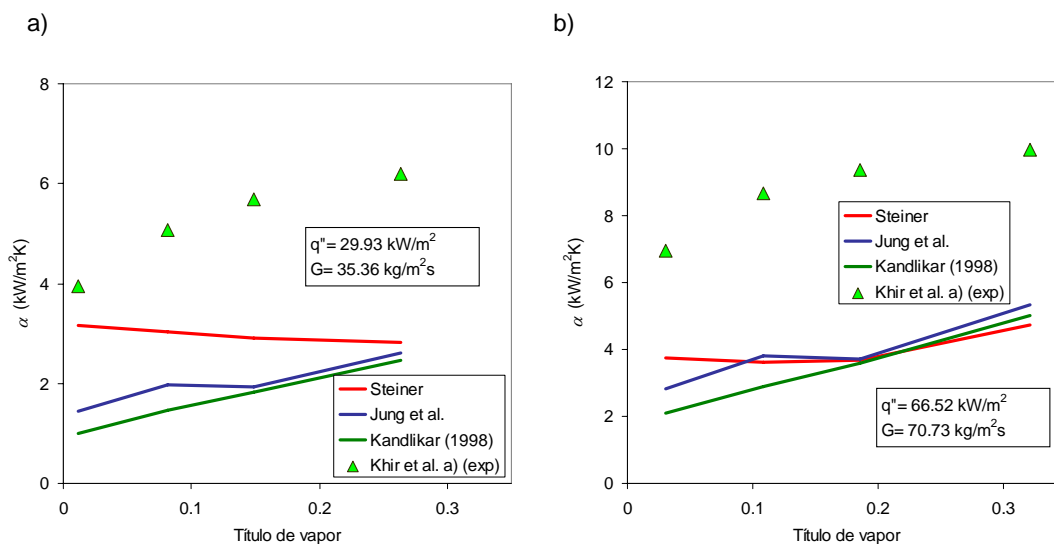


Figura 3.26. Comparación de los datos experimentales de Khir et al. (2005b) en comparación las predicciones de las correlaciones consideradas a una presión de 16.76 bar, concentración 55 % de amoniaco. a) Flujo calor= 29.93 kW/m², flujo máscico=35.35 kg/m²s b) Flujo calor= 66.52 kW/m², flujo máscico=70.73 kg/m²s.

$$\frac{\alpha_{pool}}{\alpha_{id}} = \frac{1}{1+K} \quad \text{Eq. (3.3)}$$

Con el parámetro K calculado por medio de Eq. (3.4)

$$K = A(x) \frac{\alpha_{id}}{q''} (T_{sat,1} - T_{sat,2}) (\tilde{y}_1 - \tilde{x}_1) \left[1 - \exp\left(\frac{B_0 q''}{\rho_L h_{LV} \beta_L}\right) \right] + A(1-x) \frac{\alpha_{id}}{q''} \Delta T_{bp} \left[1 - \exp\left(\frac{B_0 q''}{\rho_L h_{LV} \beta_L}\right) \right] \quad \text{Eq. (3.4)}$$

Los tres modelos considerados a la hora de correlacionar las mezclas se han modificado en el término de ebullición nucleada. En el modelo de Steiner (1993) se propone la nueva correlación (Eq (3.3) y Eq (3.4)) en vez de la correlación de Schlünder (1982). En el caso de la correlación de Jung, se sustituye la correlación Unal (1986) por la nueva correlación, y en la correlación de Kandlikar se calcula el factor de reducción del coeficiente F_D como cociente del valor de la nueva correlación, frente del coeficiente de transferencia de calor ideal. Los resultados se muestran en la Figura 3.27.

Como se puede apreciar en la Figura 3.27, los tres modelos mejoran en la predicción de los coeficientes para las condiciones ensayadas, siendo en este caso, tal y como pasaba en la predicción de los coeficientes de ebullición de amoníaco puro con flujos másicos bajos, la correlación de Jung la que predice coeficientes de transferencia de calor en ebullición cercanos a los datos experimentales, e incluso la tendencia de las predicciones con respecto al título de vapor se siguen. Sin embargo, debe hacerse notar, que la predicción de la correlación de Jung tiende a considerar los coeficientes como convectivos, frente a los datos experimentales que son de ebullición nucleada.

Para el caso del otro artículo publicado por Khir et al. (2005b), las conclusiones sacadas son bien diferentes y es, que se pone en duda la posibilidad de medir coeficientes de transferencia de calor de esta magnitud en un dispositivo experimental como el descrito. Los coeficientes de transferencia de calor obtenidos experimentalmente se encuentran en el rango experimental de 10 a 50 kW/m²K, mientras que los flujos de calor experimentales se encuentran en el intervalo de 8 a 18 kW/m². Con estos valores las diferencias de temperatura apreciadas son extremadamente pequeñas, en el mejor de los casos de 0.4 °C, estableciendo errores experimentales superiores para un termopar calibrado con 0.2 °C de desviación, una incertidumbre experimental del 100 %.

De todas formas se muestran los resultados de las correlaciones. En la Figura 3.28 se muestran dos experimentos realizados por estos autores. Como se puede apreciar ninguna de las correlaciones consideradas es capaz de predecir los coeficientes experimentales, y ni tan siquiera la tendencia de la misma. En este caso, no tiene sentido la corrección de las correlaciones originales, por cuanto tendrían a dar valores superiores.

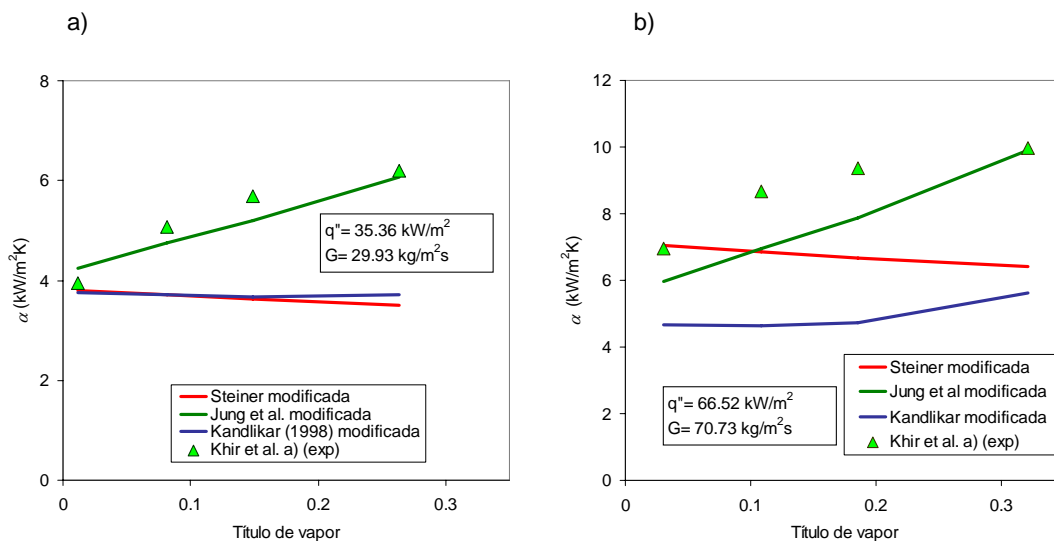


Figura 3.27 Resultados de la nueva correlación propuesta para mezclas para los datos experimentales de Khir et al. (2005a) en comparación las predicciones de las correlaciones consideradas a una presión de 16.76 bar, concentración 55 %. a) Flujo calor= 29.93 kW/m², flujo másico=35.35 kg/m²s b) Flujo calor= 66.52 kW/m², flujo másico=70.73 kg/m²s.

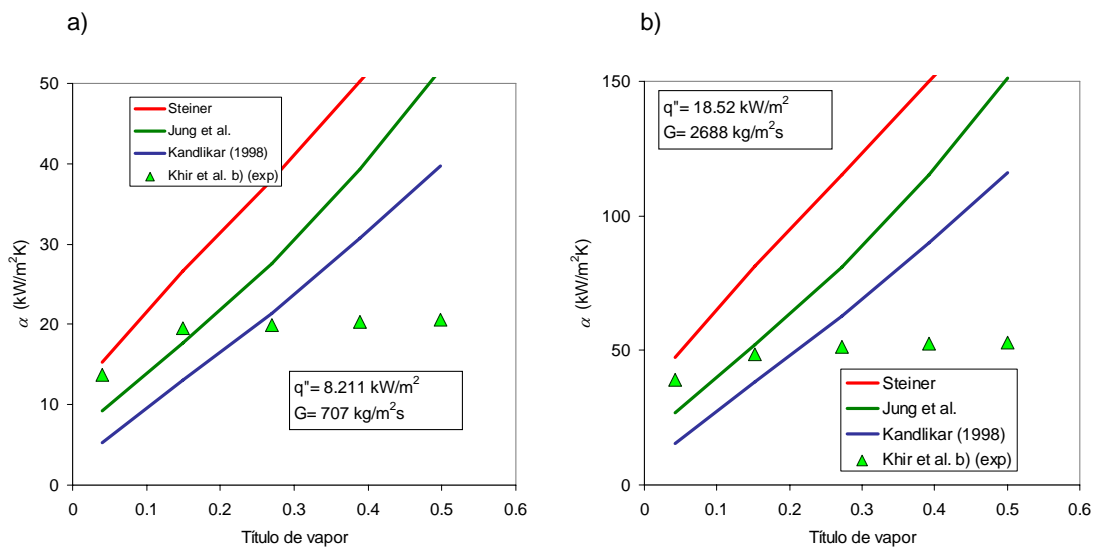


Figura 3.28. Datos experimentales de las correlaciones propuestas en comparación con los datos de Khir et al. (2005b), en un tubo de 6 mm de diámetro, con concentración global de amoniaco de 55 % en peso. Presión ebullición 16.76 bar. a) Flujo calor =8.211 kW/m² flujo másico=707 kg/m²s b) Flujo calor =18.521 kW/m² flujo másico=2688 kg/m²s.

Rivera y Best (1999), proporcionan datos experimentales de ebullición con flujos másicos entre 5 y 10 kg/m²s, y flujos de calor cercanos los 15 kW/m². En la Figura 3.29 se muestran los resultados de la comparación de los datos experimentales de estos autores frente las predicciones de las correlaciones. Como se puede apreciar, los datos experimentales se encuentran por encima de las predicciones de las correlaciones en todas las correlaciones consideradas. Se ha propuesto en este caso una corrección de las correlaciones en el término de ebullición nucleada y los resultados de esta modificación se presentan en la Figura 3.30.

Como se puede apreciar, la correlación de Jung et al es capaz de ajustarse mejor a los datos experimentales, aunque tiende a ofrecer valores inferiores, y además las dispersiones de las predicciones son grandes, probablemente debidas a que el flujo se encuentra en la transición a flujo laminar.

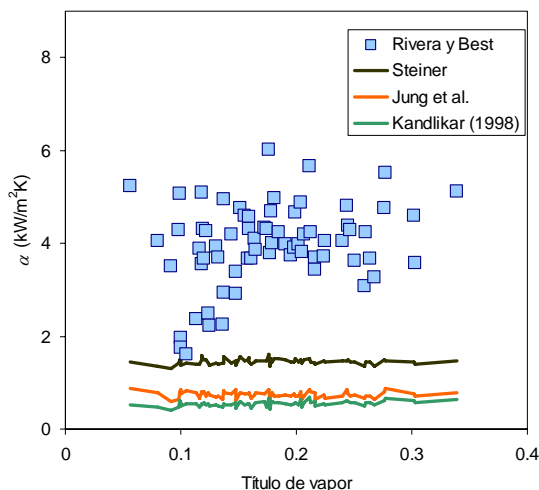


Figura 3.29. Datos experimentales de ebullición de la mezcla amoníaco/agua en un tubo vertical de 2.58 cm. Datos de Rivera y Best (1999), flujo másico entre 5 y 10 kg/m²s. Presión entre 9 y 11 bar. concentración entre 39 y 48 %.

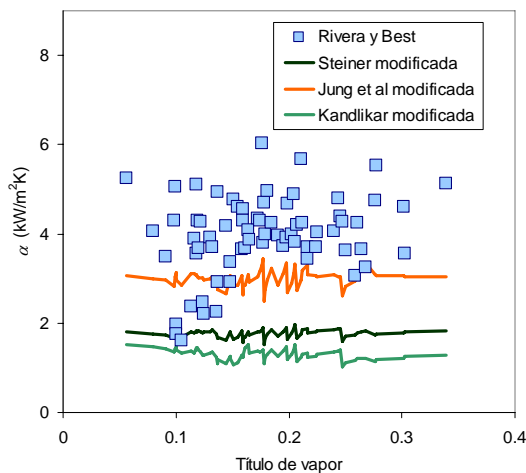


Figura 3.30. Datos experimentales de ebullición de la mezcla amoníaco/agua en un tubo vertical de 2.58 cm. Datos de Rivera y Best (1999), flujo másico entre 5 y 10 kg/m²s. Presión entre 9 y 11 bar. concentración entre 39 y 48 %.

3.3. Conclusiones

Se ha realizado una revisión bibliográfica de los datos experimentales de ebullición nucleada y ebullición forzada del amoníaco puro, agua pura, y la mezcla amoníaco/agua.

En ebullición en recintos cerrados, para el caso del agua, las correlaciones consideradas obtienen valores similares del coeficiente de transferencia de calor. Considerando la tendencia de los datos experimentales considerados la correlación de Gorenflo (1997), es la que mejor predice los coeficientes. Sin embargo, se ha considerado que la correlación de Mostinski (1963)

es la ecuación de mejor se ajusta a los datos de Inoue et al. (2002a), Inoue et al. (2002b), y Arima et al. (2003) de agua pura, y se ha utilizado ésta en el cálculo de los coeficientes de mezcla. Como ya se ha dicho, todas las correlaciones obtienen datos similares, por lo que en cualquier caso puede utilizarse cualquiera de las correlaciones consideradas para este fluido

El análisis de la ebullición nucleada de amoniaco muestra una discrepancia entre los datos experimentales de las dos fuentes bibliográficas consultadas. Los datos Zheng et al., con presiones y flujos de calor bajos coinciden con las predicciones de la correlación de Stephan y Abdelsalam. Los datos experimentales de Arima et al. (2003) muestran valores más altos del coeficiente de ebullición. Para la presión de 7 bar los valores experimentales se sitúan siempre por encima de la predicción de Mostinski y para 15 bar entre las predicciones de la correlación de Mostinski y las predicciones de la correlación de Stephan y Abdelsalam. Considerando el global de los experimentos considerados, la recomendación es utilizar la correlación de Mostinski para el cálculo de coeficientes de ebullición nucleada de amoniaco.

Con respecto a las correlaciones de mezclas consideradas en este estudio, se ha visto que éstas predicen valores del coeficiente de ebullición muy por debajo de los valores experimentales de Arima et al. (2003), aunque estas diferencias se reducen al aumentar la presión. Para concentraciones de más del 50 % de amoniaco es la correlación de Schlünder, la que mejor sigue la tendencia de los resultados experimentales mientras que, para concentraciones inferiores al 50 % la correlación de Thome-Shakir obtiene mejores resultados. Estas discrepancias manifiestan la necesidad de más datos experimentales de la ebullición nucleada de la mezcla para contrastar estos datos, teniendo en cuenta además, que los valores experimentales del coeficiente de ebullición de los fluidos puros obtenidos por Arima et al. (2003), ya sean de agua o de amoniaco, también se encuentran por encima de los valores experimentales de las otras fuentes consideradas.

En esta tesis se ha propuesto una nueva correlación para mezclas que es capaz de predecir el efecto de la concentración en los coeficientes de transferencia de calor de ebullición de la mezcla amoniaco/agua. Esta correlación es de sencillo cálculo y exige conocer la curva de equilibrio de la mezcla amoniaco/agua, que por otra parte es fácil encontrar.

Se ha elaborado una base de datos experimentales de ebullición de los fluidos puros agua y amoniaco, y la mezcla amoniaco/agua en condiciones de flujo forzado.

Para el caso del agua se ha visto como tanto la correlación de Chen como las correlaciones de Steiner y Taborek y Kandlikar predicen bien los resultados experimentales de agua de Kenning y Cooper, la correlación de Shah, muestra comportamientos no apreciados experimentalmente en la variación del flujo de calor. El resto de correlaciones consideran el flujo como fundamentalmente nucleada, por lo que los errores son mayores.

En el caso de amoniaco, se ha visto como la correlación de Jung predice mejor los datos experimentales de ebullición en tubos verticales considerados. Para el caso de los datos experimentales de ebullición del fluido puro en tubos horizontales se aprecia como para flujo anular, o cerca de la transición a flujo anular, la correlación de Shah o la correlación de Kandlikar se ajusta a los datos experimentales para las condiciones consideradas, mientras que la correlación de Jung tiende a dar valores superiores a los experimentales.

Para el caso de la mezcla amoniaco/agua los datos experimentales considerados en este estudio se consideran insuficientes para dictaminar la manera adecuada de correlacionar los datos experimentales. Las correlaciones de mezclas consideradas tienden a infravalorar los coeficientes de transferencia de calor de esta mezcla.

Se ha propuesto una modificación de las correlaciones de mezclas para el cálculo de los coeficientes de transferencia de calor en el término de ebullición convectiva, utilizando la correlación propuesta para ebullición nucleada del apartado 3.1.4 de esta tesis.

La modificación propuesta muestra como la correlación de Jung es capaz de predecir los datos experimentales de Khir et al. (2005a). En los datos experimentales de Khir et al. (2005b) se ha cuestionado la validez de los datos experimentales debido a posibles imprecisiones en la obtención de los coeficientes de transferencia de calor. Ninguna de las correlaciones considerada ni sus modificaciones posteriores han sido capaces de predecir el comportamiento de los datos experimentales de Rivera y Best (1999). Estos datos han sido obtenidos con flujos másicos y flujos de calor pequeños y no se ha dispuesto de datos experimentales de fluidos puros en las mismas condiciones. Estos flujos másicos corresponden a regímenes de líquido de transición a régimen laminar y se cree que pueda ser esta la fuente de las imprecisiones en los cálculos.