

1. Introducción.....	1.1
-----------------------------	------------

1.1. Principio de funcionamiento de los equipos de absorción.....	1.2
1.2. Evaluación económica de los ciclos de absorción.....	1.4
1.3. Acondicionamiento de aire por medio de energía solar.....	1.6
1.3.1. Acondicionamiento de aire por medio de energía solar con la mezcla amoniaco/agua	1.8
1.3.2. Análisis de costes de instalaciones de captadores solares con máquinas de absorción de amoniaco/agua.....	1.8
1.3.3. Líneas de investigación abiertas en máquinas de absorción con la mezcla amoniaco/agua.....	1.10
1.4. El generador de una máquina de absorción de amoniaco/agua.....	1.11
1.4.1. Generadores de tipo inundado de tubos y carcasa.....	1.12
1.4.2. Generadores de flujo forzado de tubos y carcasa.....	1.13
1.4.3. Generadores de película descendente de tubos y carcasa.....	1.15
1.4.4. Intercambiadores compactos como generadores de equipos de absorción.....	1.16
1.4.5. Ebullición forzada de la mezcla amoniaco/agua en intercambiadores de placas.....	1.18
1.5. Objetivo.....	1.19

1. Introducción

Actualmente los equipos de refrigeración por absorción utilizan como fluidos de trabajo las mezclas agua/bromuro de litio ($H_2O - BrLi$) y amoniaco/agua ($NH_3 - H_2O$). Los equipos de agua/bromuro de litio en su mayoría son enfriadoras de agua para aplicaciones de aire acondicionado, mientras el amoniaco/agua es la mezcla típica utilizada en plantas de refrigeración industrial. Las limitaciones tecnológicas actuales de estos equipos tienen que ver con las propiedades de estos fluidos. Así, en el caso del agua/bromuro de litio la corrosión y cristalización de las disoluciones salinas limitan las temperaturas de operación del ciclo de absorción: temperaturas hasta $150\text{ }^{\circ}C$ como máxima temperatura de generación, una temperatura mínima del evaporador de unos $5\text{ }^{\circ}C$, y temperaturas en torno a $35\text{ }^{\circ}C$ de máxima temperatura en el absorbedor y condensador, lo que obliga al uso de torres de refrigeración. Por su parte, los sistemas con amoniaco/agua, además del problema de la toxicidad del amoniaco, operan a presiones elevadas y requieren procesos de purificación en la separación del amoniaco por su volatilidad relativa en comparación con el par agua/bromuro de litio. Este hecho implica un aumento de complejidad del sistema y provoca una reducción del COP. Como principales ventajas del par amoniaco/agua se identifican la posibilidad de trabajar con temperaturas inferiores a $0\text{ }^{\circ}C$ y que no necesitan torre de refrigeración para poder operar.

Los equipos de absorción para climatización se pueden clasificar en tres grupos según el tipo de energía térmica de activación utilizada, Bourouis et al. (2005a):

- En la *climatización a gas*, la energía procede de la combustión generalmente del gas natural o de los gases licuados LPG (propano o butano). Al disponer de una fuente térmica a temperatura elevada, las enfriadoras de agua/bromuro de litio son de llama directa, operando mediante ciclos doble efecto con valores de COP entre 1 y 1.3, y potencias a partir de 18 kW, usando agua de torre de refrigeración tanto para el condensador como para el absorbedor. En el caso de las enfriadoras de amoniaco/agua, la gama de los equipos comerciales de llama directa se reduce a unidades modulares de unos 18 kW para ciclos de simple efecto con COP de 0.5 como máximo y condensados por aire. Dentro de este grupo, los nuevos desarrollos tienen como objetivo no solo mejorar el COP mediante ciclos avanzados (triple efecto en el caso de agua/bromuro de litio, o GAX en el de NH_3-H_2O) sino también reducir el tamaño y extender la gama de equipos al sector residencial y comercial con equipos de pequeña potencia e incorporando la posibilidad de actuar como bomba de calor, y para el caso de la mezcla amoniaco/agua siempre siendo refrigeradas por aire, pues pocas veces para pequeña potencia está justificado el uso de torres de refrigeración.
- La *climatización con calor residual* procedente de sistemas de cogeneración tuvo una amplia implantación en España en la década de los noventa, debido al auge de la cogeneración en el sector servicios (hospitales, hoteles, etc.). Los equipos de absorción solían ser enfriadoras de agua/bromuro de litio de simple efecto de gran capacidad, accionadas con agua caliente a temperaturas de unos $90\text{ }^{\circ}C$ o *vapor de baja*. La reciente aparición en el mercado de equipos de microcogeneración (turbinas de gas y motores alternativos) en la gama de 30 a 100 kW de potencia ha ampliado notablemente el mercado de los equipos de climatización de pequeña potencia. Los nuevos desarrollos de equipos de absorción aparecidos en este sector pretenden mejorar el COP con ciclos de doble efecto activados directamente con los gases de escape, sino también con

sistemas dotados con activación dual (gases calientes y llama directa) o bien equipos con activación térmica a dos niveles de temperatura.

- Los equipos para *climatización con energía solar* térmica con tecnologías de absorción suelen ser enfriadoras de agua/bromuro de litio de simple efecto accionadas con agua caliente a temperaturas inferiores a 90 °C y condensadas con agua de torre. Estos equipos suelen también utilizarse en los sistemas de cogeneración. Algunos de ellos pueden incluso incorporar bombas de burbujas accionadas térmicamente para la circulación de la solución con la consiguiente independencia de la red eléctrica para poder operar.

Las aplicaciones frigoríficas son el otro campo de aplicación en que la tecnología de refrigeración por absorción sigue siendo interesante y competitiva en determinadas aplicaciones, frente a la tecnología de compresión mecánica. En este caso la mezcla amoniaco/agua es la única opción existente dentro de los equipos de absorción, para producción de frío hasta temperaturas de -60 °C, con un amplio intervalo de potencias desde 250 kW hasta megavatios. En los últimos años la implantación de los sistemas de cogeneración con turbinas y motores de gas en sectores industriales como el agroalimentario, petroquímico y farmacéutico, ha favorecido la utilización de este tipo de plantas que utilizan el calor residual para su activación. Normalmente, estas plantas se diseñan y construyen a medida para cada aplicación específica.

En la última década, las instalaciones realizadas en España con máquinas de absorción han tenido una gran expansión, en la mayoría de casos formando parte de plantas industriales de cogeneración de más de 500 kW, para la producción de electricidad, calor y frío. Este desarrollo tecnológico a nivel europeo se ha realizado gracias a los programas europeos de I&D JOULE y de demostración THERMIE (Plan de trabajo I&D, 2003). Como resultado existen varias empresas europeas, entre las que se encuentran algunas españolas, desarrollando actividades en este ámbito tecnológico, tanto a nivel de fabricación como de ingeniería

Como tecnologías ya implantadas con un mercado estable y con crecimiento limitado es necesario recordar la existencia de los frigoríficos y congeladores de pequeña potencia, entre 50 y 250 W, que utilizan la mezcla amoniaco/agua junto con un gas inerte, usualmente hidrógeno, en un ciclo denominado de absorción-difusión. Estos equipos tienen como principal característica la ausencia de bomba de solución, y la fuente de calor para su accionamiento depende de la aplicación del equipo. De esta forma se suelen instalar en las habitaciones de los hoteles, por su funcionamiento silencioso, en cuyo caso se utilizan resistencias eléctricas para su funcionamiento, o se suelen instalar también en aquellos sitios donde la red eléctrica no se encuentra disponible, en cuyo caso llevan un quemador de gases licuados de petróleo LPG.

1.1. Principio de funcionamiento de los equipos de absorción

Los equipos de absorción, al igual que los de compresión de vapor, se basan en el principio de condensación y evaporación de un refrigerante a diferentes presiones. La principal diferencia entre estos ciclos reside en el proceso en el cual dicho fluido se trasvasa desde la zona de baja presión a la zona de alta presión. En el caso de los ciclos de compresión de vapor dicho trasvase se debe a la acción mecánica de un compresor. En el caso de un sistema de absorción, el refrigerante vaporizado en la zona de baja presión es absorbido por una solución que tiene afinidad fisicoquímica por dicho fluido y conocido como absorbente. La mezcla líquida resultante es bombeada a la zona de alta presión, donde el refrigerante es extraído de nuevo de la solución mediante la aportación de calor. En la Figura 1.1 se muestran los principales

componentes de un ciclo de absorción de simple efecto situados sobre un diagrama genérico de Presión-Temperatura-Composición.

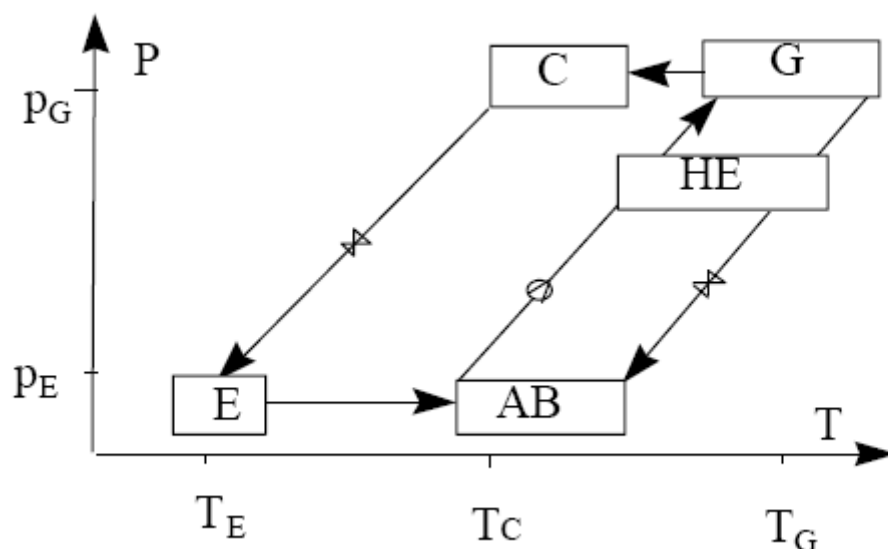


Figura 1.1 Principales componentes de un ciclo de absorción de simple efecto en un diagrama PTX.

Como se observa en Figura 1.1, un ciclo básico de absorción de simple efecto esta formado por los siguientes componentes:

Condensador. El refrigerante vaporizado procedente del generador es condensado, cediendo su calor de cambio de fase a otro fluido externo, ya sea aire o agua.

Válvula de expansión. En la válvula de expansión se produce la caída de presión desde el nivel de presión más alto perteneciente al condensador, hasta el nivel de presión más bajo presente en el evaporador. En los equipos de agua/bromuro de litio, como la diferencia de presiones entre el condensador y el evaporador es pequeña, alrededor de 5 kPa, se suele emplear simplemente trampas de líquido y orificios. En el caso de equipos que operan con la mezcla amoniaco/agua, la gran diferencia de presiones entre dichos componentes hace necesario el uso de dispositivos similares a los utilizados en los equipos de compresión de vapor.

Evaporador. En este componente, el refrigerante procedente de la válvula de expansión se evapora tomando calor del medio que le rodea, ya sea aire o bien otro fluido como agua, salmuera. En este punto hay que distinguir claramente cuando el refrigerante se halla en el interior del evaporador en estado puro o no. Si el refrigerante es puro, la presión de operación en dicho componente será la que corresponda a su temperatura de saturación, mientras que si aparecen restos de absorbente, como sucede en las máquinas de amoniaco/agua, la presión de operación irá disminuyendo a medida que la acumulación de absorbente en su interior sea cada vez más significativa. Es por ello que en los equipos de amoniaco es importante la rectificación de la corriente de refrigerante.

Absorbedor. En este dispositivo se pone en contacto la fase vapor del evaporador con la solución procedente del generador, con el fin de que el refrigerante se absorba en la solución. A su salida se obtiene una solución concentrada en refrigerante, la cual es de nuevo impulsada hacia el generador por medio de una pequeña bomba. Como el proceso de absorción es

exotérmico, la energía liberada debe ser transferida a una corriente externa para no detener dicho proceso de absorción. La corriente externa suele ser el mismo medio que el del condensador.

Generador. En este elemento se produce la evaporación parcial de la mezcla refrigerante/absorbente, de forma que el líquido restante rico en absorbente retorna al absorbedor y el vapor generado se condensa y expande hasta el evaporador. En el caso de la mezcla agua/bromuro de litio, el flujo de vapor está compuesto por agua pura, pues la separación refrigerante/absorbente es total. En el caso de la mezcla amoniaco/agua, debido a que la diferencia de temperaturas de saturación no es suficiente, suele ser necesario rectificar la mezcla por medio de una condensación parcial o por medio de una columna de destilación, para que no llegue absorbente al evaporador.

Intercambiador de calor solución-solución. Este intercambiador de calor, conocido también con el nombre de economizador, permite mejorar el rendimiento del ciclo debido a la disminución de la carga térmica en el generador y en el absorbedor. Su ausencia implicaría, que en el generador habría que calentar la solución desde la temperatura de operación del absorbedor hasta la ebullición, mientras que en absorbedor se debería enfriar la solución desde la temperatura del generador hasta la temperatura del absorbedor, para poder iniciar el proceso de absorción.

A partir de la configuración básica indicada en la Figura 1.1, se han superpuesto otros componentes con el fin de mejorar el rendimiento térmico y reducir las irreversibilidades internas del ciclo. La localización de estos componentes depende del fluido de trabajo utilizado. Así, los equipos que operan con agua/bromuro de litio, debido a que operan a niveles de presión muy bajos, junto a la limitación por cristalización de la sal, obliga la superposición de nuevos componentes en el eje de las presiones. Como consecuencia, los ciclos de doble efecto que operan con dicho fluido requieren tres niveles de presión diferentes. En cambio, para sistemas de amoniaco/agua, al operar ya con presiones considerables en la configuración de simple efecto, el incremento de eficiencia se dirige a la inclusión de componentes en la dirección de la solubilidad, debido a que dicho par de trabajo tiene miscibilidad total.

1.2. Evaluación económica de los ciclos de absorción

Comparando los ciclos de absorción, con los equipos de compresión mecánica, las diferencias de COP conforme la temperatura de evaporación desciende se reducen. A tal efecto en la Figura 1.2 se muestra el COP frente a la temperatura de evaporación, de un ciclo de compresión, en comparación con un ciclo de absorción de simple efecto de amoniaco/agua, para temperaturas inferiores a 0 °C en el evaporador. Se puede apreciar como para temperaturas inferiores a -25 °C el rendimiento de los equipos de compresión mecánica baja considerablemente, lo que haría comparable el rendimiento de los dos tipos de tecnologías.

Para mostrar los resultados de las evaluaciones económicas que deciden el uso o no de las máquinas de absorción de amoniaco/agua, se muestran los resultados obtenidos por Hudson (2002), que evaluó la viabilidad de los equipos de absorción de amoniaco/agua en refrigeración. En la Figura 1.3 se muestran los resultados de este estudio donde se muestra una estimación de costes de operación para diferentes costes de la tonelada de vapor, en comparación con las máquinas de compresión. Se puede apreciar que existe una zona de rendimiento económico que depende del coste de la energía de accionamiento y de la temperatura de evaporación de la instalación, para la cual las máquinas de absorción llegan a tener costes de operación inferiores. Además de estos costes, también debe de tenerse en cuenta que, dado que el rendimiento de las máquinas de compresión baja considerablemente,

la potencia de los compresores se eleva, y por tanto, también el coste de adquisición de los compresores.

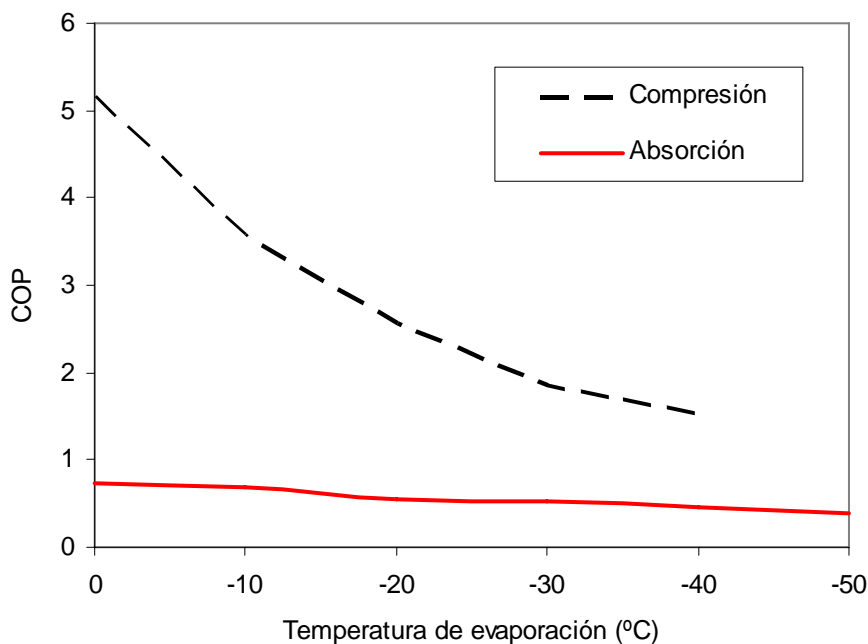


Figura 1.2 Figura comparativa de COP de las máquinas de absorción frente a las máquinas de compresión mecánica. (Fuente: Hudson (2002)). (Temperatura condensación y absorción 35 °C, Temperatura generador 150 °C).

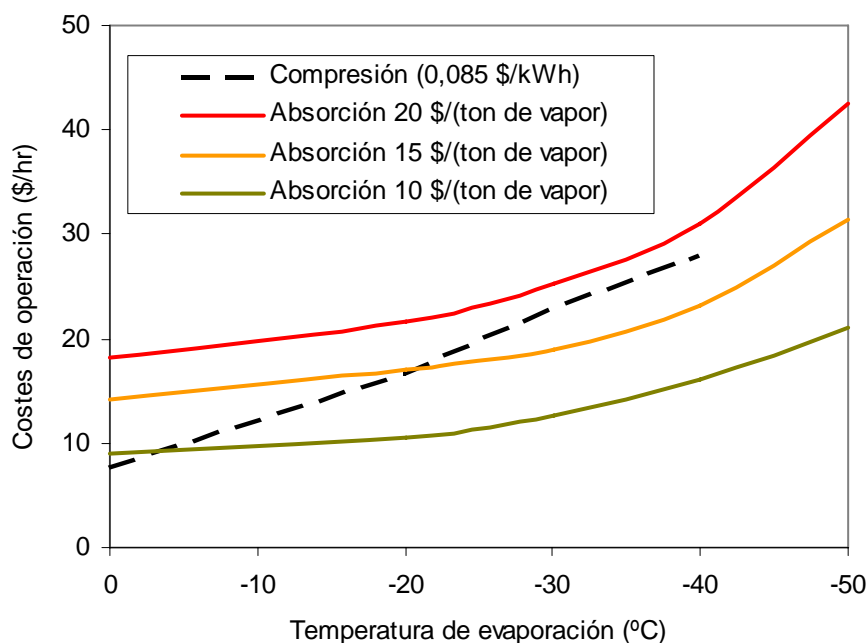


Figura 1.3 Comparación de costes de operación de una máquina de amoníaco de una potencia de 500 kW de potencia instalada para equipos de compresión mecánica de vapor, en función del coste energético de la fuente de activación térmica de la máquina de absorción. (Fuente: Hudson (2002)).

Se ha visto que solo para potencias grandes, el coste mayor de los equipos de absorción se puede compensar por un menor coste de la energía de activación. En las máquinas de absorción el coste específico (€/kW) aumenta cuando se reducen las potencias, y este hecho plantea un inconveniente al uso de este tipo de tecnologías en sectores como el residencial, que se caracteriza por demandas de frío y aire acondicionado pequeñas.

Si la energía disponible no lleva asociado costes de operación, como en el caso de energía solar térmica o energía residual (a excepción del coste de bombeo), las máquinas de absorción vuelven a establecerse como alternativa económica. Actualmente no existe ningún equipo de absorción comercial de pequeña potencia, con amoniaco/agua como mezcla refrigerante/absorbente, activado por energía térmica de baja temperatura. Como ejemplo de estimación económica de equipos de absorción, se ha escogido el trabajo de Rafferty (1998), que estudió los plazos de retorno de equipos de absorción de agua/ bromuro de litio, de baja potencia de la compañía Yazaki utilizando fuentes de calor residual, en comparación con un sistema rooftop en las mismas condiciones. En la Figura 1.4. se representa el plazo de retorno simple de diferentes máquinas de absorción con diferentes potencias (1 tonelada de refrigeración = 3.516 kW), en función del precio de la energía eléctrica, considerando que la máquina de absorción aprovecha calor de una corriente térmica sin ningún coste asociado. Como se puede apreciar, también en el caso de que estas máquinas sean activadas con fuentes de calor residual, el plazo de retorno se acorta conforme se eleva la potencia instalada.

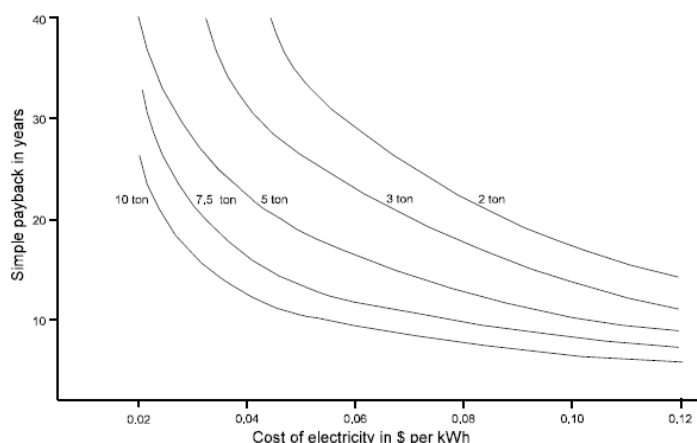


Figura 1.4 Plazo de retorno simple, en comparación con los equipos de compresión mecánica. (Fuente: Rafferty (1998)).

1.3. Acondicionamiento de aire por medio de energía solar

En los últimos años ha existido una preocupación por parte de la Unión Europea por reducir las emisiones de CO₂, pues plantea problemas medioambientales, y además se eleva la dependencia de recursos externos, al ser estas emisiones en su mayor parte debidas a combustibles fósiles. Es por eso que la idea del enfriamiento solar está ganando adeptos, y principalmente en aquellos países del sur de Europa, como España, donde en el sector residencial la demanda de aire acondicionado está creciendo en mayor medida, generando puntas en el consumo eléctrico en los meses de verano.

El aumento de las necesidades energéticas para aire acondicionado hace que el interés en el aprovechamiento de las tecnologías de absorción dejen a un lado parcialmente la cuestión económica y se plantee el uso de estas tecnologías desde un punto de vista estratégico, para

poder suplir las necesidades energéticas en las puntas de demanda de energía, reduciendo a la vez las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

El principal escollo a la hora del montaje de plantas solares es el coste de adquisición, lo que ha llevado a los países de la Unión Europea a fomentar por medio de subvenciones o leyes el uso de captadores solares. Si bien la reducción de precios en captadores planos es probable que suceda, los costes de instalación pueden corresponder al 50 % de la inversión, por lo que el coste final de la instalación no se reduciría en la misma medida. Sin embargo, la demanda actual de captadores solares de media y alta eficiencia está aumentando y las investigaciones en nuevos materiales adecuados para estas temperaturas están reduciendo sus costes. Es probable que en un futuro no muy lejano, captadores más eficientes se encuentren disponibles a precios competitivos.

En cuanto a la posibilidad de climatización solar actualmente se han implantado dos tipos de tecnología: adsorción con silica-gel como adsorbente, y absorción con agua/bromuro de litio como mezcla refrigerante/absorbente.

En primer lugar, la tecnología de adsorción (con "d"), se ha posicionado como una de las alternativas más clara a la posibilidad de enfriamiento solar, pues la bajas temperaturas de activación la hace apta para el uso en conjunción con colectores planos, aunque sin embargo, los costes de este tipo de máquinas superan a los sistemas de absorción, por lo que es necesario utilizar potencias grandes para compensar una mayor inversión. Actualmente se está investigando en diferentes áreas como son: el uso de nuevas mezclas de refrigerante y adsorbente, la posibilidad de refrigerar con aire, reducir el tamaño y coste de los equipos, mejorar el comportamiento cíclico de estas máquinas, e incluso se está trabajando en la reducción de las temperaturas de activación. Probablemente para que se implanten con mayor facilidad es obligatorio el uso de materiales desecantes más económicos. A tal efecto, se están probando desecantes líquidos, como LiCl.

De los equipos de absorción que se utilizan en conjunción con plantas de energía solar, los primeros que se han posicionado en el mercado son los equipos de agua/bromuro de litio, debido principalmente a su mejor rendimiento frente a los equipos de amoniaco/agua. Las posibilidades de uso de este tipo de tecnologías en conjunción con energía solar son varias: es posible hacer la conjunción de máquinas de doble efecto funcionando con calderas en la etapa de alta y con energía solar en la primera etapa, es posible instalar colectores concentradores de alta temperatura para instalaciones de doble efecto, o incluso colectores de vacío en una máquina de simple efecto. Como principales inconvenientes de estas máquinas deben mencionarse en primer lugar, el espacio que ocupan, dado que este tipo de máquinas trabajan en condiciones de vacío y tienden a ser voluminosas, y en segundo lugar, probablemente el principal inconveniente: necesitan una torre de enfriamiento para poder operar, que se encuentra condicionada a la disponibilidad de agua, los costes de mantenimiento regular, y problemas de la legionella. Estos problemas hacen que este tipo de equipos sólo se encuentran justificados en determinados casos, y se justifican de una manera especialmente difícil en equipos de pequeña potencia. En los años 90 se trabajó en la posibilidad de refrigerar por aire este tipo de mezclas, con aditivos que aumentasen la solubilidad de la mezcla (Bourouis et al. (2005b)), e intensificando los procesos de transferencia de calor. Prueba de estos desarrollos se ha puesto en el mercado la máquina Rotártica, con una potencia nominal de 4.5 kW de frío. De todas formas, este tipo de máquinas se encuentran cerca del límite de operación de una máquina de absorción con agua/bromuro de litio.

1.3.1. Acondicionamiento de aire por medio de energía solar con la mezcla amoniaco/agua

Se ha comentado anteriormente que actualmente se están creando expectativas para la climatización con energía solar. En principio se había visto que a no ser que las temperaturas del evaporador fuesen suficientemente bajas, las máquinas de absorción de amoniaco/agua no eran capaces de competir con las tecnologías actuales, sean de absorción, de adsorción o de compresión mecánica, debido principalmente a las necesidades de temperaturas de generación altas, y rendimientos bajos, por lo cual, en principio es un tipo de tecnología no adecuada para temperaturas superiores a cero grados. Sin embargo, existen determinadas barreras en el resto de tecnologías de refrigeración que las máquinas de amoniaco/agua no tienen.

En primer lugar, este tipo de máquinas no necesitan una torre de refrigeración para poder operar, y esto es una ventaja importante para equipos de pequeña potencia, donde una torre de refrigeración difícilmente se encuentra justificada, y es que el resto de tecnologías con las que compete la mezcla amoniaco/agua, o no son capaces de operar sin torre de refrigeración, o tienen una temperatura de operación limitada (Rotártica).

En segundo lugar, el coste de adquisición de los equipos es inferior a los equipos de adsorción (con "d"), y actualmente su coste es comparable a los de las máquinas de agua/bromuro de litio, lo que haría estas máquinas adecuadas a equipos de pequeña potencia. Este es un factor que debe ser trabajado, pues aún siguen siendo más caros que un equipo de compresión mecánica y además necesitan también captadores solares capaces de trabajar con temperaturas altas. Balaras et al. (2006) al respecto, identifican que el coste de la instalación de captadores solares para operar con máquinas de amoniaco/agua, como el factor determinante que hace que estas máquinas no se hayan implantado aún en el mercado.

En tercer lugar, las posibilidades de reducción del tamaño de los equipos son muy grandes, dado que las pérdidas de carga no son críticas, como sucede en los equipos de agua/bromuro de litio. El tamaño en un equipo de pequeña potencia es muy importante también, pues es necesario que el producto sea atractivo al consumidor, que quizás pueda decidirse a instalar un equipo por una cuestión medioambiental, si el equipo es de dimensiones reducidas, aún a pesar de que sea más caro que un equipo de compresión mecánica.

En conclusión, para que exista en el mercado una máquina de absorción de amoniaco/agua, se deben eliminar determinadas barreras económicas y tecnológicas: aumentar la compacidad de los equipos, pues suelen ser más voluminosos que los equipos de compresión mecánica, reducir la carga necesaria para evitar los problemas de seguridad que pueden plantear, reducir el coste de adquisición (pues tienen que competir con otras tecnologías que exigen temperaturas de generación inferiores), reducir la temperatura de activación.

Como barrera no asociada a las máquinas de absorción de amoniaco/agua, aunque si al uso de éstas en conjunción con energía solar térmica, se encuentra el coste actual de adquisición los captadores solares con concentrador. Como hecho alentador para las máquinas de amoniaco/agua se está apreciando que la tendencia del mercado es a una reducción de los costes de adquisición de captadores solares de alta eficiencia.

1.3.2. Análisis de costes de instalaciones de captadores solares con máquinas de absorción de amoniaco/agua

Para ilustrar la influencia de los tipos de captadores en conjunción con una máquina de absorción de amoniaco/agua, se ha escogido el trabajo de Dong - Seon et al. (2005). Estos autores construyeron un prototipo de máquina de absorción de amoniaco/agua, e hicieron un estudio teórico y práctico para la optimización de sistemas de absorción de amoniaco/agua en

conjunción con captadores solares. En este trabajo se mostraba que, para temperaturas inferiores a 100 °C el sistema de absorción no era capaz de funcionar con rendimientos aceptables. En la Figura 1.5 se muestran los coeficientes de operación del prototipo construido por estos autores para dos concentraciones de amoniaco en la carga inicial. Los datos experimentales obtenidos para una carga inicial del 42.5 % en concentración de amoniaco, sirven para establecer una evaluación de la opción de tecnología de captadores solares más adecuada a este prototipo.

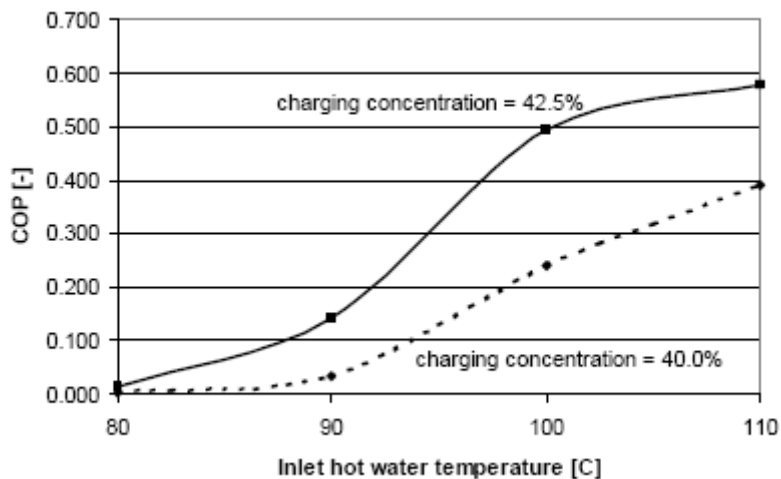
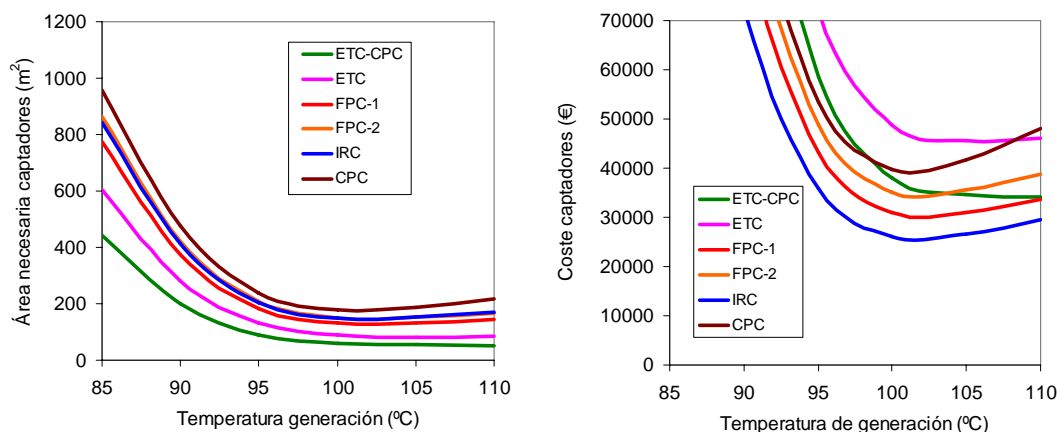


Figura 1.5. Coeficiente de operación (COP) de una máquina de absorción para diferentes temperaturas de generación. (Fuente: Dong - Seon et al. (2005)).

Los cálculos se han realizado a partir de datos de eficiencia de colectores recogidos en Hans-Martin (2004), el procedimiento de cálculo propuesto en este manual. Con el valor del COP de la máquina descrita por Dong - Seon et al. (2005), esta máquina trabajaría en conjunción con seis tipos de captadores solares atendiendo a una demanda anual de 15 MWh, de aire acondicionado. Los cálculos han sido realizados con datos solares de Barcelona. En los cálculos se obtiene la máxima potencia de frío obtenida, que se encontraría entre 17 kW (para los captadores de peor rendimiento, y con la temperatura más baja de generación de 85 °C), y 37 kW (para los captadores de mejor rendimiento a la mayor temperatura de generación de 110 °C). Los resultados se muestran en la Figura 1.6. Como se puede apreciar, la solución más económica pasaría por el uso de captadores integrados en tejados, y después se encontraría la mejor solución tanto los captadores planos como los tubos de vacío con concentrador tipo Sydney. Atendiendo a la superficie instalada, la mejor solución sería la de tubos de vacío con concentrador. Como debe entenderse que la superficie disponible para captadores solares se encuentra limitada, los captadores solares con concentrador serían la mejor opción en la mayoría de los casos.

De las Figura 1.6 a) y b) se obtiene también la conclusión de que, utilizando intercambiadores de calor más eficientes, sería posible aprovechar mejor la temperatura de la fuente de calor, y por tanto es posible mejorar el comportamiento de la máquina en aquellos días donde la radiación solar no es suficiente para alcanzar las temperaturas máximas de diseño. Los intercambiadores compactos, debido a las características de buenos coeficientes de transferencia de calor son unos intercambiadores adecuados para aprovechar al máximo los gradientes térmicos de instalaciones solares. Si el interés es reducir el coste de la máquina de absorción, dentro de los intercambiadores compactos los intercambiadores de placas son la solución más económica, y como muestran las líneas de investigación abiertas en los últimos

años son probablemente los intercambiadores de calor adecuados para máquinas de amoníaco/agua en conjunción con instalaciones de captadores solares.



LEYENDA:

ETC-CPC(Tubo de vacío con concentrador)	FPC (planos solución (b))
ETC (Tubos de vacío)	IRC (integrados en tejado)
FPC (planos solución (a))	CPC (Concentradores)

Figura 1.6. a) Área calculada de captadores frente a la temperatura de generación. b) Costes estimados de instalación en función de la temperatura de generación para las soluciones adoptadas.

1.3.3. Líneas de investigación abiertas en máquinas de absorción con la mezcla amoníaco/agua

El potencial de la mezcla amoníaco/agua en máquinas de absorción de pequeña potencia ha dado lugar a trabajos de investigación orientados fundamentalmente a la conjunción de este tipo de equipos con instalaciones solares. En estos prototipos se intenta reducir los costes, adoptando ciclos sencillos, aumentando la compacidad de los equipos para aprovechar al máximo las temperaturas de las fuentes de calor disponibles, y mejorando el conocimiento de los dispositivos que componen los equipos de absorción.

El CREVER ha desarrollado en el periodo 2002-06 un proyecto de investigación titulado “Desarrollo de componentes avanzados para el diseño y fabricación de máquinas de refrigeración por absorción con NH₃-H₂O de pequeña potencia y activación térmica a baja temperatura” financiado por el Plan Nacional de I&D, dentro del Programa de Diseño y Producción Industrial (Ref. DPI 2002-04536-01). Este proyecto, en el que intervino también la Universidad de Vigo, tuvo como objetivo estudiar de forma teórica y experimental los procesos de transferencia de calor y masa en los componentes claves de un equipo de absorción (absorbedor, generador, rectificador y columna de destilación) utilizando en todos los casos intercambiadores de calor compactos o superficies de intercambio avanzadas. Esta tesis doctoral se realizó en el marco de este proyecto.

Brendel et al. (2004) propusieron una instalación de absorción de amoníaco/agua con intercambiadores de placas en todos los equipos de la instalación, salvo en el generador. El prototipo construido tenía una potencia nominal de 9 kW, y propusieron como trabajo futuro operar con mejores eficiencias y rediseñarla para pueda ser construida con costes competitivos.

Roriz et al. (2004) también desarrollaron una máquina de pequeña potencia de amoníaco/agua de 5 kW de potencia nominal, con intercambiadores de placas en todos los dispositivos del equipo. La propuesta se hizo con colectores tipo CPC.

Para reducir la necesidad de rectificación de los ciclos de amoníaco/agua sin que eso implique el aumento de las temperaturas de activación, también se ha planteado el usar aditivos que aumenten la volatilidad relativa entre el absorbente y el refrigerante. Como ejemplo representativo, el CREVER está llevando a cabo un nuevo proyecto, con la base de la mezcla amoníaco/agua titulado "*Mejora de las propiedades termofísicas y de los fenómenos de transporte en intercambiadores de placas mediante la adición de agua a la mezcla $\text{NH}_3\text{-LiNO}_3$ en refrigeración solar por absorción*", financiado por el Plan Nacional de I&D dentro del Programa de Energía (Ref. ENE2005-03346), donde el principal objetivo es mejorar las propiedades de transferencia de calor y masa de la mezcla amoníaco/nitrato de litio, con la adición de agua.

1.4. El generador de una máquina de absorción de amoníaco/agua

En el generador de una máquina de absorción se produce la separación parcial de la mezcla amoníaco/agua. En el generador se produce la separación del refrigerante, es decir, del componente más volátil de la mezcla, por lo que se obtiene el refrigerante vapor y una disolución débil, a partir de la disolución fuerte procedente del absorbedor. Dicho proceso de separación o generación de refrigerante requiere el aporte de calor externo, a una temperatura superior a la de saturación de la disolución fuerte líquida, correspondiente a la presión existente en el generador.

Los generadores pueden clasificarse en función de la forma en la que se aporta el calor externo:

- Generadores de calentamiento directo: Son aquellos en los que el calor se aporta directamente desde la fuente de energía, por combustión, cuya llama incide directamente sobre las superficies del generador, o calentamiento directo mediante resistencias eléctricas. La mayor aplicación comercial de estos generadores se encuentra en los sistemas de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ de reducida potencia, en los que se suele utilizar gas natural como combustible. El calentamiento mediante resistencias eléctricas solamente se utiliza en montajes experimentales.
- Generadores de calentamiento indirecto. Son aquellos en los que se utiliza un fluido caloportador que cede calor a la disolución en un intercambiador que constituye el generador. El aporte de energía al fluido calefactor puede realizarse quemando algún combustible en una caldera, para producir agua caliente o vapor de agua, o bien utilizando calores residuales de distintos procesos.

Los generadores de calentamiento indirecto son los generadores adecuados para el uso de energía solar. Dentro de estos generadores se encontrarían los siguientes tipos:

- De tipo inundado. Este tipo de intercambiadores se caracteriza porque el líquido permanece estancado en un recinto donde se sitúa un serpentín por donde circula el fluido de calentamiento. El tipo de ebullición es fundamentalmente ebullición nucleada, por lo que la diferencia de temperaturas entre la pared y el fluido es la que caracteriza los coeficientes de transferencia de calor. El tipo más representativo sería el Kettle, y quizás el más utilizado en plantas de amoníaco/agua, cuando el calentamiento es indirecto.
- En flujo forzado. Se caracteriza por que la corriente de líquido fluye por los tubos con un cierto componente de velocidad, lo que hace que se obtengan mejores coeficientes de transferencia de calor, y no se encuentran tan

influenciado por la diferencia de temperaturas entre la pared y el líquido. Dentro de este tipo, quizás los más utilizados en todos los procesos industriales son los intercambiadores de flujo forzado inducido por termosifón.

- En película descendente. Este tipo de generadores se caracterizan porque el fluido se evapora a partir de una capa delgada sobre una pared.

Los generadores por calentamiento indirecto pueden ser en principio cualquier tipo de intercambiador, aunque normalmente se utilizan tubos y carcasa.

1.4.1. Generadores de tipo inundado de tubos y carcasa

Uno de los generadores más utilizados en instalaciones de amoniaco/agua son los generadores de carcasa tipo **Kettle**, (Colibri, Technicold Services Inc., Gordon Brothers Industries). La principal razón que ha llevado al uso de este tipo de intercambiadores en las plantas de amoniaco/agua ha sido que dado que las máquinas de absorción de amoniaco/agua se han caracterizado por ser proyectos tipo llave en mano, donde la empresa instaladora diseña los equipos en función de la demanda, y a la vez la empresa instaladora es la empresa encargada del mantenimiento de la misma, lo que provoca que los diseños se hacen con un objetivo cumplir con seguridad los cálculos del diseño.

Estos generadores se caracterizan por una carcasa de mayor diámetro que el haz de tubos, separándose en esta carcasa el líquido del vapor, y donde normalmente el nivel de líquido se mantiene por medio de deflectores. En la Figura 1.7 se muestra la configuración de un generador tipo Kettle.

Estos intercambiadores tienen como principal ventaja la no dependencia de condiciones hidrodinámicas, y que el coeficiente global de transferencia de calor no es demasiado sensible a la cantidad de vapor generado, salvo que se genere mucho vapor. Como principal inconveniente tienen que, para mezclas con diferencias grandes entre sus temperaturas de saturación, se produce un aumento de la temperatura de ebullición por acumulación del componente pesado, lo cual reduce el gradiente de temperaturas disponible para la ebullición. Este efecto causa que los Kettle y los generadores de vapor internos sean los intercambiadores que peor aprovechan los gradientes de temperaturas disponibles.

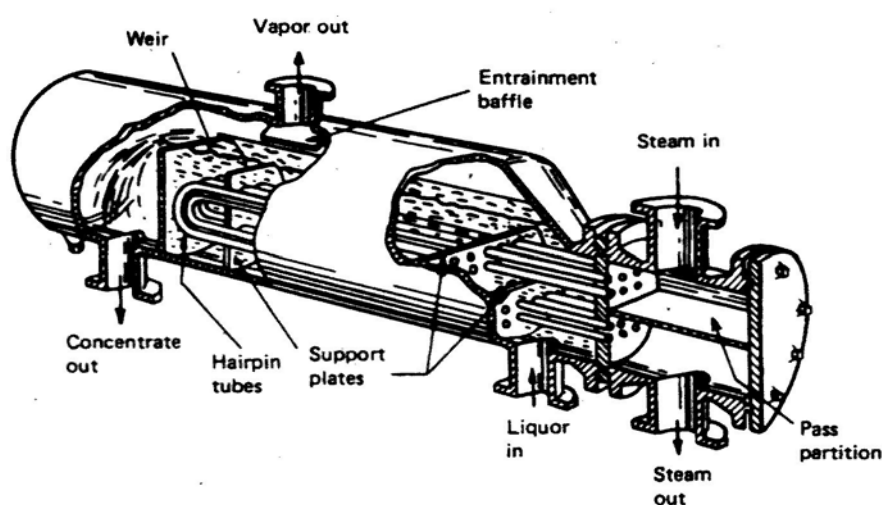


Figura 1.7 Figura de un Reboiler o generador de vapor tipo Kettle.

En la Figura 1.8 se muestra el esquema de como sería la instalación de un generador de vapor en una máquina de absorción de amoníaco/agua.

Existen dentro de los generadores de tipo inundado, los generadores de vapor internos, que consisten en un haz de tubos encastrado directamente en el fondo de la columna de destilación, lo que los hace más económicos que los generadores tipo kettle, al ahorrar costes de la carcasa, aunque para aquellos diseños en los que se requieran diferencias de temperatura pequeñas, las necesidades de área de intercambio del haz de tubos hace que sea imposible situarlos en la carcasa de la columna de destilación.

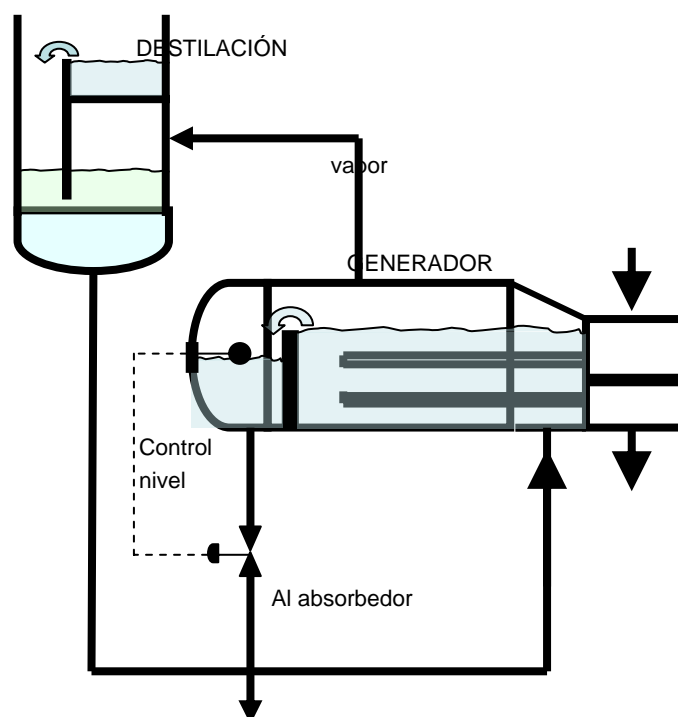


Figura 1.8 Esquema de un generador de vapor en una instalación de amoníaco/agua.

1.4.2. Generadores de flujo forzado de tubos y carcasa

En cuanto a los generadores de flujo forzado, los más comunes son aquellos donde la recirculación del fluido se hace por medio de termosifón. El interés de un intercambiador de flujo forzado como generador en máquinas de absorción surge cuando se requieren diferencias de temperatura pequeñas entre el fluido de calentamiento y el fluido en ebullición. Son por tanto adecuados para utilizarlos con mezclas binarias con una diferencia de temperaturas de ebullición grande, como es el caso de la mezcla amoníaco/agua. En el diseño de este tipo de intercambiadores debe tenerse en cuenta las características de las conexiones de salida del intercambiador, porque son propensos a inestabilidades y bajos ratios de recirculación si han sido mal diseñados.

A pesar de que este tipo de generadores serían más adecuados a la mezcla amoníaco/agua no es habitual el uso de termosifones en los equipos de absorción. El principal inconveniente de un diseño termosifón para este tipo de equipos es que requiere conocer las características hidrodinámicas y de transferencia de calor en ebullición y un mal diseño compromete a toda la instalación

Los generadores de vapor horizontales por termosifón se caracterizan por tener la ebullición en el lado de carcasa. Además, si el diseño de este tipo de generadores es bueno, se pueden obtener ratios de circulación elevados, lo que redundaría en altas eficiencias en el intercambio de calor, y un mejor comportamiento a los problemas de ensuciamiento. Debido a la dependencia de las características hidrodinámicas la conexión de salida a la torre de destilación debe de ser diseñada con mucho cuidado, pues conexiones pequeñas pueden producir inestabilidades, y diámetros grandes provocan una separación de fases. La separación de fases es problemática para mezclas con altas diferencias de temperatura pues el componente pesado se tiende a acumular en el generador, aumentando la temperatura de ebullición.

En los generadores de vapor verticales por termosifón puede producirse la ebullición tanto en la parte de carcasa o en el interior de los tubos, siendo más común en el interior de los tubos. El parámetro crítico en el diseño es el diámetro del tubo. Con un buen diseño las posibilidades de que aparezca ensuciamiento son menores aunque en el caso de que la ebullición se produzca en el lado de tubos, la limpieza del mismo se hace más fácil. Existe la posibilidad también de establecer el flujo forzado por medio de una bomba. El uso de una bomba de recirculación aumenta los costes de la instalación por lo que este tipo de configuración sólo se encuentra justificada para flujos muy viscosos o en el caso de que el riesgo de ensuciamiento sea alto.

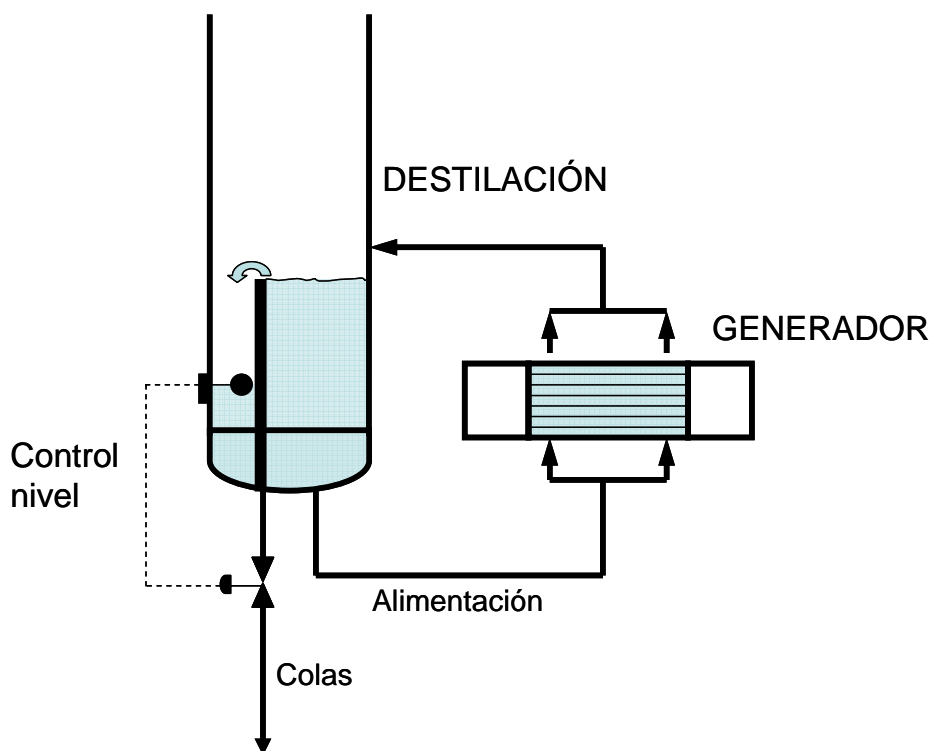


Figura 1.9 Generador de vapor horizontal en termosifón.

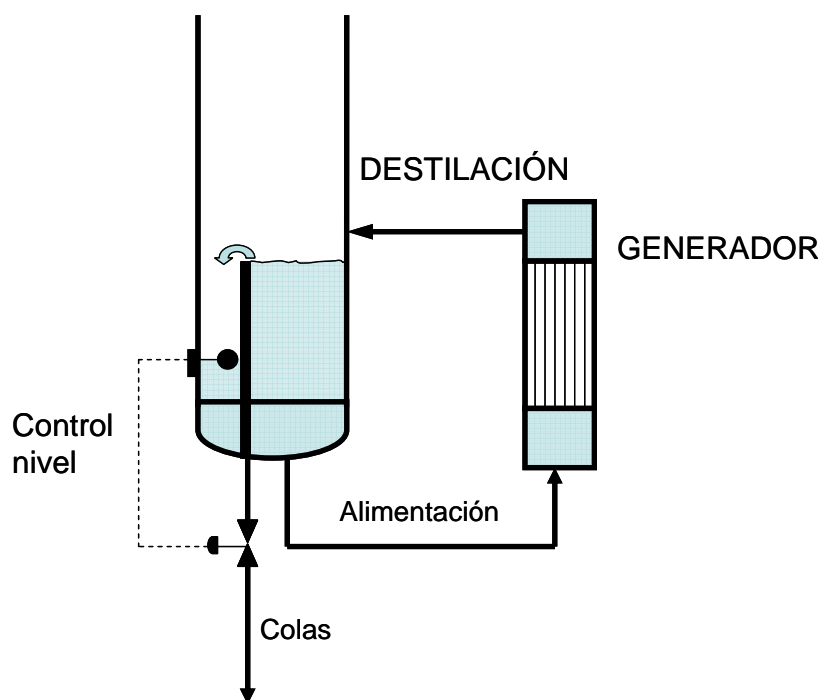


Figura 1.10 Generador de vapor vertical en termosifón.

1.4.3. Generadores de película descendente de tubos y carcasa

Al igual que los generadores de flujo forzado, pueden ser horizontales produciéndose la ebullición en el lado de carcasa, o de tipo vertical, con la película en el exterior o el interior de los tubos.

Este tipo de generadores se suelen utilizar cuando los gradientes de temperatura disponibles sean pequeños, pues siguen obteniendo coeficientes de ebullición altos. Los más comunes tienen la evaporación en el interior de los tubos con el líquido introducido en la parte superior y cayendo por gravedad con una delgada película bajando en el interior de los tubos. La principal desventaja de producir el vapor en el interior de los tubos es que necesitan diámetros de tubo mayores haciendo este tipo de unidades más grandes. Es posible que el vapor fluya en sentido contrario, aunque lo más normal es que se recojan tanto el líquido como el vapor en la parte inferior.

Los generadores de película descendente con la ebullición en el lado de la carcasa también se suelen utilizar, teniendo como ventaja principal el evitar la posible inundación del intercambiador, aunque es más difícil conseguir una buena distribución de la película en los tubos. Estos generadores adolecen de los mismos problemas que los generadores de película descendente con ebullición en el lado de los tubos, y es que necesita una bomba para poder operar.

La principal ventaja de este tipo de generadores es que al encontrarse estos tubos sin presión estática entre la cabeza y el fondo, no existe un efecto de aumento de la temperatura de ebullición, por lo que los hacen adecuados para condiciones de alto vacío, aunque no es el caso de la mezcla amoniaco/agua. Este tipo de configuraciones quizás son la mejor solución para mezclas con diferencias de temperatura de saturación grandes, y adecuadas en el caso de que se tengan condiciones de vacío, como es el caso de la mezcla agua/bromuro de litio, donde es posible encontrar este tipo de configuraciones.

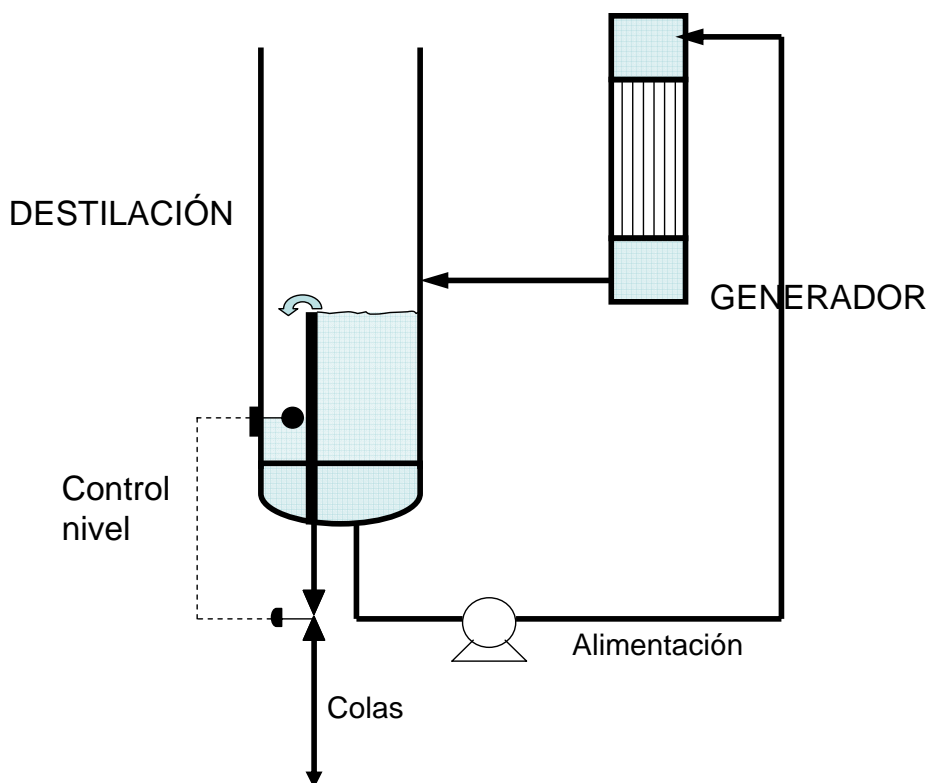


Figura 1.11 Generador de vapor tipo película descendente con ebullición en el interior de los tubos.

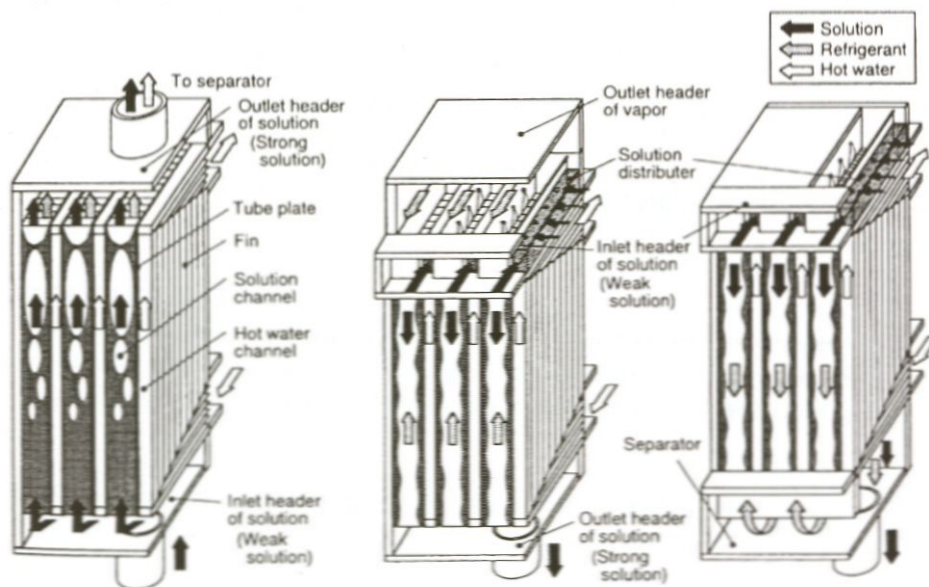
1.4.4. Intercambiadores compactos como generadores de equipos de absorción

Frente a los intercambiadores de calor convencionales de tubos y carcasa como generadores de equipos de absorción, en los últimos años se ha planteado el uso de intercambiadores compactos, aunque son relativamente escasos los trabajos de investigación al respecto.

Shitara y Nishiyama (1995) hicieron el estudio del comportamiento de intercambiadores compactos con aleteado serrado y aleteado plano, donde se estudiaron las configuraciones más efectivas en el intercambio de calor. Las configuraciones estudiadas fueron, a) Flujo de solución y vapor hacia arriba b) película descendente con el flujo de solución hacia abajo y flujo de vapor hacia arriba, y por último c) película descendente, donde el flujo de vapor y el flujo de solución fluyen en la misma dirección hacia abajo.

a) Sentido único hacia arriba de solución y vapor.

En esta configuración encontraron que el serrado de las aletas incrementaba el coeficiente de transferencia de calor en un 50 % mientras que las aletas planas tenían por contra menores pérdidas de carga. En cuanto a los coeficientes de transferencia de calor observaron que los coeficientes de transferencia de calor dependían de la posición en el intercambiador. En la parte baja del generador se generaba vapor inmediatamente cuando entra la solución y se observaban coeficientes de transferencia de calor altos. En la parte superior del intercambiador, debido a la cantidad de vapor generada, se manifestaba una pérdida de área de transferencia de calor, de forma que el coeficiente de transferencia de calor disminuía.



a) Flujo a través

b) película descendente 1

c) película descendente 2

Figura 1.12 Configuraciones de los intercambiadores compactos ensayados.

b) Flujo hacia abajo de la solución, y flujo de vapor hacia arriba

La mayor problemática encontrada por estos autores con este tipo de configuración es la inundación de los canales para generaciones de vapor altas, por lo que no la recomendaban.

c) Flujo de vapor y flujo de solución hacia abajo

En este caso, los autores no encontraron limitaciones en la operación del mismo

Tanto para la configuración b) como para la configuración c), las dos de película descendente, la cantidad de vapor influenciaba en gran medida los coeficientes de transferencia de calor, lo que refleja una predominancia de la ebullición convectiva. En el primer caso, donde el flujo de solución y el flujo de vapor circulan en el mismo sentido hacia arriba los coeficientes de transferencia de calor eran proporcionales al cuadrado de la diferencia de temperaturas, reflejando efectos de nucleación en los experimentos.

Las conclusiones que se pueden obtener de estos trabajos es que las únicas posibilidades que no tienen limitaciones fluidodinámicas, son aquellas donde el flujo de solución como el vapor se encuentran en el mismo sentido. En cuanto a la posibilidad de que tanto el flujo de solución como el vapor fluyan hacia arriba, los intercambiadores podían ser más compactos, y el efecto del tipo de aletas mejoraba en gran medida los coeficientes de transferencia de calor, como principal inconveniente encontraron que los coeficientes de transferencia de calor se veían influenciados por el gradiente de temperaturas. El principal inconveniente de la configuración c) donde el flujo es en película descendente con el fluido y el vapor en el mismo sentido hacia abajo, es la necesidad de utilizar una bomba para poder recircular la solución.

Posteriormente Roriz et al. (2004) estudiaron intercambiadores de calor de tubos y carcasa e intercambiadores de placas como generadores de equipos de absorción con la mezcla amoniaco/agua. Los intercambiadores de placas ensayados en el dispositivo eran de tipo termosifón. La configuración propuesta responde al siguiente esquema de la instalación de la Figura 1.13, proponiendo un intercambiador de placas donde la salida de las dos fases del intercambiador se llevase a un sistema de separación flash, y los vapores se encontraban en contracorriente con la concentración proveniente del absorbedor por medio de una columna en

spray. En este trabajo se manifiesta la imposibilidad de comparar los dos intercambiadores ensayados (convencional de tubos y carcasa e intercambiador de placas), pues observaron que el uso de los intercambiadores de placas generaba diferentes condiciones de trabajo en el resto de los dispositivos del prototipo. De todas formas, en el análisis del COP de la instalación encontraron que eran similares, algo que demuestra que en ningún momento el uso de intercambiadores de placas afecta al rendimiento del ciclo global, aunque sorprende que no hubiesen planteado la reducción de volumen de la instalación.

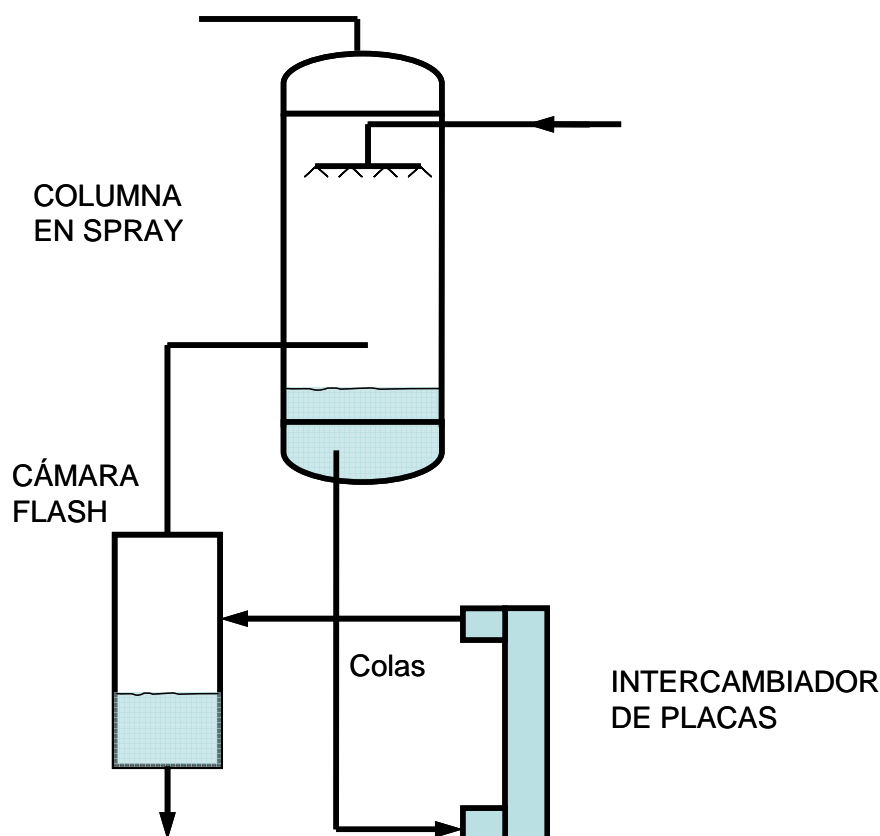


Figura 1.13 Configuración propuesta por Roriz et al. (2004) para una máquina de absorción de amoníaco/agua con un intercambiador de placas como generador.

1.4.5. Ebullición forzada de la mezcla amoníaco/agua en intercambiadores de placas

En el anterior apartado se ha mostrado que los intercambiadores de placas se han instalado con éxito como generadores de equipos de absorción de amoníaco/agua. Contrariamente al buen comportamiento de los intercambiadores de placas en máquinas de absorción, no existen datos experimentales acerca de la ebullición de amoníaco/agua en este tipo de intercambiadores.

En realidad, el estudio bibliográfico realizado en el desarrollo de esta tesis ha puesto de manifiesto que existen pocos datos experimentales de ebullición de esta mezcla, ya sea en recintos cerrados o ebullición forzada en tubos. En ebullición nucleada se han encontrado tres trabajos realizados por el mismo grupo investigador, que corresponden a los trabajos de Inoue et al. (2002a), Inoue et al. (2002b), Arima et al. (2003). En estos trabajos se manifiesta que no existe una correlación que sea capaz de predecir el comportamiento de la mezcla en ebullición nucleada.

Para el caso de ebullición en flujo forzado de la mezcla amoniaco/agua, en la bibliografía abierta sólo se han encontrado los estudios de Rivera y Best (1999) y los trabajos de Khir et al. (2005a) y Khir et al. (2005b). Todos estos datos experimentales de ebullición de la mezcla se han obtenido en flujo forzado para tubos lisos en posición vertical, donde el sentido de circulación del vapor generado y el sentido del flujo son los mismos. Las condiciones experimentales de estos estudios son muy dispares, haciendo difícil su síntesis

La poca cantidad de información referente a procesos de ebullición en intercambiadores de placas con la mezcla amoniaco/agua, ha obligado a extender la revisión bibliográfica a otros fluidos. En cuanto a la ebullición de mezclas binarias en intercambiadores de placas, los estudios encontrados hasta ahora se basan principalmente en ebullición de mezclas binarias de refrigerantes que se caracterizan por tener “glide” de unas décimas de grado, (como el R410A (Hsieh y Lin (2002)), no suficientes como para considerar el fluido como una mezcla. A pesar de que es un campo en el que poco a poco van apareciendo nuevas investigaciones, muchos autores manifiestan la inexistencia de una base de datos de ebullición en este tipo de intercambiadores que permita el desarrollo de modelos de cálculo de coeficientes de transferencia de calor incluso para fluidos puros. La revisión bibliográfica de ebullición ha reflejado que las tendencias a la hora de correlacionar los datos de ebullición en intercambiadores de placas difieren mucho entre las distintas fuentes consultadas. Las distintas publicaciones analizadas consideran para correlacionar los datos de ebullición tanto correlaciones de ebullición nucleada (Claesson (2004)), como correlaciones de ebullición forzada en tubos lisos (Hsieh y Lin (2003)), correlaciones diseñadas para canales estrechos (Claesson (2004)) , o incluso correlaciones específicas para intercambiadores de placas (Yan y Lin (1999), Donowski y Kandlikar (2000), Hsieh y Lin (2002), Sterner y Sunden (2006), Han et al. (2003)).

1.5. Objetivo

La preocupación de la Unión Europea por la reducción de emisiones de CO₂ ha provocado un nuevo interés por las máquinas de absorción. El desarrollo de máquinas de absorción con la mezcla amoniaco/agua puede tomar un nuevo impulso en su desarrollo, como equipos de pequeña potencia capaces de aprovechar calor residual o energía solar térmica. Los intercambiadores compactos pueden ayudar a favorecer el desarrollo de estos equipos si llegan a introducirse en los generadores de estos equipos, pues este tipo de intercambiadores serían capaces de reducir al máximo las temperaturas de las fuentes de calor. Dentro de los intercambiadores compactos, se ha visto que probablemente los intercambiadores de placas son idóneos para el uso como generadores, debido principalmente a su coste de adquisición en comparación con otras soluciones.

Los nuevos desarrollos de intercambiadores de placas, como los de placas termosoldadas, están en sintonía con las dos necesidades apuntadas de los equipos de absorción: intensificación de los procesos y excelente eficiencia térmica. Así ya en la actualidad los fabricantes de equipos de absorción incorporan en la mayoría de nuevos diseños de NH₃-H₂O intercambiadores de placas tanto para el evaporador como el condensador, aprovechando de esta forma la experiencia adquirida en los equipos de refrigeración de compresión mecánica de amoniaco. Sin embargo, debido al desconocimiento sobre los métodos de cálculo, la utilización de intercambiadores compactos no se ha extendido a los otros componentes más importantes del ciclo de absorción: absorbedor y generador.

En este contexto, en el período 2002-06 se ha desarrollado en CREVER el proyecto de investigación coordinado titulado “*Desarrollo de componentes avanzados para el diseño y fabricación de máquinas de refrigeración por absorción con NH₃-H₂O de pequeña potencia y*

activación térmica a baja temperatura” financiado por el Plan Nacional de I&D, dentro del Programa de Diseño y Producción Industrial (Ref. DPI 2002-04536-01). El objetivo principal de este proyecto ha sido contribuir al desarrollo de equipos de absorción de amoníaco/agua capaces de aprovechar fuentes de calor residual o energía solar térmica. En este proyecto, en el que intervino también la Universidad de Vigo, se estudió de forma teórica y experimental los procesos de transferencia de calor y masa en los componentes claves de un equipo de absorción (absorbedor, generador, rectificador y columna de destilación) utilizando en todos los casos intercambiadores de calor compactos o superficies de intercambio avanzadas

El objetivo de esta tesis doctoral es estudiar el proceso de ebullición forzada de la mezcla amoníaco/agua, en un canal de un intercambiador de placas en las condiciones de operación típicas de los generadores de equipos de absorción de amoníaco/agua, capaces de operar con calor residual o energía solar térmica. Para ello se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Revisión bibliográfica de estudios de transferencia de calor en flujo forzado en intercambiadores de placas para fluidos tanto en simple fase como en ebullición.
- Recopilación y análisis crítico de datos experimentales bibliográficos de ebullición de los fluidos puros agua y amoníaco y de la mezcla amoníaco/agua, tanto en ebullición en recintos cerrados como en ebullición forzada en tubos.
- Diseño y construcción de un dispositivo experimental para la obtención de datos experimentales de ebullición forzada en un canal de un intercambiador de placas con la mezcla amoníaco/agua en las condiciones de operación de un generador de un equipo de absorción.
- Estudio experimental del proceso de ebullición forzada de la mezcla amoníaco/agua en un canal de un intercambiador de placas, en las condiciones de operación de un generador de un equipo de absorción de amoníaco/agua y estudio del efecto en los coeficientes de transferencia de calor del flujo másico en el intercambiador, flujo de calor, presión y concentración de la mezcla.
- Análisis de las correlaciones de ebullición en recintos cerrados, ebullición forzada en tubos y ebullición forzada en intercambiadores de placas propuestas en la bibliografía, aplicadas a los datos experimentales de ebullición de la mezcla amoníaco/agua obtenidos en el intercambiador de placas ensayado.
- Estudio de propuestas de modelos de correlaciones aplicados a los datos experimentales de ebullición de la mezcla amoníaco/agua obtenidos.
- Propuesta de correlación para el cálculo de coeficientes de ebullición en el intercambiador de placas a partir de los datos experimentales.

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