



**UNIVERSITAT
ROVIRA I VIRGILI**

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA QUÍMICA

**DESARROLLO DE UNA BOMBA DE CALOR DE ABSORCIÓN
A GAS CON FLUIDOS ORGÁNICOS E INTERCAMBIADORES
DE PLACAS**

Memoria presentada por

Miquel Nogués Aymamí

para optar al grado de

Doctor en Ingeniería Química

Tarragona, mayo de 2001

A tota la meva família i amics

AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento al Dr. Alberto Coronas Salcedo por la confianza depositada en mi persona para la realización del presente trabajo, así como por la dirección de esta tesis.

Mi gratitud también para las empresas colaboradoras y de forma especial al Sr. Fernando Rodríguez y Sr. Antonio Villanova de Alfa Laval, al Sr. Pedro Gil y Jose A. Orantes de Pedro Gil SA, al Sr. José M^a Faro de Clariant Ibérica SA y a los Sr. Josep Sahún, Sr. Antoni Julià y Sr. Manuel Soriano de Gas Natural S.D.G. SA, que sin su apoyo técnico y material no hubiera sido posible realizar este desarrollo.

Al Dr. Juan Bassols, de la empresa Colibri B.V. (Holanda), por su colaboración y ayuda en el desarrollo del banco de ensayos.

Mi reconocimiento también al Sr. David Diestre de la empresa Controlmatic Ibérica SA (Grupo Siemens) por su apoyo técnico durante la puesta en marcha de nuestro sistema de control y adquisición de datos.

A los Dr. José M^a López González, Dr. Manel Vallès y Sr. Rafael Márquez por su valiosa colaboración en la construcción y puesta a punto del equipo experimental. También quiero agradecer las aportaciones desinteresadas de mis compañeros Albert Conesa, Marc Medrano y Álvaro Mestra y del resto de miembros del Centro de Innovación Tecnológica CREVER.

A todos los miembros del Departamento de Ingeniería Mecánica por su calurosa acogida durante todo este tiempo, y muy especialmente a Dr. Francesc Ferrando y Sr. Vicenç Puig.

A Sres. Jaume Sariol, Jordi Salcedo, Carlos Castillo y Jordi Fabregat, que como estudiantes de ingeniería, colaboraron en la etapa de puesta en marcha y de experimentación del banco de ensayos.

Finalmente al departamento de Ingeniería Mecánica de la Universitat Rovira i Virgili por la concesión de una beca de investigación, gracias a la cual he podido realizar este trabajo.

RESUMEN

El crecimiento de la demanda eléctrica en Cataluña entre 1986 y 1999 ha sido alrededor de un 70% y se prevé para el año 2010 que dicha demanda sea un 43% superior a la actual. Incrementos similares en otras comunidades pueden provocar un colapso en el sistema eléctrico español.

A pesar de que el crecimiento del consumo energético se debe principalmente al incremento de la capacidad productiva de nuestro país, cada vez es más significativo el efecto de la proliferación de equipos de climatización eléctricos en el computo global de dicha demanda. Actualmente, y aún siendo el sector de la climatización un mercado emergente en nuestro territorio, ya se considera que el 12% de la demanda eléctrica está destinada a la climatización de edificios y viviendas y es la principal causante de los picos de demanda anuales situados en los meses de julio y diciembre.

Ante tal situación, y con las grandes perspectivas de expansión del mercado del aire acondicionado en nuestro país, en esta tesis se propone desarrollar un equipo de climatización que permita contribuir a satisfacer las necesidades térmicas en el sector residencial y pequeño comercio. Para ello, se propone un equipo de absorción que puede funcionar como bomba de calor en invierno con una potencia nominal de 24.5 kW y como equipo de refrigeración en verano con 20 kW de potencia frigorífica. En ambos casos, el consumo eléctrico previsto será inferior a 2 kW, ya que la energía de activación es térmica a temperaturas de 120-150°C, pudiéndose utilizar tanto el calor procedente de la combustión o bien de energía solar.

Los equipos de absorción convencionales presentan ciertas limitaciones derivadas de los fluidos que utilizan (cristalización y corrosión en el caso del Agua-Bromuro de Litio, y presiones elevadas y rectificación para el Amoniaco-Agua). En este trabajo, se ha adoptado la mezcla de fluidos orgánicos Metanol-Tetraetilenglicol-dimetiléter para solventar dichas limitaciones. Esta mezcla se caracteriza por ser completamente miscible, ser compatible con la mayor parte de materiales utilizados actualmente en los equipos de aire acondicionado y presentar una buena estabilidad térmica y química a las temperaturas de operación previstas.

El equipo desarrollado opera en modo refrigeración bajo un ciclo de absorción-compresión de doble efecto, con un COP>1.2, mientras que en modo calefacción se convierte en un ciclo de simple efecto con un COP>1.4. En ambos casos, se ha incorporado una etapa de compresión con el fin de aumentar el intervalo de temperaturas de operación. De esta forma, no es necesario el uso de torres de refrigeración, pudiéndose utilizar aerorefrigeradores en su lugar.

La utilización de intercambiadores de placas ha permitido contar con unas superficies de intercambio de calor elevadas, en un reducido volumen. Como resultado, el equipo presenta una baja inercia térmica y un tamaño aceptable.

El equipo se ha experimentado en un banco de ensayos, construido a tal efecto, sometiéndose a las condiciones de operación previstas. Los resultados obtenidos confirman el buen comportamiento del equipo y del sistema de control adoptado.

ÍNDICE

Capítulo 1: Situación tecnológica de los equipos de climatización

1.1 - INTRODUCCIÓN	1-1
1.2 - PROBLEMÁTICA ACTUAL	1-2
1.3 - PROGRAMAS DE INNOVACIÓN EN CLIMATIZACIÓN	1-4
1.4 - INTERÉS DE LA CLIMATIZACIÓN A GAS	1-5
1.5 - TECNOLOGÍA DE CLIMATIZACIÓN CON MOTOR A GAS	1-6
1.5.1 - PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	1-7
1.5.2 - MERCADO DE LOS CLIMATIZADORES CON MOTOR A GAS.....	1-9
1.5.3 - TENDENCIAS FUTURAS EN LA CLIMATIZACIÓN CON MOTOR A GAS.....	1-11
1.6 - TECNOLOGÍA DE LOS EQUIPOS DE ABSORCIÓN	1-12
1.6.1 - PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	1-13
1.6.2 - CICLO DE ABSORCIÓN DE ALTA EFICIENCIA. DOBLE EFECTO.....	1-15
1.6.3 - MEZCLAS DE TRABAJO EN LOS EQUIPOS DE ABSORCIÓN	1-16
1.6.4 - MERCADO DE LOS EQUIPOS DE ABSORCIÓN.....	1-17
1.6.5 - TENDENCIAS FUTURAS EN LOS EQUIPOS DE ABSORCIÓN.....	1-19
1.7 - OBJETIVOS DE LA TESIS	1-21

Capítulo 2: Configuración del ciclo de absorción

2.1 - JUSTIFICACIÓN DE LA MEZCLA DE TRABAJO SELECCIONADA	2-1
2.2 - PROPIEDADES DE LA MEZCLA	2-4
2.3 - OPERACIÓN EN MODO CALEFACCIÓN	2-5
2.3.1 - CONSIDERACIONES PRELIMINARES.....	2-5
2.3.2 - DESCRIPCIÓN DEL CICLO ABSORCIÓN/COMPRESIÓN PROPUESTO.....	2-6
2.3.3 - HIPÓTESIS DE CÁLCULO Y VARIABLES INDEPENDIENTES	2-8
2.3.4 - DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL SIMPLE EFECTO.....	2-9
2.3.5 - RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA LA CONFIGURACIÓN DE SIMPLE EFECTO.....	2-11
2.4 - OPERACIÓN EN MODO REFRIGERACIÓN	2-17
2.4.1 - CONSIDERACIONES PRELIMINARES.....	2-17
2.4.2 - CONFIGURACIONES DEL CIRCUITO SOLUCIÓN EN CICLOS DE ABSORCIÓN DE DOBLE EFECTO.....	2-17
2.4.3 - HIPÓTESIS Y VARIABLES INDEPENDIENTES.....	2-21
2.4.4 - DESCRIPCIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL DOBLE EFECTO.....	2-23
2.4.5 - RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN PARA LAS DIFERENTES CONFIGURACIONES.....	2-25

2.5 - PROPUESTA DE LA CONFIGURACIÓN DEL CICLO.....	2-30
2.6 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL PROTOTIPO.....	2-31

Capítulo 3: Cálculo y diseño de los componentes del prototipo

3.1 - CONSIDERACIONES PRELIMINARES	3-1
3.2 - CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	3-4
3.3 - CÁLCULO DE LAS CONDICIONES INTERNAS DE FUNCIONAMIENTO	3-5
3.4 - CÁLCULO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	3-6
3.4.1 - ABSORBEDOR (AB).....	3-6
3.4.2 - CONDENSADOR DE BAJA (C2).....	3-9
3.4.3 - EVAPORADOR (E).....	3-10
3.4.4 - GENERADOR DE ALTA (G1).....	3-12
3.4.5 - GENERADOR DE BAJA (G2)	3-13
3.4.6 - INTERCAMBIADORES SOLUCIÓN-SOLUCIÓN (IC1 Y IC2)	3-14
3.5 - SELECCIÓN DEL COMPRESOR.....	3-16
3.6 - SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES AUXILIARES	3-17
3.6.1 - BOMBAS DE RECIRCULACIÓN.....	3-17
3.6.2 - BOMBA DE PURGA	3-18
3.6.3 - PURGADOR DE CONDENSABLES	3-18
3.6.4 - BOQUILLAS DE ASPERSIÓN.....	3-19
3.6.5 - SEPARADORES DE GOTAS.....	3-20
3.6.6 - VÁLVULA DE REGULACIÓN DE CAUDAL.....	3-22
3.7 - DISPOSICIÓN ESPACIAL DE LOS COMPONENTES DEL PROTOTIPO.....	3-23

Capítulo 4: Sistema de control del prototipo

4.1 – INTRODUCCIÓN.....	4-1
4.2 – LAZOS DE CONTROL ESTABLECIDOS.....	4-1
4.2.1 – ESTRATEGIA DE CONTROL EN MODO CALEFACCIÓN	4-3
4.2.2 – ESTRATEGIA DE CONTROL EN MODO REFRIGERACIÓN	4-5
4.3 – INSTRUMENTACIÓN.....	4-6
4.4 – ESQUEMA DEL CUADRO ELÉCTRICO DEL PROTOTIPO	4-7
4.5 – COMPORTAMIENTO DINÁMICO DEL EQUIPO.....	4-10
4.5.1 – COMPORTAMIENTO DEL CONTROL DE LOS NIVELES.....	4-10
4.5.2 – COMPORTAMIENTO DEL PROTOTIPO ANTE PERTURBACIONES EXTERIORES	4-12

Capítulo 5: Normativa, medidas y caracterización de equipos de absorción en un banco de ensayos

5.1 - PRESENTACIÓN.....	5-1
5.2 - NORMATIVA DE ANÁLISIS: NORMA ARI-560-92.....	5-2
5.2.1 - INTRODUCCIÓN	5-2
5.2.2 - ESPECIFICACIONES DE EVALUACIÓN.....	5-3
5.3 - BANCO DE ENSAYOS.....	5-8
5.3.1 - INTRODUCCIÓN	5-8
5.3.2 - DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYOS	5-9
5.3.3 - ADAPTABILIDAD A LAS CONDICIONES DE ENSAYO	5-13
5.4 - INSTRUMENTACIÓN INSTALADA.....	5-16
5.4.1 - SONDAS DE TEMPERATURA	5-16
5.4.2 - MEDIDORES DE CAUDAL.....	5-16
5.4.3 - PÉRDIDAS DE CARGA	5-17
5.4.4 - DEMANDA ELÉCTRICA	5-17
5.5 - PUESTA A PUNTO DEL BANCO DE ENSAYOS	5-18
5.5.1 - CONSIDERACIONES PRELIMINARES	5-18
5.5.2 - DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	5-19
5.5.3 - PRESTACIONES TÉRMICAS DEL EQUIPO YAZAKI WFC-10.....	5-20
5.6 - EXPERIMENTACIÓN CON EL EQUIPO YAZAKI WFC-10.....	5-21
5.6.1 - EVALUACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LOS REGULADORES.....	5-21
5.6.2 - EVALUACIÓN DE PRESTACIONES TÉRMICAS DE LA YAZAKI WFC-10	5-24
5.6.3 - COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA YAZAKI WFC-10	5-32

Capítulo 6: Experimentación con el prototipo

6.1 – INTRODUCCIÓN	6-1
6.2 – MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA	6-1
6.3 – ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LOS COMPONENTES	6-4
6.3.1 – ABSORBEDOR.....	6-4
6.3.2 – CONDENSADOR	6-5
6.3.3 – EVAPORADOR	6-5
6.3.4 – GENERADOR DE ALTA Y GENERADOR DE BAJA.....	6-7
6.3.5 – INTERCAMBIADORES DE SOLUCIÓN-SOLUCIÓN	6-7
6.3.6 – COMPRESOR.....	6-8
6.3.7 – BOMBAS DE RECIRCULACIÓN	6-11
6.4 – RESULTADOS EN MODO CALEFACCIÓN	6-12
6.5 – RESULTADOS EN MODO REFRIGERACIÓN	6-15
6.5.1 – OPERACIÓN EN CONDICIONES DE DISEÑO.....	6-16
6.5.2 – EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DE TRABAJO DEL ABSORBEDOR.....	6-20
6.5.3 – PROTOTIPO A PLENA CARGA	6-26

Capítulo 7: Conclusiones y perspectivas

7.1 - CONCLUSIONES	7-1
7.1.1 - CONCLUSIONES DEL BANCO DE ENSAYOS.....	7-1
7.1.2 - CONCLUSIONES DEL PROTOTIPO	7-1
7.2 - PERSPECTIVAS	7-4
7.2.1 - PERSPECTIVAS DEL BANCO DE ENSAYOS	7-4
7.2.2 - PERSPECTIVAS DEL PROTOTIPO.....	7-4

Anexo A: Bibliografía

Anexo B: Propiedades termofísicas de los fluidos de trabajo

Anexo C: Estimación de las condiciones de operación

C1 - INTRODUCCIÓN.....	C-1
C2 - PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	C-3

Anexo D: Instrumentación del prototipo

D1 – PRESENTACIÓN	D-1
D2 .- TRANSMISORES DE PRESIÓN.....	D-1
D2.1 - CALIBRACIÓN.....	D-1
D3 - SONDAS DE TEMPERATURA INSTALADAS.....	D-3
D4. MEDIDORES DE NIVEL.....	D-3

Nomenclatura

A	Área de intercambio de calor (m^2)
AB	Absorbedor
APLV	Coefficiente de funcionamiento a carga parcial
B	Bomba
C	Condensador
C1	Condensador de alta
C2	Condensador de baja
Comp	Compresor
COP	Coefficiente de funcionamiento
c_p	Calor específico a presión constante ($kJ/kg \cdot K$)
C_D	Coefficiente de arrastre
C_d	Coefficiente de derrame
CFC	Clorofluorocarbonos
D	Diámetros
E	Evaporador
E_f	Eficacia
F	Fuerza (N)
FL	Potencia térmica a plena carga
g	Constante universal de la gravedad (m/s^2)
G1	Generador de alta
G2	Generador de baja
h	Entalpía específica (kJ/kg)
HB	Error en tanto por cien en el balance energético
IC1	Intercambiador de solución-solución de alta
IC2	Intercambiador de solución-solución de baja
m	Caudal másico (kg/s)
P	Presión (kPa)
PCS	Poder calorífico superior (kJ/kg)
PER	Ratio de consumo de energía primaria
PR	Relación de compresión
Q	Caudal volumétrico (m^3/s)
q	Potencia calorífica (kW)
R	Resistencia óhmica (Ω)
Re	Número de Reynolds
s	Variable independiente de la transformada de Laplace
SR	Relación de caudales entre solución pobre y refrigerante
T,t	Temperatura ($^{\circ}C$)
TEWI	Total Equivalent Warming Potential
U	Coefficiente global de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot K$)
V	Velocidad (m/s)
W	Fracción másica
W	Trabajo mecánico (kW)
X	Fracción molar
Z	Variable independiente de la transformada en Z

Letras griegas

a	Coefficiente de linealidad de las termoresistencias Pt100
D	Diferencia
m	Viscosidad dinámica (cP)
r	Densidad (kg/m ³)

Subíndices y Superíndices

AB	Absorbedor
C	Condensador
E	Evaporador
G	Generador
IN	Entrada
OUT	Salida
Sol-p	Solución pobre
Sol-r	Solución rica
w	Agua
R	Rectificador