



01119  
14  
Universidad Nacional Autónoma de México

---

**Facultad de Ingeniería  
División de Estudios de Posgrado**

**“Estudios teóricos y experimentales de transformadores térmicos  
por absorción y diseño optimado de absorbedores de película  
descendente”**

**Tesis Doctoral**

**Presenta**

**MES Rosenberg Javier Romero Domínguez**

**Asesor**

**Dr Roberto Best y Brown**

**mayo de 2001**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# TESIS CON FALLA DE ORIGEN

## Memorias en congresos nacionales / internacionales

1. **R. Romero**, R. Best and W. Rivera. Thermodynamic design data for an absorption system operating on an aqueous ternary hydroxide for climatization, RECLIEN 98, La Habana, Cuba, junio 4 – 8, 1998.
2. **R. J. Romero**, R. Best, J. Hernández, O. Ramírez & J. Aguillón, Thermodynamic data in a falling film absorber operating on ammonia / water solutions, Proceedings of the International Sorption Heat Pump Conference, march 24-26, München, Germany, 1999
3. W. Rivera and **R. J. Romero**, Evaluation of a Heat Transformer Powered by a Solar Pond. Proceedings of the International Materials Research Congress, aug 29 - sep 2, pp. 105, Cancún, México, 1999
4. **R. J. Romero**, W. Rivera and R. Best, Comparison of the theoretical performance of a solar air conditioning system operating with water / lithium bromide and an aqueous ternary hydroxide, Proceedings of the International materials research congress, aug 29 - sep 2, pp 110, Cancún, México, 1999
5. **R. J. Romero** & R. Best, Método indirecto para el cálculo de la concentración de amoniaco en soluciones acuosas en sistemas de refrigeración solar, XXIII Semana Nacional de Energía Solar, Octubre 4– 8, Morelia, México, 1999
6. W. Rivera y **R. J. Romero**, Evaluación Experimental de un Transformador de Calor Utilizado para Incrementar la Temperatura de un Estanque Solar, Memorias de la XXIII Semana Nacional de Energía Solar, Octubre 4– 8, pp. 639-645, Morelia, Mich., México 1999
7. I. Pilatowsky, W. Rivera and **R. J. Romero**, Thermodynamic analisis of monomethylamine – water solutions in single stage solar absorption refrigeration cycle at low generator temperature, Procc. International Materials Research Congress, pp 80, August 27 – 31, Cancun, Mexico, 2000
8. **R. J. Romero**, W. Rivera, I. Pilatowsky and R. Best, Comparison of the modeling of a solar absorption system for simultaneous cooling and heating operating with an aqueous ternary hidroxide and with water / lithium bromide, Procc. International Materials Research Congress, pp 90, August 27 – 31, Cancun, Mexico, 2000
9. I. Pilatowksy, R. Sánchez and **R. J. Romero**, Theoretical analisis of an air conditioning system, using desecant calcium chloride – water solution with solar thermal regeneration, Procc. International Materials Research Congress, pp 90, August 27 – 31, Cancun, Mexico, 2000

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<i>Energía</i>	1
<i>Consumo de energía en el sector industrial</i>	2
<i>Justificación del trabajo</i>	4
<i>Ahorro de energía</i>	4
<i>Procesos potenciales para el uso de un TTA</i>	7
<i>Condiciones favorables para un TTA</i>	8
<i>Plantas demostrativas</i>	8
<i>Objetivos principales del proyecto doctoral</i>	8
<i>Estructura de la tesis</i>	9
<i>Referencias</i>	10
<b>GENERALIDADES</b>	<b>11</b>
<i>Introducción</i>	11
<i>Conceptos generales</i>	11
<i>Clasificación de las bombas de calor</i>	11
<i>Componentes de una bomba de calor</i>	12
<i>Bomba de calor del tipo I</i>	13
<i>Descripción de los ciclos de bomba de calor del tipo I</i>	13
<i>Bomba de calor por compresión mecánica de vapor</i>	13
<i>Bomba de calor por absorción</i>	14
<i>Bomba de calor del tipo II (Transformador térmico)</i>	15
<i>Descripción del ciclo de un transformador térmico</i>	15
<i>Ciclo básico de un transformador térmico</i>	15
<i>Ciclo refinado de un transformador térmico</i>	16
<i>Sustancias usadas en las bombas de calor</i>	16
<i>Fluidos para las bombas de calor tipo I</i>	17
<i>Fluidos para las bombas de calor tipo II</i>	17
<i>Referencias</i>	18
<b>Capítulo 1.- Modelado de transformadores de calor por absorción de una etapa</b>	<b>20</b>
<i>Introducción</i>	20
<i>Modelo matemático de un transformador térmico por absorción de una etapa</i>	20

<i>Consideraciones del modelo</i>	20
<i>Conclusiones</i>	24
<i>Referencias</i>	25
<b>Capítulo 2.- Datos de diseño termodinámico teóricos para un transformador térmico por absorción de una etapa con diferentes mezclas</b>	26
<i>Introducción</i>	26
<i>Modelado por computadora</i>	26
<i>Consideraciones del programa</i>	27
<i>Inicio de programa y ejecución</i>	27
<i>Paro del programa</i>	30
<i>Fin de programa</i>	30
<i>Lectura e interpretación de los datos archivados</i>	31
<i>Mezclas que pueden ser simuladas</i>	32
<i>Mezcla bromuro de litio - agua</i>	32
<i>Mezcla bromuro de litio - etilenglicol (carrol) - agua</i>	33
<i>Mezcla bromuro de litio - etanolamina - agua</i>	33
<i>Mezcla ternaria de hidroxidos - agua</i>	33
<i>Conclusiones</i>	33
<i>Referencias</i>	34
<b>Capítulo 3.- Diseño y construcción de un transformador térmico por absorción de una etapa</b>	35
<i>Introducción</i>	35
<i>Consideraciones del diseño</i>	35
<i>Cálculo de las potencias</i>	36
<i>Diseño y construcción de los componentes principales</i>	37
<i>Generador</i>	38
<i>Evaporador</i>	44
<i>Condensador</i>	49
<i>Absorbedor</i>	55
<i>Economizador</i>	61
<i>Válvulas y tubería</i>	62
<i>Materiales y aislantes</i>	63
<i>Sistemas auxiliares</i>	64

<i>Sistema de enfriamiento</i>	64
<i>Sistema de recuperación de calor</i>	64
<i>Sistema auxiliar de vacío</i>	66
<i>Conclusiones</i>	66
<i>Referencias</i>	67
<b>Capítulo 4.- Puesta en operación de un transformador térmico por absorción de una etapa</b>	68
<i>Introducción</i>	68
<i>Instrumentación</i>	68
<i>Temperatura</i>	68
<i>Presión</i>	69
<i>Flujos</i>	69
<i>Bombas</i>	70
<i>Concentración</i>	71
<i>Potencias</i>	71
<i>Adquisición de datos</i>	72
<i>Metodología de calibración del equipo</i>	72
<i>Calibración de rotámetros</i>	72
<i>Calibración de los termopares</i>	74
<i>Calibración del flujo del sistema de recuperación de calor</i>	74
<i>Calibración de los reguladores de voltaje</i>	75
<i>Metodología de operación del equipo</i>	76
<i>Llenado del equipo</i>	76
<i>Arranque de un transformador térmico por absorción de una etapa</i>	78
<i>Operación correcta del equipo</i>	80
<i>Paro del equipo</i>	81
<i>Referencias</i>	82
<b>Capítulo 5.- Evaluación del equipo experimental</b>	83
<i>Introducción</i>	83
<i>Procedimiento experimental</i>	83
<i>Consideraciones termodinámicas</i>	84
<i>Simulación de condiciones</i>	87
<i>Resultados experimentales</i>	90

<i>Coefficientes de operación</i>	90
<i>Incremento de temperatura</i>	93
<i>Intervalos de operación del transformador térmico por absorción de una etapa operando con la mezcla carrol - agua</i>	96
<i>Relación de flujo</i>	96
<i>Potencia de evaporación</i>	96
<i>Potencia obtenida del absorbedor</i>	96
<i>Concentración de carrol en la solución acuosa del generador</i>	96
<i>Concentración de carrol en la solución acuosa del absorbedor</i>	96
<i>Diferencia de concentración entre las soluciones del generador y el absorbedor</i>	97
<i>Flujo de aceite del sistema de recuperación de calor</i>	97
<i>Temperaturas de generación</i>	97
<i>Temperaturas de absorción</i>	97
<i>Temperaturas de condensación</i>	97
<i>Temperaturas de ingreso del aceite en el sistema de recuperación de calor</i>	98
<i>Temperaturas de salida del aceite en el sistema de recuperación de calor</i>	98
<i>Incremento de temperatura del sistema de recuperación de calor</i>	98
<i>Factor de recirculación interno del absorbedor (RC)</i>	98
<i>Resumen de intervalos de operación</i>	99
<i>Correlaciones obtenidas para cada parámetro de diseño</i>	100
<i>Coefficiente de operación en función de la potencia del absorbedor</i>	100
<i>Temperatura máxima de recuperación de la energía revalorizada</i>	101
<i>Incremento de temperatura en función de la diferencia de concentraciones</i>	102
<i>Temperatura del generador en función de la concentración</i>	103
<i>Presión de absorbedor en función de la concentración en el absorbedor</i>	104
<i>Presión del absorbedor en función de la temperatura de evaporación</i>	105
<i>Concentración del absorbente en el absorbedor en función de la concentración de absorbente presente en el generador</i>	106
<i>Correlaciones de los resultados obtenidos para diseño de absorbedores</i>	107
<i>Potencia revalorizada en función de varios parámetros</i>	107
<i>Efecto de la conductividad del sistema de recuperación de calor</i>	113
<i>Comparación de resultados teóricos con experimentales</i>	115
<i>Conclusiones</i>	117



<i>Referencias</i>	118
<b>Capítulo 6.- Estudio experimental del efecto del reflujo en un transformador térmico por absorción de una etapa operando con la mezcla carrol - agua</b>	134
<i>Introducción</i>	134
<i>Descripción del sistema</i>	134
<i>Dispositivo experimental</i>	135
<i>Procedimiento experimental</i>	136
<i>Resultados</i>	137
<i>Conclusiones</i>	143
<i>Referencias</i>	144
<b>Capítulo 7.- Estudio experimental de un absorbedor con absorción en la parte interior de un tubo vertical</b>	145
<i>Introducción</i>	145
<b>Capítulo 8.- Estudio experimental de un absorbedor con absorción en la parte exterior de un tubo horizontal</b>	154
<i>Introducción</i>	154
<i>Bases de funcionamiento del sistema</i>	154
<i>Descripción del sistema</i>	157
<i>Instrumentación</i>	158
<i>Metodología de llenado, operación y paro del equipo</i>	159
<i>Llenado del evaporador - generador</i>	159
<i>Operación del equipo</i>	159
<i>Paro del equipo</i>	161
<i>Superficies utilizadas</i>	161
<i>Superficie lisa</i>	162
<i>Superficie corrugada</i>	164
<i>Superficie aletada</i>	167
<i>Superficie micro - aletada</i>	170
<i>Resultados</i>	173
<i>Conclusiones</i>	175
<i>Referencias</i>	177
<b>Capítulo 9.- Diseño optimado de absorbedores de película descendente</b>	178
<i>Introducción</i>	178
<i>Absorbedores</i>	178

<i>Estudios previos con bromuro de litio</i>	179
<i>Diseño optimado de absorbedores</i>	179
<i>Criterio de optimación</i>	180
<i>Cálculo de dimensiones</i>	181
<i>Diseño optimado de absorbedor de película descendente</i>	189
<i>Conclusiones</i>	192
<i>Referencias</i>	192
<b>Capítulo 10.- Estudio teórico del acoplamiento de un transformador térmico por absorción de una etapa a un estanque solar</b>	195
<i>Introducción</i>	195
<b>Capítulo 11.- Estudio teórico del acoplamiento de sistemas de absorción a un esquema de refinación de petróleo</b>	206
<i>Introducción</i>	206
<i>Descripción del esquema</i>	206
<i>Consideraciones del acoplamiento</i>	208
<i>Condición óptima de operación</i>	210
<i>Conclusiones</i>	211
<i>Referencias</i>	212
<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	204
<i>Conclusiones</i>	214
<i>Recomendaciones</i>	219
<b>Apéndice A.- Datos de diseño termodinámico</b>	221
<b>Apéndice B.- Imágenes de los componentes contruidos de un transformador térmico por absorción de una etapa (TTA) e interconexión de los mismos</b>	222
<b>Apéndice C.- Datos termodinámicos para el acoplamiento de transformadores térmicos por absorción de una etapa (TTA) en un esquema de refinación de petróleo</b>	224

## INTRODUCCIÓN

### *Energía*

El nuevo milenio se presenta como un enorme reto para México para proveer de energía a una sociedad que demanda un incremento en su nivel de vida provocando incrementos de consumo del orden del 5.4% anual, que crece con índices de población del orden del 1.8% al año, por lo que la población llegaría a los 130 millones de habitantes en el año 2030. La mayor parte de las necesidades energéticas es cubierta por el consumo de hidrocarburos fósiles, con sus consecuencias ambientales asociadas.

La figura I.1 muestra los porcentajes de producción de energía primaria en México, donde se tiene: Hidrocarburos 90 %, Electricidad (no termoeléctrica) 4.3 %, Carbón 2.1 %, Biomasa 3.6 %

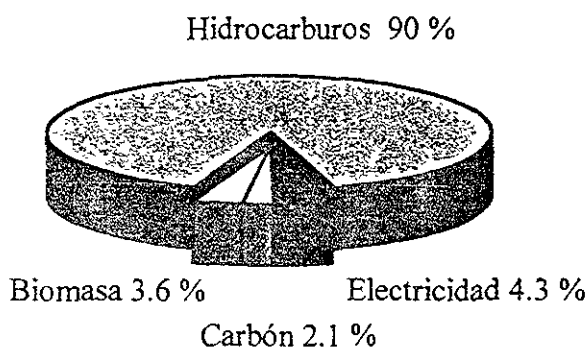


Figura I.1. Producción total de energía en México en 1998.

La dependencia casi total en los hidrocarburos es preocupante, sobre todo por ser un recurso energético no renovable. En el 6° informe de gobierno del Dr. Ernesto Zedillo Ponce de León, se reportó una relación reserva / producción, para el caso de los hidrocarburos (58 683 MMB) estimándose un valor de 38 años para la terminación de las reservas.

El consumo final de los energéticos se destinan a cuatro diferentes sectores, distribuyéndose para su consumo en los diferentes sectores, como se muestra en la figura I.2. Los sectores de mayor consumo son el sector transporte, el sector industrial y el sector residencial, comercial y de servicios.

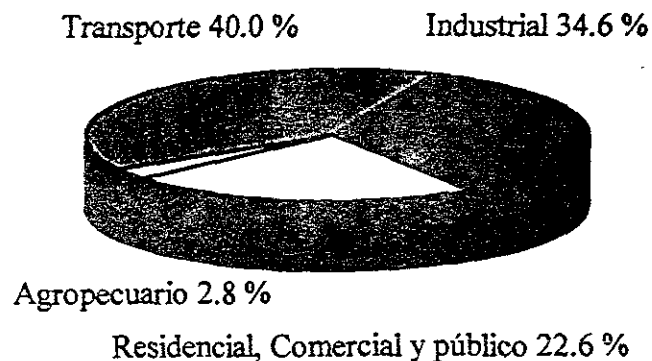


Figura I.2. Consumo final de energéticos por sectores en México en 1998

### ***Consumo de energía en el sector industrial***

El segundo mayor consumidor de energéticos, como se mencionó anteriormente en la distribución por sectores, es el sector industrial. En este sector se llevan a cabo la mayor cantidad de transformaciones de la energía de un nivel térmico a otro para poder modificar la materia prima hasta convertirla en los productos finales de consumo cotidiano. Las principales industrias consumidoras por tipo de energéticos son la industrias petroquímica, química y siderúrgica.

Es difícil tratar de englobar a todo sector industrial y clasificarlo por el tipo de energéticos que consume y en que proporción. En el caso particular de la energía eléctrica un estudio reciente de la Comisión Federal de Electricidad CFE reportó que el consumo de electricidad del sector industrial representó para 1999, poco más del 60% del consumo total de la energía eléctrica generada por la CFE y “Luz y Fuerza del Centro” (LyF). Las tasas de crecimiento del consumo eléctrico del sector industrial entre 1995 y 1999 fueron superiores al 8%, el crecimiento en el consumo eléctrico de la mediana industrial durante los últimos 4 años fue de 9%.

El índice de intensidad energética, que es la relación entre el patrón de consumo de la energía nacional comparado con el producto interno bruto, permite analizar la evolución de este parámetro en los últimos años [CONAE, 2001], como se muestra en la figura I.3, donde se muestra una disminución en los últimos años. La figura I.4 muestra en forma comparativa este índice con respecto a otros países, donde se demuestra que México es ineficiente en el uso de sus recursos energéticos, teniendo en cuenta que la gran parte de la

energía producida en México es por medio de los hidrocarburos. Se concluye que en materia de producción de gases invernadero por unidad de PIB, México está también por arriba de los países con los que tiene relaciones comerciales.

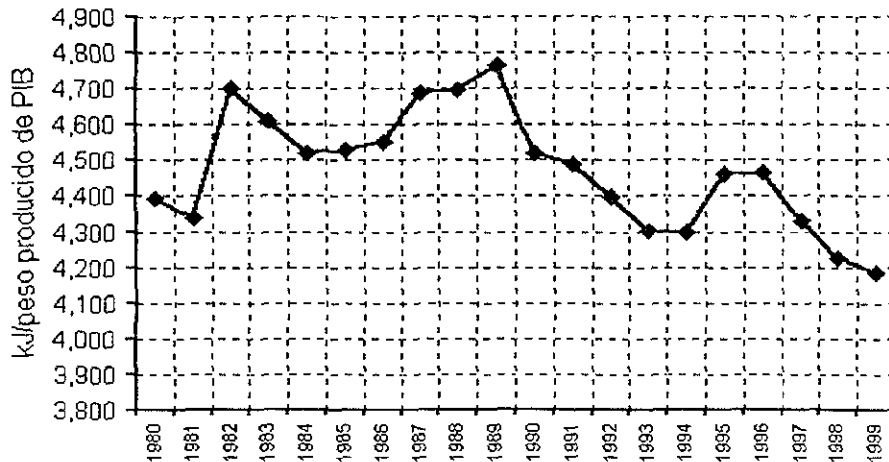


Figura I.3. Intensidad Energética Nacional de 1980 a 1999

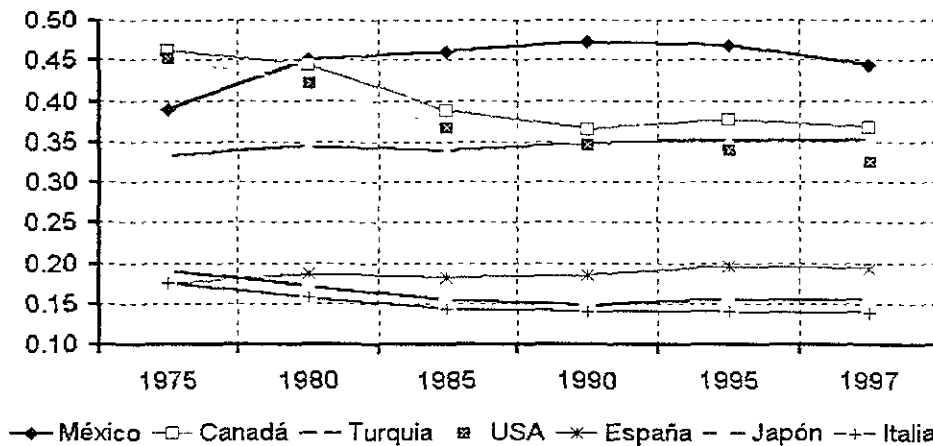


Figura I.4. Comparación del índice energético nacional con otros países en dolares.

Lo anterior se puede resumir en un consumo industrial final de energéticos, basado en  $1\ 326.6 \times 10^{15}$  J consumidos en la industria mexicana en el año 1998, 3% mayor al año 1997, con el mayor porcentaje de consumo asociado al gas natural.

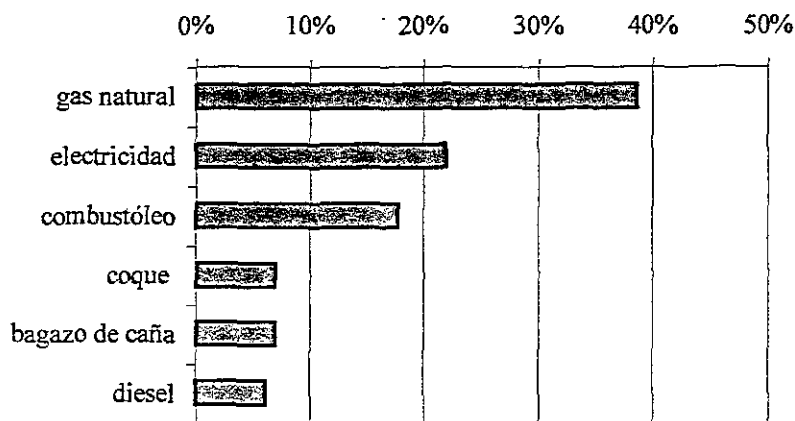


Figura I.5. Consumo nacional industrial final de energéticos porcentual

## **JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

En los procesos industriales a nivel mundial se consume diariamente una cantidad importante de energéticos. La mayor parte de ellos es utilizada para *tratamientos térmicos de productos en múltiples procesos*. Esta cantidad de energía térmica principalmente proviene de la quema de algún energético descrito en la figura I.5 y como subproducto no deseado se obtienen gases de combustión y calor de desecho a baja temperatura.

Como se descrito en la sección anterior, los energéticos no renovables no durarán eternamente y las reservas se agotarán algún día. En México se tiene una dependencia del 90% en el uso de combustibles fósiles para la satisfacción de sus crecientes necesidades energéticas, los cuales se usan ineficientemente. A medida que la sociedad se de cuenta de esta realidad, los precios de los hidrocarburos aumentarán y estas tendencias de aumento en los precios internacionales pueden ser irreversibles..

Los incrementos internacionales afectan considerablemente la economía de los países que venden y consumen petróleo, ya que al comprar sus energéticos a mayor precio, los precios de sus productos tenderán a incrementarse también.

## **Ahorro de Energía**

El fenómeno económico de alza de precios de energéticos conduce o debe de conducir a una política de uso eficiente de ellos. Considerando que los

conceptos “uso eficiente de energía” y “ahorro de energía” se basan en la investigación y modificación de equipos de transformación de energía para lograr que operen a condiciones óptimas en función de la energía provista a ellos, se han propuesto varias acciones para usar eficientemente los recursos energéticos en varios sectores.

Para usar eficientemente los recursos energéticos se han implementado varias acciones:

En el sector energético (producción de energéticos primarios) se debe de estudiar a los sistemas en que existe un gran potencial para el ahorro de energía. Estos sistemas son: Calentadores a fuego directo, Torres de enfriamiento y Sistemas de distribución de vapor

En el sector industrial se considera adicionalmente a los sistemas arriba mencionados el control de la demanda.

En forma conjunta todos los sectores anualmente adoptan el horario de verano, por medio del cual se puede reducir el consumo de energía eléctrica. En 1999 México ahorro 613 MW eléctricos al utilizar una hora más la iluminación natural. Este concepto resulta una estrategia tecnológica de ahorro de energía a nivel mundial que permite disminuir los consumos de recursos energéticos por medio de la acción de todas las personas de cada país [CONAE, 2001].

En resumen, las acciones en que puede implementarse un ahorro de energía se concentran principalmente en los siguientes equipos y sistemas: Iluminación, Calderas, Aire Acondicionado, Calentadores de Agua, Refrigeradores Domésticos, y Motores Eléctricos monofásicos y trifásicos.

De estos equipos, la **caldera** y **calentadores** de agua, son usados para proveer vapor o agua caliente a los procesos industriales. Estos equipos consumen un porcentaje elevado de la energía primaria. El ahorro en energéticos suministrados a calderas y calentadores de agua se puede llevar a cabo mediante la “**recuperación de energía**” desechada al ambiente a través de sistemas de recuperación de calor. Sin embargo, a partir de cierto nivel térmico, energía que se desecha al ambiente no tiene algún uso útil para el proceso de donde proviene. Solo una “**revalorización**” de esta energía desechada hasta un nivel térmico superior será útil para el proceso de donde fue extraída.

Este concepto de revalorización es posible de realizar por medio de un transformador térmico, que es una tecnología que está en proceso de investigación en diferentes partes del mundo. Un esfuerzo conjunto de varios países es la Agencia Internacional de Energía (IEA), que organiza los estudios de diversos sistemas y propone nuevas tecnologías que puedan prolongar de alguna forma las reservas de energéticos en el mundo. Este organismo (IEA) surgió de la preocupación internacional de un escenario de desabasto de energéticos a nivel mundial.

Los países industrializados, investigan y proponen sistemas que permitan hacer un uso eficiente de la energía a fin de prolongar los recursos energéticos con que cuentan. Por ejemplo, en Japón se implementaron algunos sistemas de recuperación de calor, con recuperación de la inversión inicial en términos de 2 a 3 años [Mashimo, 1987]. Este caso particular se debe al costo de los energéticos en dicho país. Sin embargo, el alza en los precios internacionales de petróleo, sin llegar a dichos límites, motivará a implementar a corto plazo sistemas para el ahorro de energía en todos los procesos térmicos en donde la energía desechada puede revalorizarse mediante ciclos termodinámicos, como las bombas de calor y los transformadores térmicos, aplicables en los procesos térmicos.

La disminución en los consumos de energéticos conducen a una disminución de las dimensiones de las calderas y calentadores de agua, disminuyendo también los volúmenes de agua tratada para calderas e indirectamente ahorrando energía en dicho proceso.

Las bombas de calor pueden contribuir en gran medida al ahorro de energía al incorporarse a los procesos existentes, ya que existen varias formas de integración de estos sistemas. Sin embargo, el implementar una bomba de calor impulsada eléctricamente no tendrá gran aceptación debido al concepto de sustituir quema de hidrocarburos en un proceso por energía eléctrica proveniente desde varios kilómetros de distancia, pero generada por alguna quema de combustibles fósiles también.

Las bombas de calor por absorción utilizan como energía motriz la energía térmica proveniente de procesos térmicos, por lo cual el concepto de ahorro de energía y su integración al mismo proceso de donde se obtuvo la energía para su operación resulta más realista.



Las bombas de calor son una tecnología relativamente nueva que deberá ser aplicada antes que los escenarios más desfavorables de costos energéticos debidos a la escasez de los energéticos sea una cruel realidad.

Considerando que el ahorro de energía lleva implícito una disminución de contaminantes atmosféricos, el ahorrar energía es un motivo de esfuerzo de todos los sectores por mantener un planeta más limpio.

En un estudio de CADETT [Holmberg, 1988] sobre transformadores térmicos, se menciona en términos generales cuales son las condiciones favorables en un proceso industrial en el cual es factible acoplar un transformador térmico:

- La cantidad de calor de desecho disponible deberá ser mayor y preferentemente el doble que el calor demandado
- La fuente de calor deberá ser preferentemente en forma de calor latente y en el rango de las megawatts
- La fuente de calor de desecho deberá tener una temperatura de 60-130°C, con un valorización del calor 20-50°C mayor.

### ***Procesos potenciales para el uso de un TTA***

A fin de identificar los procesos potenciales en que puede aplicarse un TTA se estudiaron 26 procesos, con aplicaciones a fuego directo. De estos procesos el 25 % aproximadamente mostraron un potencial teórico para la instalación de un TTA, en la práctica, bajo las condiciones específicas de cada proceso el potencial se redujo a un 10 %.

Las condiciones favorables para la instalación de un TTA son en general, bajo costo de inversión, precios altos de combustible y grandes periodos de operación, para poder tener un retorno de la inversión cercano a los 2 años.

Las industrias potenciales para la instalación de TTA son las de alimentos y de procesos químicos. Y pueden ser óptimas en el caso que se requiera de la mitad de la energía que actualmente se desecha. Aunque puede aumentar el potencial de un TTA si se considera la disminución de efectos negativos al ambiente.

## **Condiciones favorables para un TTA**

Las características de operación de un TTA requieren de las siguientes condiciones industriales para la aplicación de ellos:

- El total de energía desechada debe ser mayor, al menos en un factor de dos, de la energía que se desea recuperar.
- La energía desechada debe ser preferentemente vapor, a fin de aprovechar el calor latente y debe disponerse en orden de MW.
- La fuente de alimentación de energía del TTA debe tener una temperatura entre 60 y 130 °C a fin de obtener  $\Delta T$  con valores entre 20 y 50 °C.

## **Plantas demostrativas**

En la operación de los 15 TTA existentes en el mundo, (10 de ellos en Japón y 5 en Europa) se han obtenido las siguientes características:

- La energía recuperada de la mayoría de los TTA demostrativos es de 1 a 3.5 MW.
- A excepción de un TTA, se utilizó vapor entre 80 y 100 °C, como fuente de alimentación de energía al sistema.
- La energía revalorizada se obtiene como vapor a baja presión con temperatura de saturación entre 115 y 150 °C.
- Algunas de las industrias que utilizaron los TTA se dedican a la producción de butadieno, alcohol, etilenamina y cerveza (Industrias Químicas).

El COP de los TTA operados varió entre 0.47 y 0.49.

## **OBJETIVOS PRINCIPALES DEL PROYECTO DOCTORAL**

Después de un análisis detallado de los estudios teóricos y experimentales [Romero, 2000] de los transformadores térmicos por absorción de una etapa y de las mezclas simuladas y utilizadas se concluye que de todas estas mezclas la que ofrece el mayor potencial es la mezcla Carrol – agua [Best, 1994; Rivera, 1995, Romero 1996]. Sin embargo los estudios de esta mezcla se realizaron en un equipo construido en vidrio de borosilicato, por lo cual su coeficiente de operación y su incremento de temperatura estuvieron limitados.

En este proyecto los objetivos principales son:

- el estudio teórico de un transformador térmico por absorción de una etapa,
- el estudio experimental de un transformador térmico por absorción de una etapa, en un equipo con características similares a las que podría tener un equipo industrial,
- el acoplamiento teórico de este equipo a un proceso industrial
- y el diseño de absorbedores de película descendente como componente principal de un transformador térmico por absorción.

Para poder alcanzar este objetivo se requiere de conocer el diseño térmico y mecánico del absorbedor y las propiedades fisicoquímicas de las sustancias que intervienen en este proceso para poder llevar a cabo el diseño mecánico y térmico de un transformador térmico por absorción de una etapa. Estas propiedades se pueden modificar para optimar el desempeño de un transformador térmico por absorción de una etapa.

## ***ESTRUCTURA DE LA TESIS***

Para lograr los objetivos propuestos se ha planteado la estructura de la tesis de la siguiente forma:

- Modelado de transformadores térmicos por absorción de una etapa
- Datos de diseño termodinámico teóricos para un transformador térmico por absorción de una etapa con diferentes mezclas
- Diseño y construcción del transformador térmico experimental
- Puesta en operación de un transformador térmico por absorción de una etapa
- Evaluación del equipo experimental
- Estudio experimental del efecto del reflujo en un transformador térmico por absorción de una etapa operando con la mezcla Carrol – agua
- Estudio experimental de absorbedor con absorción en la parte interior de un tubo vertical
- Estudio experimental de un absorbedor con absorción en la parte exterior de un tubo horizontal
- Propuesta de diseño optimado de un absorbedor de película descendente
- Estudio teórico del acoplamiento de un transformador térmico por absorción de una etapa a un estanque solar
- Estudio teórico del acoplamiento de sistemas de absorción a un esquema de refinación de petróleo
- Conclusiones y recomendaciones generales

De esta forma, se obtendrán los estudios teóricos y experimentales de transformadores térmicos por absorción y el diseño optimado de absorbedores de película descendente

## **REFERENCIAS**

- Lic. Ernesto Zedillo Ponce de León**, 6° Informe de Gobierno, México, 1999
- Balance Nacional de Energía**, Secretaría de Energía, México, 1998
- Balance Nacional de Energía**, Secretaría de Energía, México, 1997
- Compendio de Información del Sector Energético Mexicano**, Programa Universitario de Energía - UNAM, 1998
- CONAE** (Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, México), Resultados de la aplicación del horario de verano, [http://www.conae.gob.mx/ahorro/resultados\\_hv.html](http://www.conae.gob.mx/ahorro/resultados_hv.html) e índice de intensidad energética <http://www.conae.gob.mx/precios/intenercompint.html>
- Best R** and Rivera W, Thermodynamic design data for absorption heat transformers. part six: operating on water – carrol, Heat Recovery Systems & CHP, Vol 14, No 4, pp 427 – 436, 1994
- Holmberg P**, Systems studies and optimisation of the SSHT cycle, Department of Heat and Power Technology, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1988
- Mashimo K**, Overview of heat transformers in Japan, Proceedings of the 1987 IEA Heat Pump Conference, Orlando, USA, pp 271 – 285, 1987
- Rivera W**, Best R, Heard C L and Holland F A, An experimental evaluation of water / carrol in an absorption heat transformer, Proceedings of the 19th International Congress of Refrigeration, The Netherlands, Vol IV-b, pp 1227 – 1234, 1995
- Romero R.**, Estudio de las mezclas bromuro de litio auga y Carrol - agua en transformadores térmicos por absorción de una etapa, Tesis de maestría en energía solar, UNAM, 1996
- Romero R**, Documento para la defensa del tema de tesis, Facultad de Ingeniería – UNAM, 2000

## GENERALIDADES

### INTRODUCCIÓN

En esta sección se describen los conceptos generales de las bombas de calor, su clasificación y descripción de funcionamiento, así como de las características de las sustancias utilizadas en ellas.

### CONCEPTOS GENERALES

Como se mencionó en la introducción al proyecto una opción para el ahorro de energía térmica son las bombas de calor. Las bombas de calor son dispositivos térmicos que mediante la aplicación de trabajo (en los sistemas de compresión) o energía térmica (en los sistemas de absorción) realizan un proceso de evaporación de una sustancia denominada fluido de trabajo, que absorbe calor de una fuente de calor a una temperatura  $T_{EV}$  (correspondiente a un componente llamado evaporador) y disipa calor a un sumidero de calor a una temperatura  $T_{CO}$  (que corresponde a un componente denominado condensador).

Las bombas de calor pueden ser utilizadas para disminuir la emisión de contaminantes al aprovechar calor de desecho en algunos casos o evitar la **quema local de combustibles fósiles** en el caso de compresión mecánica de vapor [Kimio, 1998; Van de Ven, 1998].

### CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE CALOR

Las bombas de calor se pueden clasificar de diversas formas,

- Por el tipo de proceso que se realiza en el equipo
- Por el origen y destino de la energía que pasa por la Bomba de Calor
- Por su diseño e instalación
- Por su funcionamiento

Clasificación por el **proceso** físico que llevan a cabo, se pueden clasificar de dos tipos :

- Bomba de calor por **compresión**, en la cual se logra la elevación de presión y temperatura entre componentes mediante la compresión mecánica de vapor.
- Bomba de calor por **absorción**, en la cual la elevación de la presión y temperatura se realiza como resultado de un proceso termodinámico en el cual se absorbe y desorbe un refrigerante en un soluto.

Clasificación por su **origen y destino** de la energía:

- Aire - aire (para climatización)
- Aire - agua (para agua sanitaria o calefacción)
- Agua - aire (utilizadas en corrientes de ríos)
- Agua - agua (para radiadores en el suelo)
- Tierra - aire y Tierra - agua (poco habituales por el costo)

Clasificación por su **diseño e instalación**:

- Compacta (un solo cajón contiene todos los componentes)
- Split (hay una parte exterior y otra interior)
- Multi - Split (hay una parte exterior y varias interiores)

Clasificación por su **funcionamiento**

Reversibles (opera el ciclo de calefacción y el ciclo de enfriamiento)

No reversibles (opera solo el ciclo de calentamiento)

Simultáneos (suministra frío y calor al mismo tiempo)

## **COMPONENTES DE UNA BOMBA DE CALOR**

Los componentes de una bomba de calor dependen del tipo de proceso físico que desarrollen, por lo cual existen dos esquemas básicos de bombas de calor:

Componentes principales de una bomba de calor por compresión mecánica de vapor

- Compresor y válvula de expansión
- Condensador y Evaporador

Componentes principales una bomba de calor por absorción

- Generador y Absorbedor
- Condensador y Evaporador

En general se pueden agrupar en dos tipos de bombas de calor [Herold and Radermacher, 1996]:

- las bombas de calor de tipo I en las cuales  $T_{EV} < T_{CO}$  y
- las bombas de calor de tipo II en las cuales  $T_{CO} < T_{EV}$ .

Cada uno de los tipos de bombas de calor tiene una aplicación específica.

### **BOMBA DE CALOR DEL TIPO I**

La bomba de calor tipo I se puede emplear para el acondicionamiento de espacios ya sea suministrando energía térmica a una temperatura mayor de la del medio ambiente (en el caso de calentamiento) o extrayendo energía térmica a una temperatura menor que el medio ambiente (caso de enfriamiento), para lo cual utiliza trabajo suministrado por un compresor (bomba de calor por compresión) o mediante la separación del fluido de trabajo de una segunda sustancia denominada absorbente en un ciclo químico (bomba de calor por absorción), que se lleva a cabo en un par de componentes adicionales a los mencionados (un absorbedor y un generador) conformando así un ciclo termodinámico de absorción.

### **Descripción de los ciclos de bomba de calor del tipo I**

#### **Bomba de calor por compresión mecánica de vapor**

Es la bomba más usada debido a su alto rendimiento y se puede usar tanto para calentamiento como para enfriamiento. Los componentes principales de este tipo de bomba son: un compresor, un evaporador, un condensador, una válvula de expansión y un fluido de trabajo.

El ciclo termodinámico de la bomba de calor por compresión se muestra en el diagrama presión - temperatura (figura G.1). El funcionamiento que tiene una bomba de calor por compresión es el siguiente: En el evaporador el fluido de trabajo se evapora (línea 1-2 en el diagrama) a la temperatura  $T_{EV}$  extrayendo una cantidad de calor  $Q_{EV}$  del medio que puede estar en estado sólido, líquido o gaseoso. El fluido de trabajo se comprime (línea 2-3) y cede calor latente  $Q_{CO}$  a una temperatura mayor  $T_{CO}$  en el condensador (línea 3-4). El fluido de trabajo condensado se expande a través de la válvula de expansión (línea 4-1) y se regresa al evaporador completándose así el ciclo.

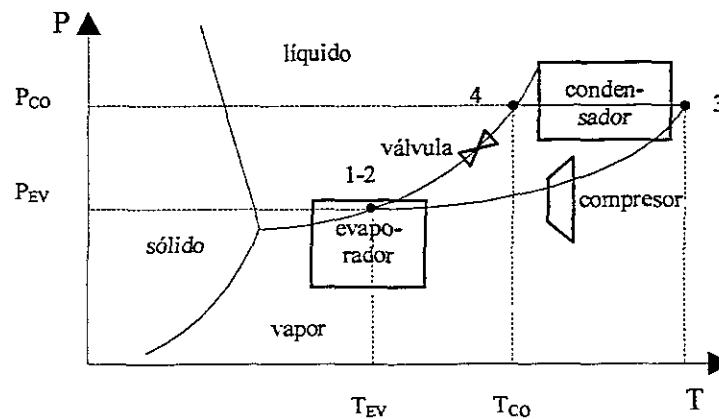


Figura G.1. Diagrama esquemático de una bomba de calor por compresión en ejes presión - temperatura.

### Bomba de calor por absorción

Las bombas de calor del tipo I por absorción, tienen el siguiente ciclo termodinámico: Se suministra energía a temperatura elevada ( $T_{GE}$ ) al componente denominado generador, en el cual se realiza la separación del fluido de trabajo del absorbente. Al fluido de trabajo se le reduce su temperatura en el condensador cediendo energía a una temperatura intermedia ( $T_{CO}$ ). El refrigerante se cambia a fase líquida y se expande para posteriormente pasar al evaporador (que se encuentra a menor presión que el condensador) donde se cambia a fase vapor a una temperatura menor con ayuda de la energía que proviene del ambiente ( $T_{EV}$ ) (y que por lo tanto no implica un costo). El vapor proveniente del evaporador se conduce al absorbedor en donde se pone en contacto con una corriente de refrigerante – absorbente proveniente del generador produciendo un desprendimiento de calor que es energía a una temperatura  $T_{AB}$  (mayor a  $T_{EV}$ ). Este ciclo termodinámico se esquematiza en la figura G.2 dentro de ejes temperatura vs presión.



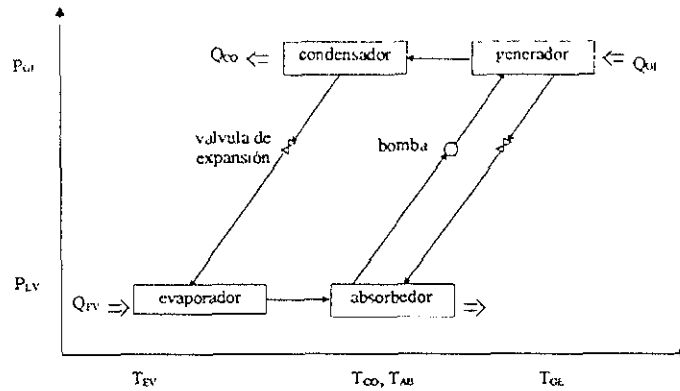


Figura G.2. Diagrama esquemático de una bomba de calor por absorción de una etapa con tres niveles de temperatura y dos niveles de presión

### **BOMBA DE CALOR DEL TIPO II (TRANSFORMADOR TÉRMICO)**

La bomba de calor tipo II (conocida también como transformador térmico o termostransformador) también puede estar constituida por los cuatro componentes (en una configuración básica) y se denomina transformador térmico por absorción (TTA) el cual utiliza energía térmica que puede suministrarse a la misma temperatura a la cual se disipa calor de desecho industrial, por lo cual es una opción atractiva para el mejor aprovechamiento de la energía de dichos procesos [Berntsson, 1989].

### **Descripción del ciclo de un transformador térmico**

#### **Ciclo básico de un transformador termico**

Las bombas de calor del tipo II, tienen el siguiente ciclo termodinámico: Se suministra energía a temperatura intermedia ( $T_{GE}$ ,  $T_{EV}$ ) a los componentes generador y evaporador, en el primero se realiza la separación del fluido de trabajo de la solución concentrada en absorbente. Al fluido de trabajo se le reduce su temperatura ( $T_{CO}$ ) en el condensador y se cambia a fase líquida, posteriormente se bombea con ayuda de una bomba al evaporador (que se encuentra a mayor presión que el generador y el condensador) donde se evapora y se conduce al absorbedor en donde se pone en contacto con fluido bombeado desde el generador, produciendo un desprendimiento de calor a una temperatura  $T_{AB}$ , mayor que  $T_{EV}$ . Este ciclo termodinámico se esquematiza en la figura G.3 dentro de ejes temperatura - presión.

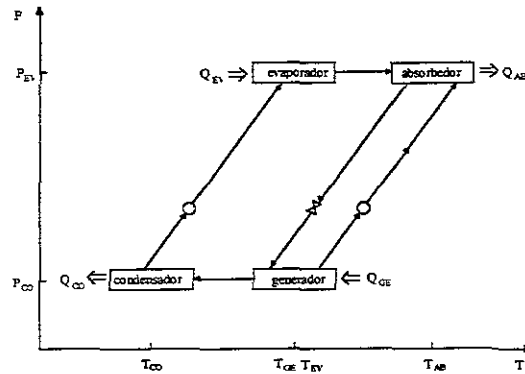


Figura G.3. Diagrama esquemático de un transformador térmico por absorción de una etapa con tres niveles de temperatura y dos niveles de presión

### Ciclo refinado de un transformador térmico

El ciclo refinado de un transformador térmico por absorción de una etapa consiste en un ciclo básico con un intercambiador de calor ubicado entre el generador y el absorbedor con el objetivo de precalentar la solución que se conduce al absorbedor utilizando parte de la energía que aún contiene el fluido proveniente del absorbedor. Este intercambiador incrementa la eficiencia del ciclo dependiendo de su efectividad [Rivera, 1991]. Este sistema se esquematiza en la figura G.4.

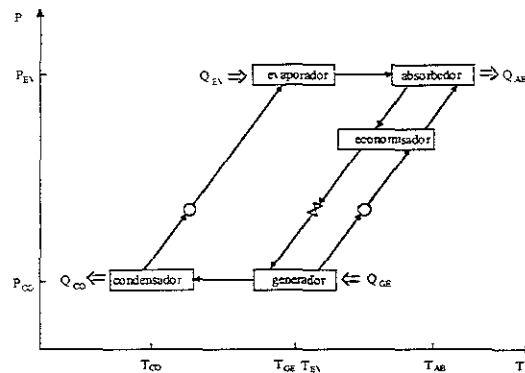


Figura G.4. Diagrama esquemático del ciclo refinado de un transformador térmico por absorción de una etapa con tres niveles de temperatura y dos niveles de presión

### SUSTANCIAS USADAS EN LAS BOMBAS DE CALOR

Los fluidos que hacen posible el funcionamiento de las bombas de calor dependen del tipo de bomba de calor que sea, es decir tipo I o II.

## Fluidos para las bombas de calor tipo I

Los fluidos de trabajo para bombas de calor del tipo I se dividen a su vez en dos tipos, fluidos de trabajo para compresión y para absorción. Los fluidos de trabajo para compresión, se conocen comercialmente como refrigerantes y la mayoría son compuestos creados artificialmente. Estos compuestos se denominan cloro – fluoro – carbonos, fluoro – carbonos y compuestos orgánicos. Los actualmente utilizados (que son menos agresivos a la capa superior de ozono) son:

- cloro – fluoro – carbonos: **R-22** ( $\text{CHFCl}$ ) , **R-124** ( $\text{CHClF-CF}_3$ ), **R-123** ( $\text{CF}_3\text{-CHCl}_2$ ), **R-141b** ( $\text{CH}_2\text{-CCl}_2\text{F}$ )
- fluoro – carbonos: **R-134a** ( $\text{CF}_3\text{-CFH}_2$ ), **R-32** ( $\text{CH}_2\text{F}_2$ ), **R-125** ( $\text{CF}_3\text{-CHF}_2$ ), **R-143a** ( $\text{CHF}_2\text{-CH}_2\text{F}$ )
- naturales:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{CO}_2$

Los fluidos de trabajo para las bombas de calor por absorción utilizan dos sustancias afines químicamente, una de ellas es el absorbente y la otra es el refrigerante. El refrigerante circula por el evaporador y el absorbente circula en un circuito secundario entre el generador y el absorbedor.

Las mezclas utilizadas comercialmente son

- Bromuro de litio  $\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$ , y
- Amoníaco – agua  $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$

En la mezcla  $\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$  el refrigerante es el agua, por lo cual se limita su uso para temperaturas de evaporación superiores a los  $4\text{ }^\circ\text{C}$  y  $100\text{ }^\circ\text{C}$  en el generador, limitado por cristalización.

En la mezcla  $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$  el refrigerante es el amoníaco y se utiliza principalmente para refrigeración a temperaturas inferiores a los  $0\text{ }^\circ\text{C}$ , sin embargo requiere de presiones altas.

## Fluidos para las bombas de calor tipo II

En estas bombas de calor existen dos sustancias afines químicamente que se denominan absorbente y fluido de trabajo. El absorbente circula entre el

generador y el absorbedor y el fluido de trabajo en todos los componentes en diferentes fases.

Debido a que la absorción es el proceso principal de estos equipos la selección de este par de sustancias (también conocido como par) determinará las condiciones de operación en que funcionará la bomba de calor de tipo II o transformador térmico por absorción.

El par más utilizado es la mezcla bromuro de litio – agua. Esta mezcla comercial ha sido caracterizada [McNeely, 1979] y puede obtenerse en diferentes grados de pureza para su utilización. Sin embargo, se ha demostrado [Best, 1994; Romero, 1996] que pueden modificarse sus propiedades fisicoquímicas agregando aditivos y aumentar el intervalo de condiciones de operación para un transformador térmico por absorción de una etapa. Por lo tanto, las modificaciones a las propiedades fisicoquímicas que se pueden implementar en las sustancias que participan en la absorción y que pueden favorecer la transferencia de calor y masa son:

*Concentración (incremento)* [Boryta, 1970; Matsuda, 1994],  
*viscosidad (mediante aditivos)*, [Kim, 1996] y  
*tensión superficial (mediante aditivos)* [Gustafsson, 1996].

## REFERENCIAS

ASHRAE Handbook, Refrigeration, SI Edition, GA, USA, 1994

Berntsson K M, Berntsson T, Franck P, Holmberg P and Wallin E, Learning from experiences with heat transformers in industrial processes, IEA, CADDET Series No. 2, The Netherlands, 1989

Best R and Rivera W, Thermodynamic design data for absorption heat transformers. part six: operating on water – carrol, Heat Recovery Systems & CHP, Vol 14, No 4, pp 427 – 436, 1994

Boryta D A, Solubility of lithium bromide in water between  $-50^{\circ}\text{C}$  and  $100^{\circ}\text{C}$  (45 to 70% lithium bromide), J. Chem. Eng. Data, Vol 15, No 1, pp 142-144, 1970

Gustafsson M, Ternström G and Setferwall F, Surface tension of a aqueous lithium bromide and sodium hydroxide solutios with surfactants, Proceedings of the Ab-Sorption 96, Canada, September 17 – 20, Vol I, pp 61 –65, 1996

Herold K E, Radermacher R and Klein S A, Absorption chillers and heat pumps, CRC Pres., USA, 1996

- Kim K J**, Kulankara S., Herold K E, Miller C, Performance evaluation of LiCl and LiBr for absorber design applications in the open cycle absorption refrigeration system, Proceedings of the Ab-Sorption 96, Canada, September 17 – 20, Vol I, pp 89 –97, 1996
- Kimio M**, Advanced utilisation of unused energy, IEA Heat Pump Centre Newsletter, Vol 16, No. 1, pp 19-21, 1998
- Matsuda A**, Choi K, Khada H and Kawamura T, Effect of pressure and concentration on performance of a vertical falling – film type of absorber and generator using lithium bromide aqueous solutions, Int. J. Refrig., Vol 17, No 8, pp 538 – 542, 1994
- McNeely L A**, Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide, ASHRAE Trans., Vol 85, Pt I, pp 413 – 434, 1979
- REFPROP**: Thermodynamic and Transport Properties of Refrigerants and Refrigerants Mixtures, NIST Standard Reference Database 23, Version 6.01, **McLinden M O**, Klein S A, Lemmon E W & Peskin A P, U. S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America, (c) 1998.
- Romero R.**, Estudio de las mezclas bromuro de litio agua y Carrol - agua en transformadores térmicos por absorción de una etapa, Tesis de maestría en energía solar, UNAM, 1996
- Van de Ven H.**, Large energy systems, IEA Heat Pump Centre Newsletter, Vol 16, No. 1, pp 10-15, 1998
- Refrigeration and air conditioning technology, **Whitman W C & Johnson W M**, Delmar Publishers inc., 2<sup>nd</sup> Edition, USA, 1991

# **Capítulo 1.- MODELADO DE TRANSFORMADORES DE CALOR POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA**

## **INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se presenta el modelo utilizado para calcular las posibles condiciones de operación para un transformador térmico por absorción de una etapa con diferentes mezclas.

## **MODELO MATEMÁTICO DE TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA**

Para poder realizar los estudios propuestos como objetivos del proyecto doctoral, se ha modelado matemáticamente el sistema en estado permanente y con consideraciones para poder evaluar condiciones de operación de procesos cercanos a la realidad. El modelo utilizado para calcular las condiciones de operación de un transformador térmico por absorción de una etapa (TTA), en equilibrio termodinámico (ver la figura G.4) tiene las siguientes consideraciones.

## **CONSIDERACIONES DEL MODELO**

El modelo utilizado para calcular las condiciones de operación en equilibrio termodinámico de un transformador térmico por absorción de una etapa (TTA) tiene las siguientes suposiciones:

- El TTA se encuentra en estado estacionario,
- Se tienen condiciones de saturación en :
  - la salida del generador hacia el absorbedor,
  - la salida del evaporador hacia el absorbedor,
  - la salida del absorbedor hacia el generador,
  - la salida del condensador hacia el evaporador.
- No hay pérdidas o ganancias de calor y/o masa por las tuberías.

- Las variaciones de presión en el interior de cada componente son despreciables.
- El trabajo realizado por las bombas es isentrópico.
- El trabajo realizado por las bombas es pequeño con relación a la cantidad de energía que se suministra o extrae de cualquiera de los componentes.
- El paso del líquido por las válvulas es isentálpico.
- El absorbente no se evapora en ninguna parte del sistema.

A partir de estas suposiciones y conociendo las temperaturas de condensación, generación y evaporación, se puede decir que:

La temperatura tanto del vapor como de la solución concentrada de salida del generador es la misma:

$$T_{GE,V} = T_{GE,L}$$

Las presiones y/o temperaturas en el condensador y evaporador se pueden conocer considerando que se encuentra el agua (pura) en saturación dentro de dichos componentes:

$$P_{CO} = P(T_{CO})$$

$$P_{EV} = P(T_{EV})$$

Considerando que no existen variaciones significativas de presión en las tuberías que unen a los equipos, se distinguen dos zonas de presión

$$P_{GE} = P_{CO}$$

$$P_{AB} = P_{EV}$$

Por lo tanto se puede calcular la concentración en el generador, considerando equilibrio termodinámico:

$$X_{GE} = X(P_{GE}, T_{GE})$$

y similarmente en el absorbedor

$$X_{AB} = X(P_{AB}, T_{AB})$$

Ya que no existe intercambio de masa y solo de calor entre las líneas que se encuentran entre el generador y el absorbedor se pueden distinguir cuatro componentes, con concentraciones:

$$X_{GE}, X_{AB}, X_{CO} \text{ y } X_{EV}$$

Ya que se ha considerado que el absorbente no se evapora

$$X_{CO} = 0 \text{ y } X_{EV} = 0$$

Por lo tanto solo existen dos lugares dentro del sistema con una concentración conocida de absorbente:

$$X_{GE} > 0 \text{ y } X_{AB} > 0$$

Considerando cada estado se puede calcular las entalpía en cada una de las salidas de los componentes:

$$H_{AB,S} = H_L(T_{AB}, X_{AB})$$

$$H_{GE,S} = H_L(T_{GE}, X_{GE})$$

$$H_{CO,S} = H_L(T_{CO})$$

$$H_{EV,V} = H_V(T_{EV})$$

$$H_{GE,V} = H_V(P_{GE}, T_{GE})$$

La efectividad del intercambiador de calor se puede considerar como la diferencia de entalpías entre las líneas que van del generador al absorbedor con respecto a la diferencia de entalpía que va al intercambiador proveniente del generador y la entalpía a la cual estaría una solución con la misma concentración del generador pero a la temperatura del absorbedor ( $H_{HX,t}$ ):

$$E_{f_{HX}} = (H_{GE,S} - H_{HX,S}) / (H_{GE,S} - H_{HX,t})$$

dónde

$$H_{HX,t} = H_L(T_{AB}, X_{GE})$$

Por lo tanto si se conoce o supone (para diseño) la efectividad del intercambiador de calor  $E_{f_{HX}}$



$$E_{f_{HX}} = k$$

Se puede conocer la entalpía de la línea proveniente del generador y que después del intercambio de calor se dirige al absorbedor:

$$H_{HX,S} = H_{GE,S} - E_{f_{HX}} (H_{GE,S} - H_{HX,t})$$

Conociendo o suponiendo (para diseño) la potencia suministrada a uno de los componentes (puede ser el evaporador) se puede calcular el flujo dentro del sistema:

$$M_{EV,V} = Q_{EV} / (H_{EV,V} - H_{CO,S})$$

Bajo la condición que no existe acumulación de masa en ningún punto del sistema se tiene que

$$M_{GE,V} = M_{EV,V}$$

$$M_{CO,L} = M_{EV,V}$$

Y considerando la relación de flujo (ó relación de bombeo) dada como

$$FR = M_{AB,S} / M_{EV,V}$$

Haciendo un balance de materia en el absorbedor, también se puede expresar en función de concentraciones, como:

$$FR = (X_{GE}) / (X_{GE} - X_{AB})$$

Por lo tanto se puede conocer la cantidad de masa que sale del absorbedor hacia el generador (previo intercambio de calor)

$$M_{AB,S} > 0$$

Por lo tanto, mediante un balance de masa en el absorbedor se encuentra la cantidad de masa que sale del generador y se dirige hacia el absorbedor (previo intercambio de calor)

$$M_{AB,S} = M_{GE,S} + M_{EV,V}$$

Conociendo todos los flujos se puede calcular la entalpía que tiene la corriente que sale del intercambiador de calor y que se dirige hacia el generador.

$$H_{HX,S,f} = (M_{GE,S} / M_{AB,S}) (H_{GE,S} - H_{HX,S}) + H_{AB,S}$$

Ya que se considera que el trabajo de la válvula es isentálpico

$$H_{VA,S} = H_{HX,S,f}$$

A partir de los datos calculados se pueden conocer las potencias en cada uno de los componentes:

$$Q_{GE} = M_{GE,V} H_{GE,V} + M_{GE,S} H_{GE,S} - M_{AB,S} H_{VA,S}$$

$$Q_{CO} = M_{CO} (H_{CO,S} - H_{GE,V})$$

$$Q_{AB} = M_{CO} H_{EV,V} + M_{GE,S} H_{HX,S} - M_{AB,S} H_{AB,S}$$

Con lo que se puede calcular el coeficiente de operación en función de las potencias revalorizada y suministrada, claro que el trabajo de las bombas se desprecia como condición

$$COP = (Q_{AB}) / (Q_{GE} + Q_{EV})$$

y que es diferente y menor al coeficiente de operación de Carnot [Rivera, 1994]:

$$COP = (T_{AB} (T_{EV} - T_{CO})) / (T_{GE} (T_{EV} - T_{CO}) + T_{EV} (T_{AB} - T_{GE}))$$

## **CONCLUSIONES**

Este modelo matemático y termodinámico puede ser implementado para los fluidos de trabajo de los transformadores térmicos por absorción de una etapa que cumplan con las consideraciones del modelo y de los cuales se conozcan sus ecuaciones de equilibrio.

## **REFERENCIAS**

**Best R**, Rivera W, Cardoso MJ, Romero RJ and Holland FA, Modelling of single-stage and advanced absorption heat transformers operating with the water / Carrol mixture, Applied Thermal Engineering, Vol 17, No 11, pp 1111 – 1122, 1997

**Rivera W.**, Best R., Hernández J., Heard C.L. and Holland F.A., Thermodynamic study of advanced absorption heat transformers – i. single and two stage configurations with heat exchangers, Heat Recovery Systems & CHP, Vol 14, No 2, pp 173 – 183, 1994

## **Capítulo 2.- DATOS DE DISEÑO TERMODINÁMICO TEÓRICOS PARA UN TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA CON DIFERENTES MEZCLAS**

### **INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se detalla la forma de obtener datos de diseño termodinámico para un transformador térmico por absorción de una etapa (TTA) con diferentes fluidos, utilizando un programa de cómputo específicamente diseñado para este fin.

### **MODELADO POR COMPUTADORA**

El estudio de las mezclas requiere de sistemas de cómputo que van más allá de la solución de ecuaciones de equilibrio termodinámico, ya que se requiere que los componentes interactúen, por lo cuál se requiere de cálculo iterativo de condiciones para resolver los modelos que simulan el comportamiento de un sistema de absorción de una etapa, ya sea una bomba de calor tipo I o tipo II.

Se ha utilizado software del Departamento de Energía de los Estados Unidos de América (ABSIM) para simular el ciclo de absorción de las bombas de calor, sin embargo el uso de mezclas no reportadas y utilizadas requiere de nuevas ecuaciones para el cálculo de propiedades y nuevas subrutinas que no se encuentran en software comercial por lo que surgió la necesidad de generar un programa que realizara el cálculo de sistemas de absorción de una etapa con diferentes mezclas.

El resultado de esta necesidad es el programa TT-CIE.exe, que es un programa para cálculo de condiciones de operación de bombas de calor.

El programa fue concebido inicialmente para calcular las condiciones de operación de un transformador térmico operando con la mezcla Carrol (LiBr-etilenglicol) – agua y la mezcla bromuro de litio – agua.

Posteriormente se integraron las subrutinas para el cálculo de propiedades de una mezcla compuesta por hidróxidos de sodio, potasio y cesio, en relación molar 40:36:24.

Después se agregaron las subrutinas para el cálculo de condiciones de operación para una mezcla de bromuro de litio – agua – etanolamina.

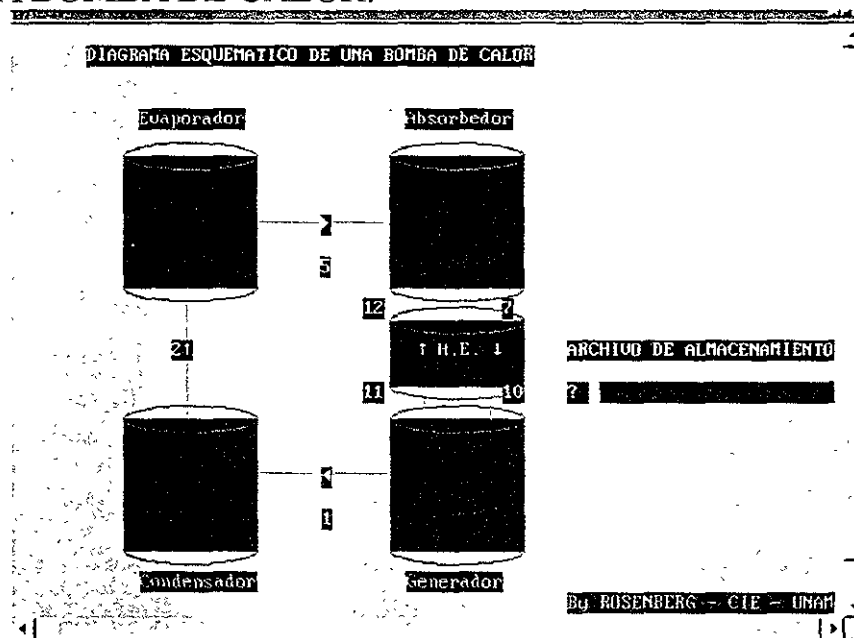
Finalmente se le agregó un ambiente gráfico para la mejor identificación de los componentes y el archivo de almacenamiento de datos. Los datos de diseño termodinámico que puede calcular dependen de el modos de bomba de calor seleccionada: calentamiento, enfriamiento, calentamiento y enfriamiento simultaneo y para transformador térmico por absorción de una etapa.

Este programa ejecutable puede funcionar en cualquier computadora personal operando con modo MS-DOS o desde Windows (versiones 3.x, 9x y posteriores).

## CONSIDERACIONES DEL PROGRAMA

Inicio de programa y ejecución

- 1) En cuanto se selecciona el “ICONO” TT-CIE.EXE, se muestra rápidamente una pantalla de presentación, seguida de un DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UNA BOMBA DE CALOR.



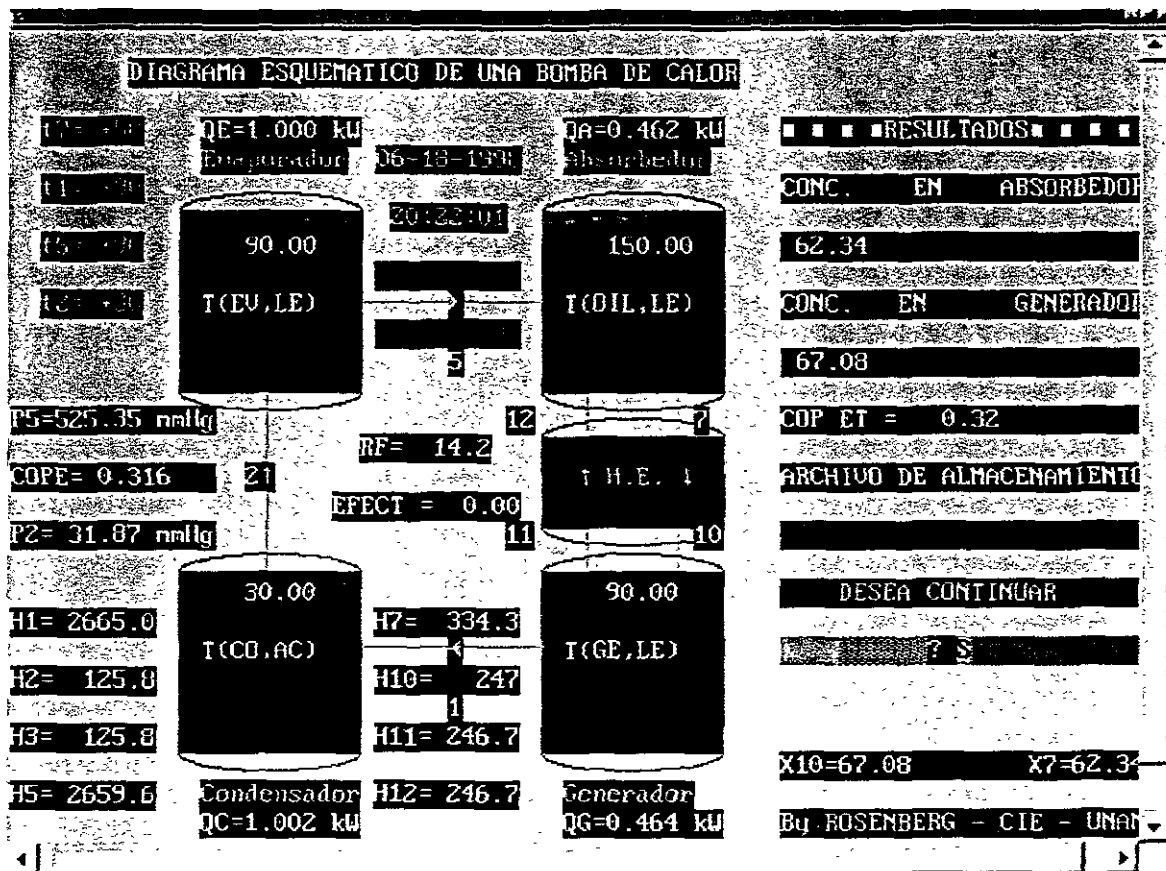
- 2) En este momento cuestiona: ARCHIVO DE ALMACENAMIENTO? Al cual se le puede ingresar una ruta específica existente (p.ej. c:/datos/hoy.dat) y un archivo que crea (y en caso de existir) sobrescribe.

En caso de pulsar (accidental o deliberadamente RETURN) el archivo "por de fault" es SIMULA2.DAT, que es almacenado en el directorio desde donde se está ejecutando TT-CIE.EXE

- 3) Posterior al ingreso del "NOMBRE DEL ARCHIVO", se cuestiona si se desea (S) o no (N) una alarma sonora de fin de cálculo de condiciones. La acción por "de fault" (es decir presionar RETURN) asigna una respuesta afirmativa, con lo cual sonará un "BEEP" al final del programa.
- 4) Debe de ingresar la mezcla de la cual quiere conocer sus "condiciones de operación". Puede seleccionar (del 1 , 2 o 3 ) las mezclas Bromuro de litio, Carrol o Ternaria de Hidróxidos , con agua como refrigerante. No existe acción "por default" en esta pregunta, por lo que debe de seleccionar una mezcla.
- 5) Después debe seleccionar la "modalidad" en que desea operar una bomba de calor :
  - Como transformador térmico: para recuperación de calor,
  - Para enfriamiento: acondicionamiento de espacios,
  - Para calentamiento: acondicionamiento de espacios,
  - Para calentamiento y enfriamiento simultáneamente: que permite retirar calor de un espacio y disiparlo en otro a diferentes niveles de temperatura.
- 6) Posterior a esta selección, se pide ingresar datos de "temperatura" (centígrados) en los cuatro componentes básicos de una bomba de calor: evaporador, absorbedor, generador y condensador.
- 7) Después se cuestiona si se desea que se calculen las concentraciones (de generador y absorbedor) o si se desea fijar la del generador ( y solo determinar la del absorbedor). Se recomienda la primera opción para que el programa tenga una mayor flexibilidad en el cálculo de condiciones termodinamicamente viables. No existe acción por "default" así que deberá seleccionar alguna de las dos opciones.
- 8) En el caso de seleccionar solo el cálculo de la concentración del absorbedor solicitará la concentración que se considerará en el generador (X10), (ver diagrama). Anote la concentración que desee evaluar.
- 9) Después se preguntará sobre la efectividad de un intercambiador de calor (economizer) situado entre el generador y el absorbedor. Seleccione un valor entre 0.0001 y 1. Se recomienda la efectividad de 0.7. La acción por "default" calcula la operación del sistema con siete valores de efectividad del intercambiador de calor (efectividades de 0.4 a 1). Para indicar que no se cuenta con un intercambiador de calor se debe anotar 0.01 ó un número

menor para evitar ingresar un cero y que se considere que es una acción por "default".

- 10) Debe de anotar en cada componente básico el intervalo (en centígrados) que desea que varíe cada componente, es decir, un rango de valores.
- 11) La siguiente cuestión a ingresar es (en centígrados) la variación que desea calcular para cubrir el intervalo propuesto en el paso anterior.
- 12) Se pregunta el número de condiciones a buscar, la acción por default es 1. Se recomienda anotar un número mayor a 100 para evitar que el programa se detenga sin haber determinado todas las condiciones de operación posibles. El ingresar un número mayor no afecta la operación del programa y asegura que se calcularán todas las condiciones posibles sin repetir una sola.
- 13) En las cuatro modalidades se pregunta por la capacidad que debe de tener el evaporador. Esto es muy útil en el cálculo de condiciones de operación para acondicionamiento de espacios para refrigeración. La acción por default es un kiloWatt.
- 14) Después de ingresar los datos anteriores, se pregunta si se desea calcular algún dato. La acción por default es N ("NO"), si escribe cualquier símbolo diferente a N, se regresará a preguntar todo a excepción del nombre del archivo de almacenamiento, en donde se anotará que se hizo un "cambio de condiciones". La acción por default inicia el proceso de cálculo de condiciones y su velocidad depende del procesador en que se esté ejecutando la aplicación.
- 15) En cuanto inicia el cálculo de condiciones aparecerán diversos "letreros" anunciando que está calculando y en su caso, porque la condición no es viable. Y en caso de que sea viable que se está "ARCHIVANDO".
- 16) Una condición de operación es viable cuando el Coeficiente de operación calculado en función de las entalpías es positivo y menor que el coeficiente de operación de Carnot, que su "relación de flujo" no sea mayor a 100 y que las concentraciones de las soluciones en los componentes (generador y absorbedor) no estén dentro de condiciones de cristalización.



### Paro del programa

- 1) Si se desea detener la ejecución del programa, una vez que se ha ingresado el "cálculo de condiciones" debe de presionarse por 2 segundos la tecla "ESC". Esto detendrá momentáneamente la ejecución del programa y en el caso de Windows permitirá al usuario retomar el control del sistema (presionando simultáneamente las teclas "ALT" y "TAB").

### Fin de programa

- 1) En cuanto se finaliza el cálculo de condiciones de operación posibles (en algunos casos es cero, si los datos ingresados así lo determinan) sonará un "BEEP" en caso de haberlo seleccionado al inicio y la pantalla mostrará junto al nombre del archivo de almacenamiento el número de condiciones que fueron evaluadas y en el siguiente renglón la pregunta: "Desea continuar?" La acción por default es S "SI", si no desea continuar presione N ("NO") y el programa finalizará.



## Lectura e interpretación de los datos archivados

- 1) Después de haber finalizado el programa, se puede acceder al archivo donde se decidió almacenar los datos generados por el programa. Estos datos pueden leerse en cualquier hoja de cálculo (works, qpro, excel)
- 2) En el caso que sean leído por un filtro (como el usado por Microsoft Excel) preguntará si los datos están delimitados por algún símbolo o si son de ancho fijo. En ese caso seleccione "DELIMITADOS" y en el siguiente campo seleccione "POR COMAS", lo cual le conducirá a una hoja como la siguiente:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	LAS VARIABLES ESTAN REFERIDAS AL DIAGRAMA DEL MANUAL EXE							
2		T2	T5	T7	P2	P5	XT	XI0
3	16-12-1992 20:11:13							
4	SIMULA2.DAT							
5	TRANSFORMADOR TERMICO							
6	90	30	90	150	31.8683	525.3515	61.34272	67.076
7	90	30	90	149	31.8683	525.3515	61.98726	67.076
8	90	30	90	148	31.8683	525.3515	61.6367	67.076
9	90	30	90	147	31.8683	525.3515	61.28336	67.076
10	90	30	90	146	31.8683	525.3515	60.93154	67.076
11	90	30	90	145	31.8683	525.3515	60.54398	67.076
12	90	30	90	144	31.8683	525.3515	60.15427	67.076
13	90	30	90	143	31.8683	525.3515	59.80497	67.076
14	90	30	90	142	31.8683	525.3515	59.41702	67.076
15	90	30	90	141	31.8683	525.3515	58.99391	67.076
16	90	30	90	140	31.8683	525.3515	58.6082	67.076
17	90	30	90	139	31.8683	525.3515	58.22281	67.076
18	90	30	90	138	31.8683	525.3515	57.80204	67.076
19	90	30	90	137	31.8683	525.3515	57.38021	67.076
20	01	30	01	136	31.8683	525.3515	56.95821	67.076

Barra de estado: Listo Suma=0 NUM

- 3) En donde las variables corresponden al diagrama que muestra el programa en ejecución y que arroja además los siguientes datos:

- T1 = Temperatura de la solución en el generador (°C)
- T2 = Temperatura del agua en el fondo del condensador (°C)
- T5 = Temperatura del agua en el evaporador (°C)
- T7 = Temperatura en el fondo del absorbedor (°C)
- P2 = Presión en el condensador y en el generador (mmHg)

P5 = Presión en el absorbedor y en el evaporador (mmHg)

X7 = Concentración en el absorbedor (%w)

X10 = Concentración en el generador (%w)

RF = Relación de flujo (adimensional)

QG = Potencia en el generador (kW)

QE = Potencia en el evaporador (kW)

QC = Potencia en el condensador (kW)

QA = Potencia en el absorbedor (kW)

COPE = Coeficiente de operación entálpico (adimensional)

COPC = Coeficiente de operación de Carnot (adimensional)

Estos últimos COPs definidos en función de la modalidad en que opera la bomba de calor.

4) De esta forma se puede determinar si una bomba de calor por absorción puede o no operar para cubrir una necesidad específica.

5) Por ejemplo, para el caso de "recuperación de calor industrial", si se administra de la misma fuente energía de desecho a un transformador térmico (a una misma temperatura) y se considera que el condensador puede ser enfriado por agua o aire a temperatura cercana al medio ambiente. Se puede estimar a que nivel de temperatura se recuperará la energía y con que eficiencia.

Este programa no ha sido elaborado con fines de lucro. Es una herramienta, versátil y de fácil manejo que puede ayudar a entender y promover las bombas de calor por absorción, ya sean para acondicionamiento de espacios o para recuperación de calor de desecho industrial.

### **MEZCLAS QUE PUEDEN SER SIMULADAS**

El programa TTCIE puede obtener los datos de diseño termodinámico para las mezclas siguientes.

#### **MEZCLA BROMURO DE LITIO – AGUA**

Esta es la mezcla comercial más utilizada para sistemas de absorción para el acondicionamiento de espacios [Mashimo, 1987]. Esta mezcla fue propuesta para su operación en un sistema de absorción [Eisa, 1986(b)] y posteriormente [Eisa, 1986(a)] para transformador térmico por absorción de una etapa.

### **MEZCLA BROMURO DE LITIO – ETILENGLICOL (CARROL) – AGUA**

Esta mezcla basada en bromuro de litio - agua, tiene un aditivo para el absorbente, en relación de 4.5:1 en peso de bromuro de litio a etilenglicol. Con esta mezcla se ha demostrado [Best, 1994] que se pueden obtener mayores coeficientes de operación teóricos que con la mezcla bromuro de litio – agua.

### **MEZCLA BROMURO DE LITIO – ETANOLAMINA – AGUA**

Esta mezcla se propuso como una mezcla basada en bromuro de litio – agua, con el aditivo de etanolamina ya que incrementa de esta forma el intervalo de operación sin cristalizar hasta 80 % en peso del absorbente bromuro de litio – etanolamina en la solución. De esta mezcla se reportaron los calores [Kim, 1996] de dilución y utilizando el método propuesto por McNeely [McNeely, 1979], se correlacionaron

### **MEZCLA TERNARIA DE HIDROXIDOS – AGUA**

Esta mezcla fue propuesta para un sistema de calentamiento de agua por absorción [Herold, 1991]. Al estudiar teóricamente la factibilidad de su operación en un transformador térmico por absorción de una etapa [Rivera and Romero, 1998] y al demostrar que puede operar en un intervalo de condiciones en los que la mezcla bromuro de litio – agua no opera, se decidió implementar las subrutinas necesarias para ejecutarse en el programa TT-CIE, con el fin de comparar el desempeño de un transformador térmico por absorción de una etapa con mezclas basadas en bromuro de litio y una no basada en bromuro de litio.

### **CONCLUSIONES**

Del trabajo realizado en la programación, compilación y edición del programa de cómputo ejecutable en computadoras personales se puede concluir que se cuenta actualmente con una herramienta útil y práctica para poder determinar las condiciones de operación de una bomba de calor por absorción de una etapa con diferentes mezclas y diferentes modos de operación: calentamiento, enfriamiento, calentamiento y enfriamiento simultáneamente y revalorización de energía en forma de TTA.

Este programa permite comparar la operación teórica de un sistema de absorción con diferentes mezclas y poder determinar con cual de estas mezclas se obtiene un mejor desempeño, es decir un mayor coeficiente de operación.

Los datos de diseño termodinámico para un TTA con diferentes mezclas se presentan en el apéndice A.

## **REFERENCIAS**

**Best R** and Rivera W, Thermodynamic Design data for absorption heat transformers. part six: operating on water – carrol, Heat Recovery Systems & CHP, Vol 14, No 4, pp 427 – 436, 1994

**Eisa M A R**, Best R and Holland F A, Thermodynamic design data for absorption heat transformers – Part I. Operating on water-lithium bromide. Heat Recovery Systems 6(5), pp.421-432, 1986 (a)

**Eisa M A R**, Devotta S and Holland F A, Thermodynamic design data for absorption heat pump systems operating on water-lithium bromide. Part I: Cooling. J. Appl. Energy 24(4), 287-301, 1986 (b)

**Herold K E**, Radermacher R, Howe L and Erickson D C, Development of an absorption heat pump water heater using an aqueous ternary hydroxide working fluid, Int. J. Refrig., 14, 156 - 167, 1991

**Kim J S**, Park Y & Lee H, Heat capacities of water + lithium bromide + ethanolamine and water + lithium bromide + 1,3 propanediol system, J. Chem. Eng. Data, Vol 42, pp 371 – 373, 1996

**Rivera W** and Romero R J, Thermodynamic design data for absorption heat transformers. Part Seven: Operating on an aqueous hydroxide, Applied Thermal Engineering, Vol 18, Nos 3-4, pp 147-156, 1998

**Mashimo K**, “Overview of heat transformers in Japan”, Proceedings of the 1987 IEA Heat Pump Conference, Orlando, USA, PP 271 – 285, 1987

**McNeely L A**, Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide, ASHRAE Trans., Vol 85, Pt I, pp 413 – 434, 1979

## **Capítulo 3.- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA**

### **INTRODUCCIÓN**

Un transformador térmico por absorción de una etapa se construyó en base a la experiencia obtenida de la literatura y de estudios experimentales anteriores [Romero,1996; Rivera, 1996] llevados a cabo en un transformador de calor de vidrio instalado a la Sección Geotérmica, del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) en Cuernavaca, Morelos, México.

Este capítulo describe el diseño y construcción de un transformador térmico por absorción de una etapa (TTA) metálico con una capacidad térmica de 1.8 kW en el absorbedor.

### **CONSIDERACIONES DEL DISEÑO**

El transformador térmico por absorción de una etapa experimental (SSHT) se diseñó

- (i) para aplicar la experiencia obtenida,
- (ii) para estudiar su desempeño con mezclas diferentes,
- (iii) para demostrar a los industriales mexicanos, la viabilidad de recuperar calor desechado (a las temperaturas entre 60 y 90°C) y revalorizándolo a un nivel más útil, y
- (iv) proporcionar la base de diseño para construir una unidad con capacidad industrial

En particular, el transformador térmico por absorción de una etapa fue diseñado con las siguientes características:

- (i) de costo bajo,
- (ii) de fácil fabricación que no implique el uso de talleres sofisticados,
- (iii) capaz de operar con diferentes mezclas,
- (iv) capaz de operar al vacío o a presiones mayores a la presión atmosférica,
- (v) completamente fabricado en acero inoxidable para evitar problemas de corrosión,
- (vi) reutilizable la mayoría de sus componentes,

- (vii) fácilmente escalable a un sistema de doble absorción, y
- (viii) fácilmente escalable a potencias mayores.

### **CÁLCULO DE LAS POTENCIAS**

Los datos de diseño termodinámicos son constantes y tiene los siguientes valores:

- (1) temperatura del condensador  $T_{CO}$ , 32°C,
- (2) temperatura del evaporador  $T_{EV}$ , 90°C,
- (3) temperatura del generador  $T_{GE}$ , 90°C,
- (4) temperatura de absorbente  $T_{AB}$ , 150°C,
- (5) efectividad del intercambiador de calor  $\eta$ , 0.7 y
- (6) potencia en el absorbedor  $Q_{AB}$ , 1.8 kW.

A partir de los datos obtenidos por el software desarrollado para el modelado de un transformador térmico por absorción de una etapa operando con la mezcla del Carrol – agua (vea Apéndice A), con las condiciones termodinámicas a la entrada y salida de las corrientes de cada componente principal, la potencia suministrada, las concentraciones, la relación de flujo se determinó el coeficiente de operación entálpico. Todos los datos del diseño termodinámico obtenidos se muestran en la tabla 3.1.

En el apéndice B se muestran imágenes del TTA los componentes construidos, en acero inoxidable 316 y un diagrama de la interconexión entre estos.

Parámetro	valor	unidades
Temperatura del condensador, $T_{CO}$ ,	32.0	(°C)
Temperatura del evaporador, $T_{EV}$ ,	90.0	(°C)
Temperatura del generador, $T_{GE}$ ,	90.0	(°C)
Temperatura del absorbedor, $T_{AB}$ ,	150.0	(°C)
Presión del condensador, $P_{CO}$ ,	0.05	(MPa)
Presión del generador, $P_{GE}$ ,	0.05	(MPa)
Presión del evaporador, $P_{EV}$ ,	0.70	(MPa)
Presión del absorbente, $P_{AB}$ ,	0.70	(MPa)
Flujo de fluido de trabajo, $M_{WF}$ ,	0.0009	(kg/s)
Flujo del generador, $M_{GE}$ ,	0.0133	(kg/s)
Flujo del absorbedor, $M_{AB}$ ,	0.0142	(kg/s)
Concentración de absorbente, $X_{GE}$ ,	73.8	(% peso)
Concentración de absorbente, $X_{AB}$ ,	69.3	(% peso)
Potencia de condensador, $Q_{CO}$ ,	2200.0	(W)
Potencia de evaporador, $Q_{EV}$ ,	2200.0	(W)
Potencia de generador, $Q_{GE}$ ,	1800.0	(W)
Potencia de absorbedor, $Q_{AB}$ ,	1800.0	(W)
Variables parametrizadas		
Efectividad del economizador, $EF_{EC}$ ,	0.7	(adimensional)
Relación de flujo, $FR$ ,	16.3	(adimensional)
Coefficiente de operación entálpico, $COP_{ET}$ ,	0.442	(adimensional)
Coefficiente de operación de Carnot, $COP_{CT}$ ,	0.573	(adimensional)

Tabla 3.1 Datos de diseño termodinámico para el transformador térmico por absorción de una etapa.

### **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES**

La figura 3.1 muestra un diagrama esquemático del transformador térmico por absorción de una etapa diseñado para operar con la mezcla Carrol - agua. Este diagrama muestra las partes principales del sistema que son el generador, el evaporador, el condensador, absorbedor y el intercambiador de calor, con sus parámetros de operación.

Para calcular el área de transferencia de calor requerida para los componentes principales en el transformador térmico por absorción de una etapa, se utilizó la ecuación de diseño para un intercambiador de calor.

$$A = \frac{Q}{U\Delta T_{lm}} \quad (3.1)$$

donde U es el coeficiente global de transferencia de calor y  $\Delta T_{lm}$  es la diferencia media logarítmica de temperaturas. La  $\Delta T_{lm}$  usa las temperaturas finales de cada corriente en el intercambiador de calor diseñado. Las ecuaciones (3.2) y (3.3) se usan para calcular la  $\Delta T_{lm}$  en contracorriente y en paralelo respectivamente.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \quad (3.2)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2}\right)} \quad (3.3)$$

Las propiedades físicas y termodinámicas para el bromuro de litio – agua y de la mezcla Carrol – agua se tomaron de los datos publicados [McNeely, 1979, Reimann, 1984] respectivamente. Se tomaron las propiedades físicas y termodinámicas para agua de los datos publicados en el Manual de los Ingenieros del Químico de Perry [Perry, 1984].

La instrumentación utilizada para la medición de flujos y presiones no pertenecen al sistema internacional de unidades, sin embargo, se ha considerado pertinente expresar las escalas que estos instrumentos registran a fin de poder comparar rápidamente su desempeño experimental con este documento.

## **GENERADOR**

Este componente tiene la función principal de producir el vapor del fluido de trabajo a partir de la solución diluida con una potencia a temperatura intermedia relativa (ver figura G.4).

El generador es del tipo inundado en el que la solución diluida de absorbente se calienta por medio de resistencias eléctricas de tipo cartucho. Por lo cual, se construyó, básicamente como un intercambiador de calor horizontal con un



diámetro externo de 16.7 cm y una longitud de 30 cm con una brida en su parte posterior y una tapa en la parte frontal. El volumen del recipiente es de 0.0061 m<sup>3</sup>. Se colocaron cuatro coples para tubería en el cuerpo cilíndrico. Dos de ellos son para conducir las soluciones diluida y concentrada de absorbente. El tercer conector sirve para el llenado y drenado. El último conector dirige el vapor del fluido de trabajo hacia el condensador. En la tapa delantera, se acondicionó una mirilla para observar el nivel de la solución durante la operación del equipo. El cuerpo de la mirilla se fabricó en acero inoxidable y bridado al frente. En la tapa delantera se colocaron dos termopozos a diferentes alturas a fin de poder realizar las medidas de temperatura y un conector con sello tipo cromatógrafo, para poder realizar la extracción de solución para la medición de la concentración. En la brida ciega se colocaron cuatro coples para tubería. Dos de ellos son para los dos resistencias eléctricas de 1.0 kW, colocados a la altura de la mirilla frontal y los otros dos pueden usarse para conducir solución diluida por tubería y esprear la solución sobre las resistencias en el caso que se opere el sistema sin que las resistencias eléctricas estén sumergidas.

Este componente se ha diseñado para operar con o sin las resistencias eléctricas de tipo cartucho inmersas, para una potencia térmica máxima  $Q_{GE}$  de 1.8 kW y para una capacidad máxima de almacenamiento de solución de 1 l kg a las condiciones de diseño.

El calor proporcionado por las resistencias eléctricas puede ser controlado a través de un regulador de corriente alterna (variac) conectado a ellas.

La tabla 3.2 listas los parámetros de diseño del generador así como la instrumentación requerida.

Parámetro	Vapor del fluido de trabajo	Solución concentrada de absorbente	Solución diluida de absorbente
Temperatura (°C)	90	90	108
Presión (Bar)	0.05	0.05	0.05
Concentración en peso (%w)	0	73.8	69.3
Entalpía (kJ/kg)	2665.0	219.8	246.4
Flujo (kg/s)	0.0009	0.0133	0.0142
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	0.45	1.597	1.507
Viscosidad dinámica (MPa s)	0.012	8.016	4.243
Potencia (W)	1800 provista por dos resistencias eléctricas de 30 cm de longitud.		
Termopares	Tipo T 0.6 mm de diámetro Aislamiento de PVC		
Rotámetros	De 0 a 1400 cm <sup>3</sup> /min (2)		
Bomba	Micropump de 3600 rpm para flujos hasta de 1152 ml/min		
Amperímetro	Tipo Gancho Amprove ACD-10		

Tabla 3.2 datos de diseño del Generador

Las figuras 3.2 a 3.4 muestran los planos de construcción del generador en vista lateral, vista frontal y vista posterior respectivamente con dimensiones.

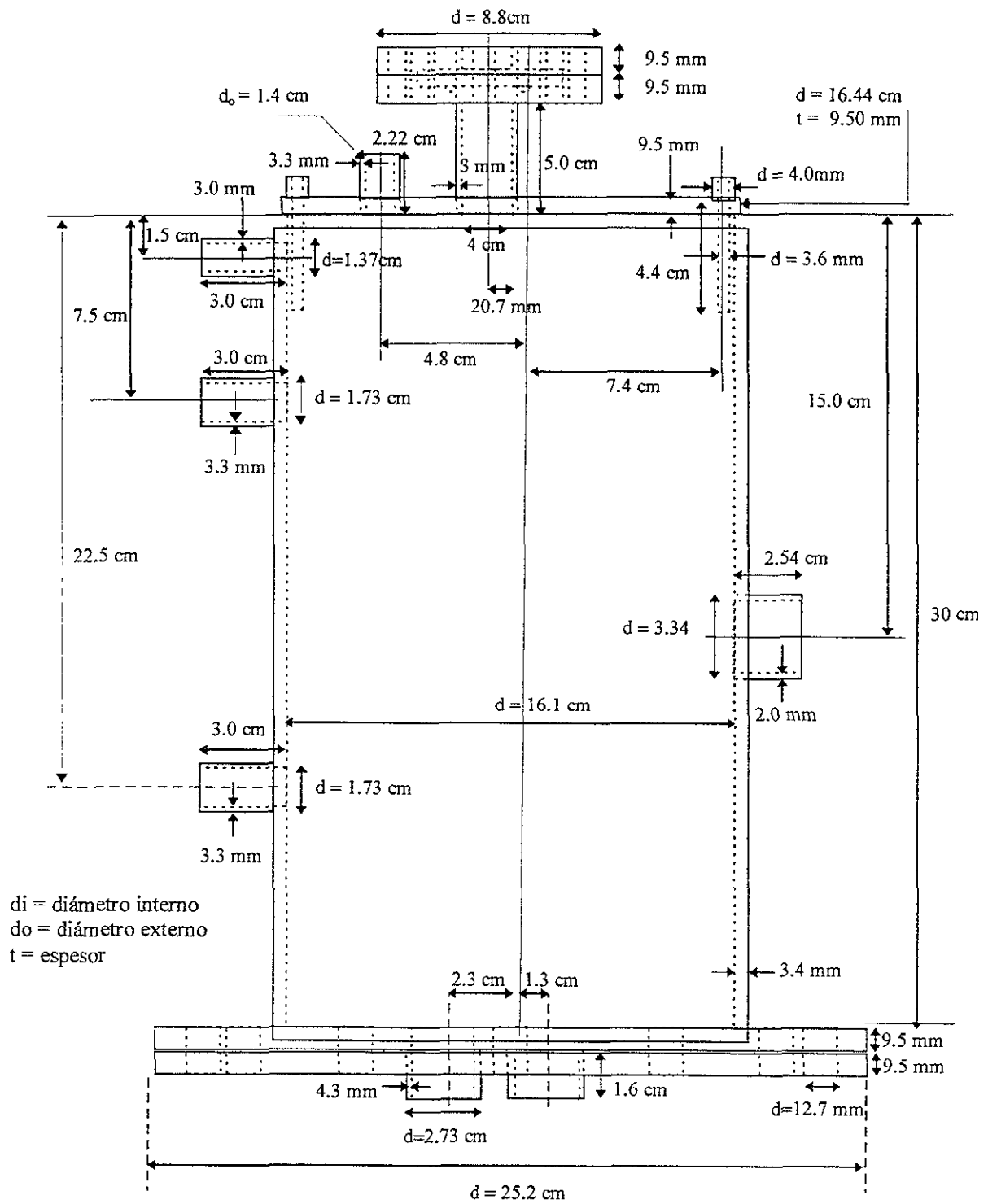
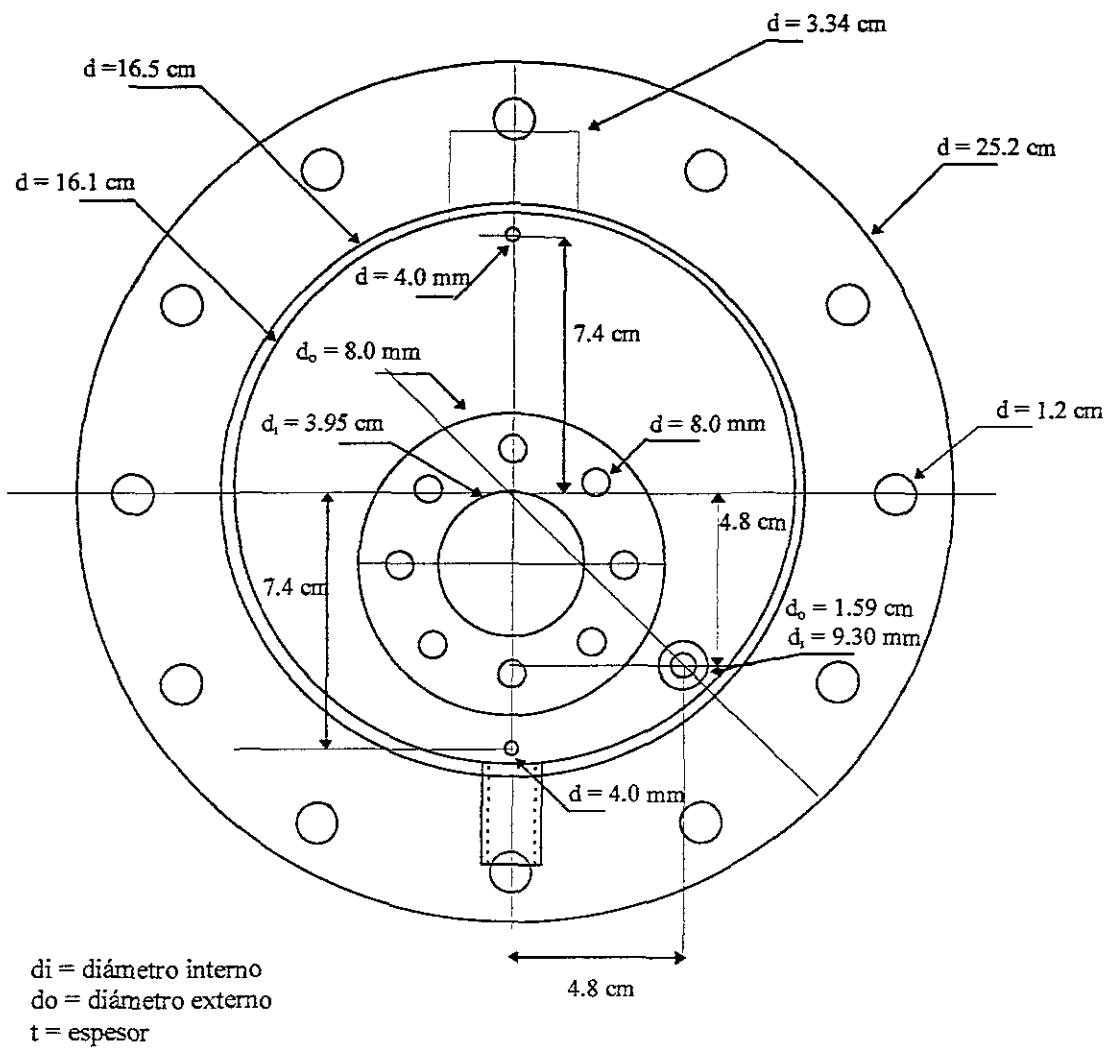
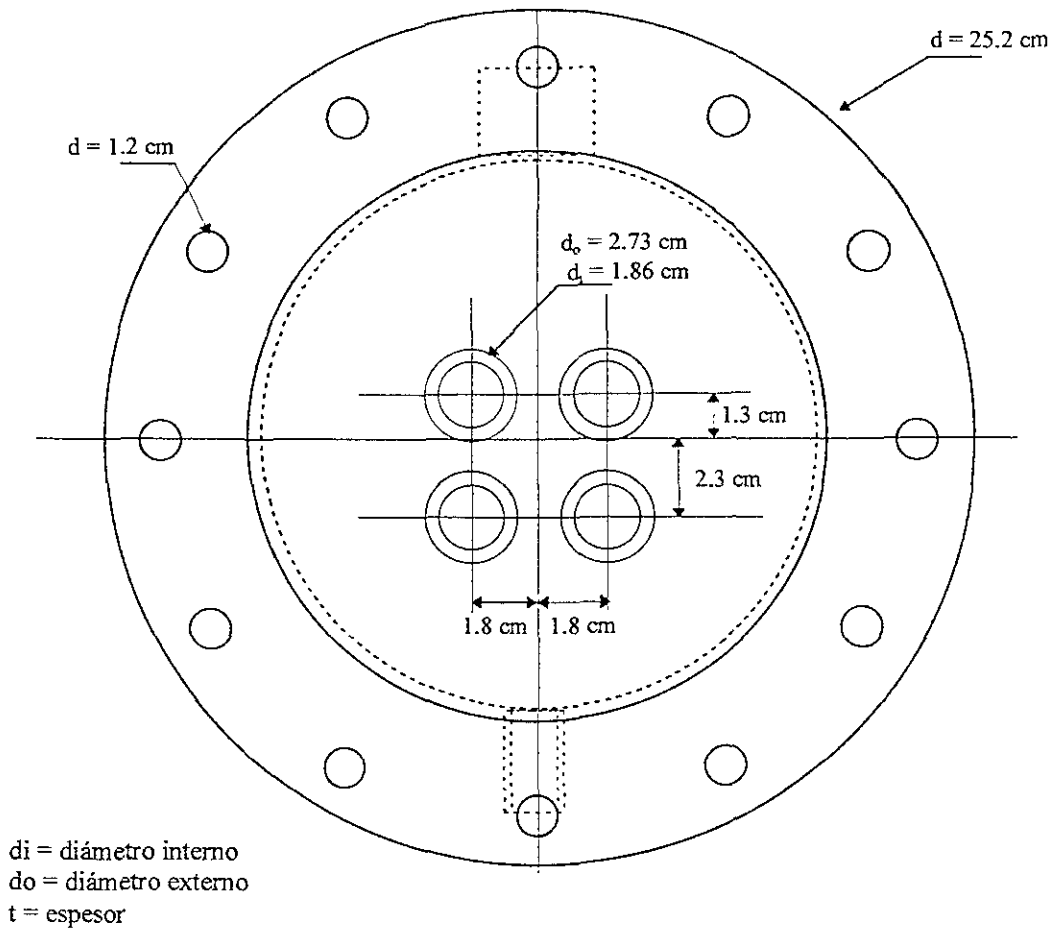


Figura 3.2 Vista lateral del diseño del generador



scale 1:2

Figura 3.3 Vista frontal del diseño del generador



scale 1:2

Figura 3.4 Vista posterior del diseño del generador

## EVAPORADOR

En este componente se cambia de fase al fluido de trabajo de líquido a vapor saturado, mediante la alimentación de calor a una temperatura intermedia relativa (ver figura G.4).

El evaporador es similar al generador: inundado y en el que el fluido de trabajo se calienta por medio de resistencias eléctricas de tipo cartucho.

Este componente, así como el generador se ha fabricado en tipo acero inoxidable 316 y puede operar con o sin resistencias eléctricas inmersas.

Las características de construcción del evaporador son iguales a las del generador, con la excepción que este componente tiene sólo tres coples en su cuerpo cilíndrico en lugar de los cuatro como en el caso del generador. Uno de estos conectores sirve para conectar este componente con el fondo del condensador y que es por dónde circula el fluido de trabajo en fase líquida, proveniente del condensador. El segundo conector sirve para dirigir al fluido de trabajo en fase vapor al absorbedor. El tercer conector sirve para drenar el fluido de trabajo en los casos de limpieza del evaporador.

Este componente se ha diseñado para una potencia máxima  $Q_{EV}$  de 2.0 kW y para un almacenamiento máximo de fluido de trabajo de 6 kg a las condiciones de diseño.

La potencia proporcionada a las resistencias eléctricas puede ser controlado a través de un regulador de corriente alterna similar al utilizado en el generador.

La tabla 3.3 lista los parámetros de diseño del evaporador así como su instrumentación requerida.

Parámetro	Vapor del fluido de trabajo	Fluido de trabajo en fase líquida
Temperatura (°C)	90	32
Presión (Bar)	0.7	0.7
Entalpía (kJ/kg)	2665.0	134.2
Flujo (kg/s)	0.0009	0.0009
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	0.45	995
Viscosidad dinámica (MPa s)	0.012	0.769
Potencia (W)	2200 provista por dos resistencias eléctricas de 30 cm de longitud	
Termopares	Tipo T 0.6 mm de diámetro Aislamiento de PVC	
Rotámetros	De 0 a 50 cm <sup>3</sup> /min	
Bomba	Micropump de 3600 rpm para flujos hasta de 151 ml/min	
Amperímetro	Tipo Gancho Amprove ACD-10	

Tabla 3.3 Datos de diseño para el evaporador

Las figuras 3.5 a 3.7 muestran los planos de diseño en vista lateral, vista frontal y vista posterior respectivamente con dimensiones del evaporador diseñado.

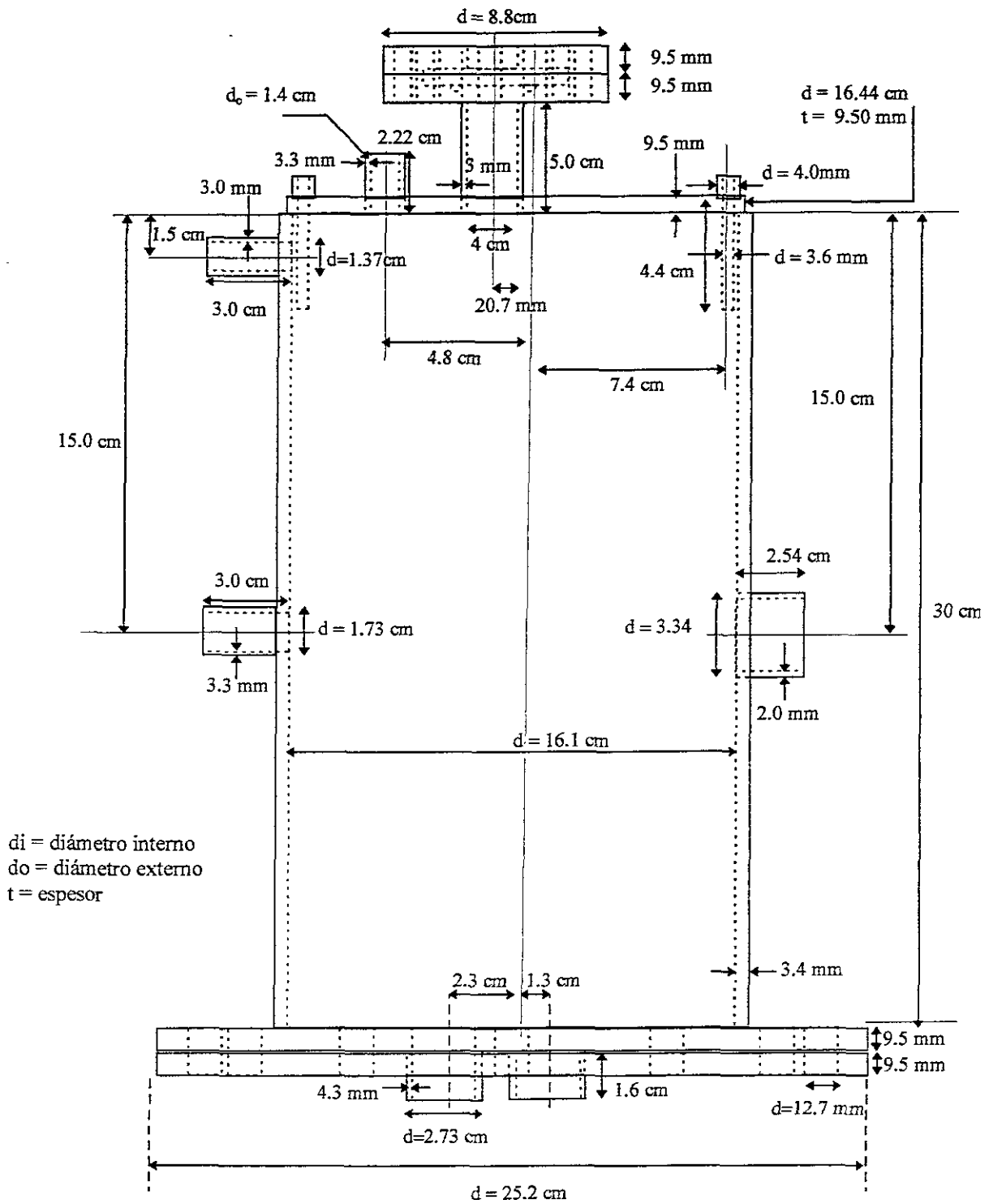


Figura 3.5 Vista lateral del diseño del evaporador.



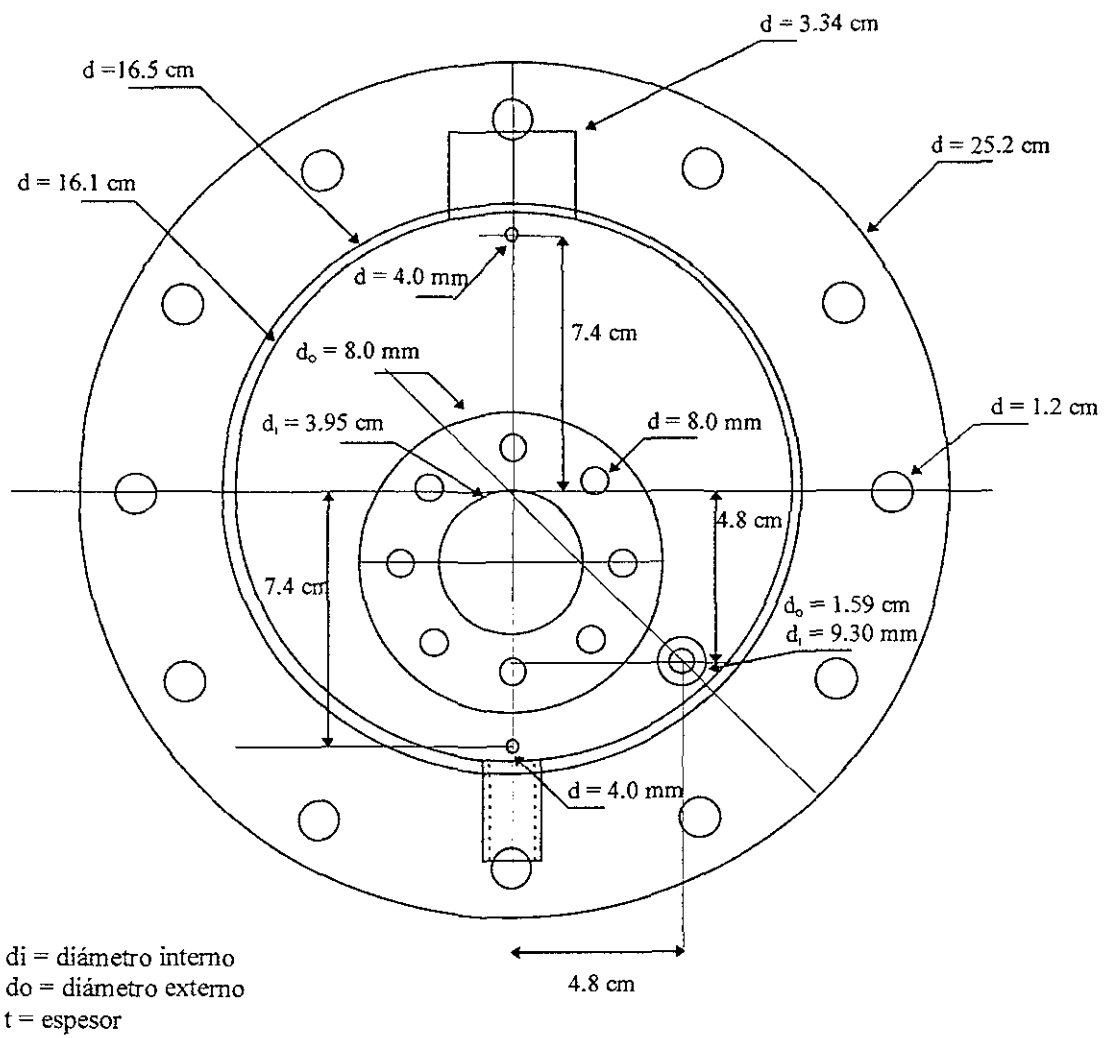
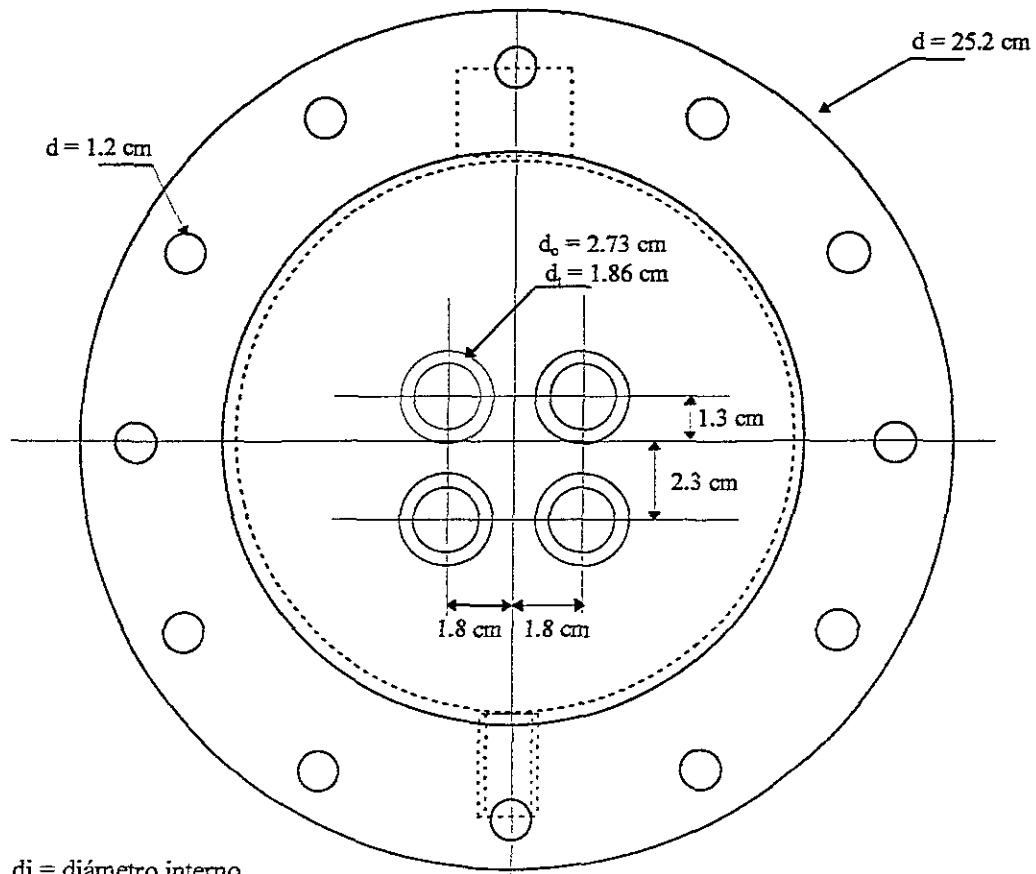


Figura 3.6 Vista frontal del diseño del evaporador



$d_i$  = diámetro interno  
 $d_o$  = diámetro externo  
 $t$  = espesor

scale 1:2

Figura 3.7 Vista posterior del diseño del evaporador.

## CONDENSADOR

Este componente tiene la función de cambiar de fase vapor al fluido de trabajo a fase líquida. Para esto, se retira calor y se intercambia con el ambiente (ver figura G.4) mediante el uso de un sistema auxiliar de enfriamiento (ver figura B.3 en el apéndice B).

El condensador se construyó como un intercambiador de calor de coraza y tubo. Este intercambiador de calor tiene un tubo enrollado en la parte interior del condensador. En este tubo circula agua por su parte interna para retirar el calor latente del fluido de trabajo. Este componente, como los otros se construyó en acero inoxidable 316. Está construido con forma cilíndrica vertical, con un diámetro externo de 16.7 cm y una longitud de 60 cm, con una brida en la parte superior y una tapa cilíndrica en su fondo. Dentro del cuerpo cilíndrico se colocó un tubo enrollado con una área de transferencia de calor total de  $0.21 \text{ m}^2$ . Se le colocó un cople para conectar la parte lateral de su cuerpo cilíndrico con el generador, en dónde pasa el fluido de trabajo en fase vapor y se colocó otro cople en la base del condensador, por dónde pasa el fluido de trabajo en fase líquida hacia el evaporador. A este equipo también se le construyó y adosó una mirilla para poder observar la cantidad de fluido de trabajo que se acumula. Similarmente a los demás componentes se le colocaron termopozos a diferentes alturas para poder realizar mediciones de temperatura. Se requirió de un segundo cople en la base del condensador para colocar una válvula de aguja, con la cual se realiza el ingreso del fluido de trabajo y drenado del equipo. En la brida ciega hay cuatro coples: dos de ellos sujetan el serpentín del sistema auxiliar de enfriamiento en su entrada y salida. El tercero sirve para colocar un vacuomanómetro para medir la presión dentro del componente y el último conector sirve para conectar una válvula que conduce a las líneas del vacío.

Este componente se ha diseñado para operar con una potencia máxima  $Q_{CO}$  de 2.0 kW y con un almacenamiento máximo de fluido de trabajo de 3 kg a las condiciones de diseño.

Para calcular el área de transferencia de calor requerida para el condensador, se utilizó un coeficiente global de transferencia de calor de  $1500 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . Este valor fue tomado de la literatura [Holmberg, 1988], para el diseño de condensadores y evaporadores para transformadores de calor por absorción que operan con la mezcla de bromuro de litio - agua. El valor propuesto representa el valor medio entre valores experimentales [Huntley, 1983;

Furakawa, 1987] para los condensadores de película descendente horizontales y verticales respectivamente.

Debido a la condición de saturación en la salida del condensador, la potencia de condensador  $Q_{CO}$  está compuesta de dos partes: de calor sensible  $Q_s$  para llevar el fluido del trabajo condiciones de saturación y el calor de vaporización (calor latente)  $Q_l$ , que se requiere retirar del vapor saturado del fluido de trabajo para cambiar a fase líquida al fluido de trabajo.

$$Q_{CO} = Q_s + Q_l \quad (3.4)$$

A partir de un balance de energía en estado de equilibrio y usando las condiciones de diseño, las potencias de calor sensible y latentes pueden estimarse de las ecuaciones (3.5) y (3.6) respectivamente:

$$Q_s = MC_p \Delta T = 194 \text{ W} \quad (3.5)$$

$$Q_l = Q_{CO} - Q_s = 1806 \text{ W} \quad (3.6)$$

donde los valores  $Q_s$  y  $Q_l$  representan 9.7 y 90.3% del total de la potencia del condensador respectivamente. Por lo tanto, usando la ecuación (3.2) se puede determinar el  $\Delta T_{lm}$  y considerando los valores del porcentaje de  $Q_s$  y  $Q_l$ , el  $\Delta T_{lm}$  en equilibrio puede estimarse como:

$$\Delta T_{lm} = 23.74 * 0.097 + 4.4 * 0.903 = 6.28 \quad (3.7)$$

Por consiguiente, el área de transferencia de calor requerida por el condensador puede ser estimada usando la ecuación (3.1) como:

$$A = \frac{Q}{U \Delta T_{lm}} = \frac{2000 \text{ W}}{1500 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K} * 6.28 \text{ K}} = 0.21 \text{ m}^2 \quad (3.8)$$

qué para una tubería de acero inoxidable de 9.5 mm (3/8") de diámetro externo, corresponde a un serpentín con un diámetro interior de 10.32 cm (4") y 20 vueltas consecutivas.

La tabla 3.4 lista todos los parámetros de diseño del condensador así como su instrumentación requerida.

Parámetro	Agua que entra	Agua que sale	Vapor del fluido de trabajo	Fluido de trabajo en fase líquida
Temperatura (°C)	26	29	90	32
Presión (Bar)	1.0	1.0	0.05	0.05
Entalpía (kJ/kg)	109.2	120.7	2665.0	134.2
Flujo (kg/s)	0.167	0.167	0.0009	0.0009
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	998	997	0.45	995
Viscosidad dinámica (MPa s)	0.870	0.805	0.012	0.769
Potencia (W)	2200			
Coefficiente global de transferencia de calor (W/m <sup>2</sup> K)	1500			
Area de transferencia de calor (m <sup>2</sup> )	0.21			
Termopares	Tipo T 0.6 mm de diámetro Aislamiento de PVC			
Rotámetros	De 0 a 50 cm <sup>3</sup> /min De 0 a 5 GPM			
Bomba	Micropump de 3600 rpm para flujos hasta de 151 ml/min			
Vacuomanómetro	De 30 inHg a 30 psi			

Tabla 3.4 Datos de diseño para el condensador

Las figuras 3.8 a 3.10 muestran los planos de diseño en vista lateral, vista superior y vista inferior respectivamente con dimensiones del condensador diseñado

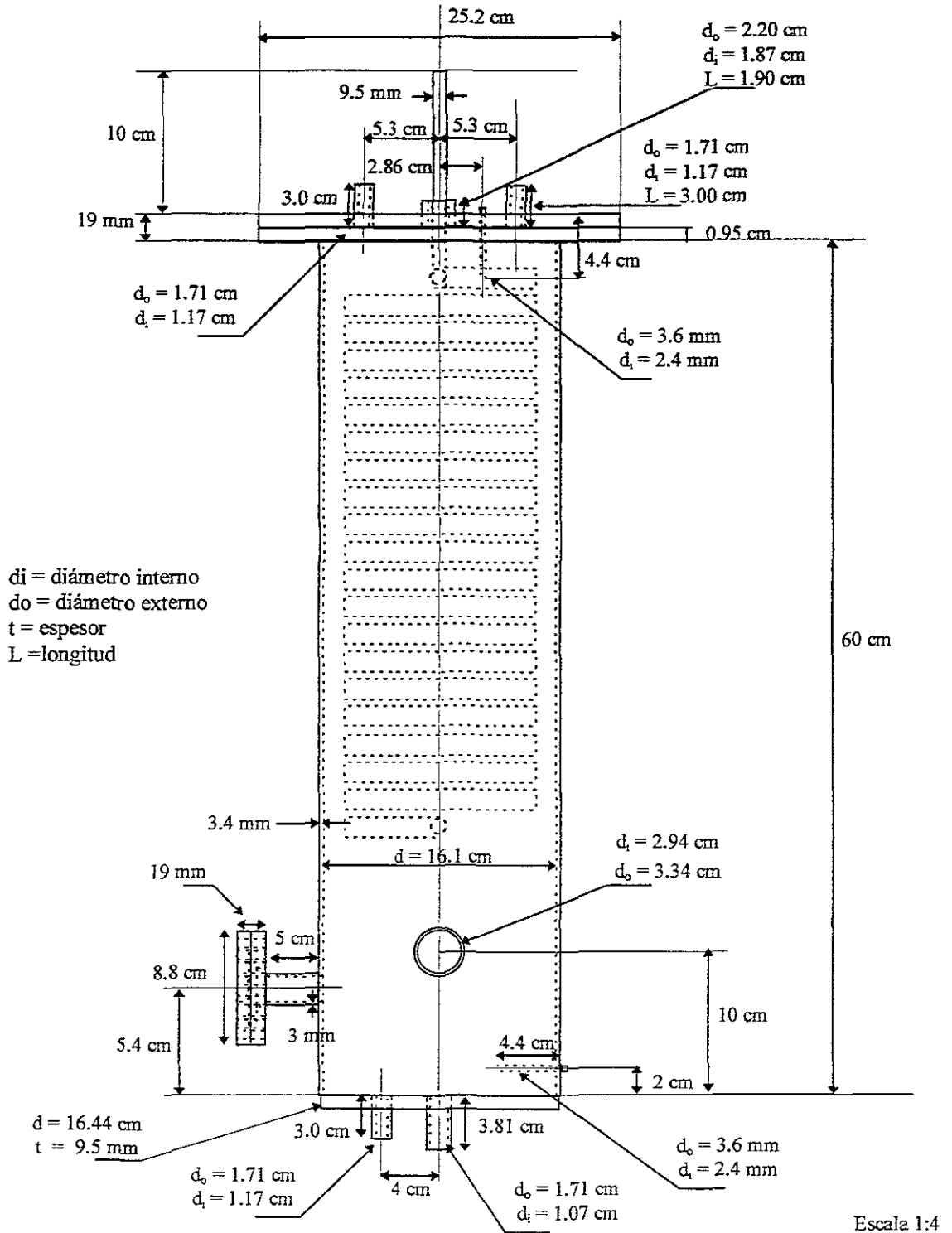
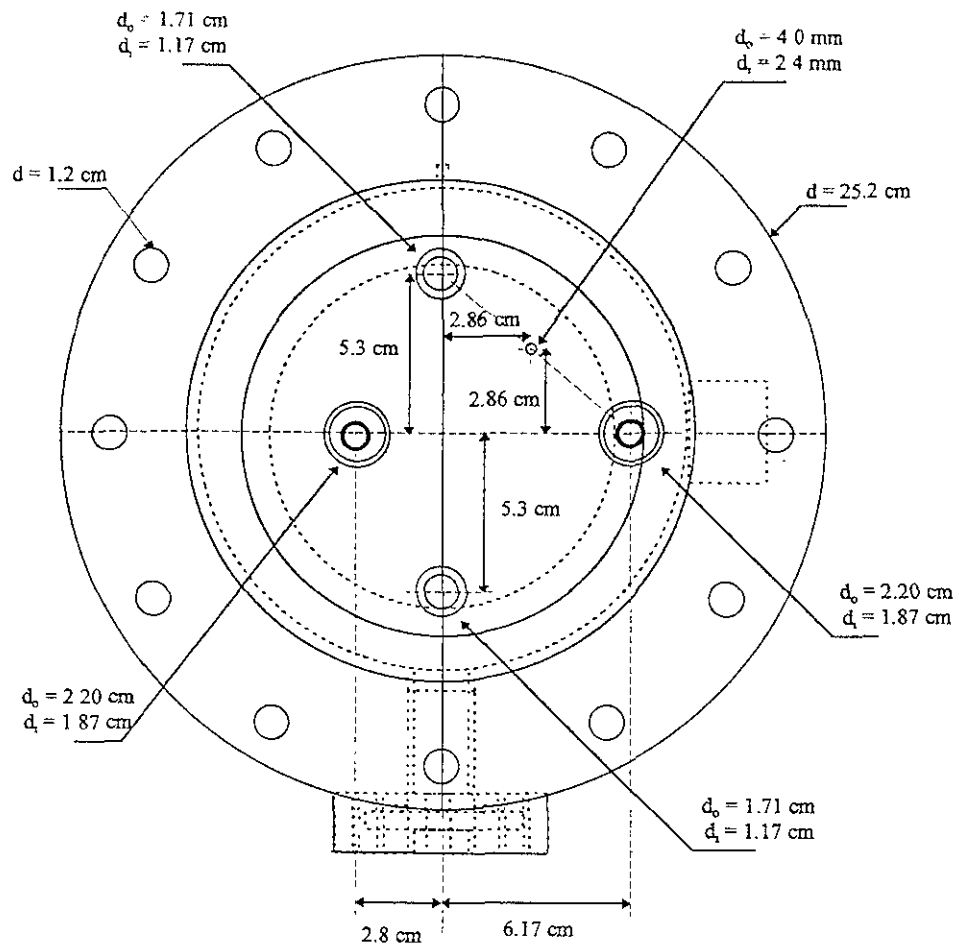


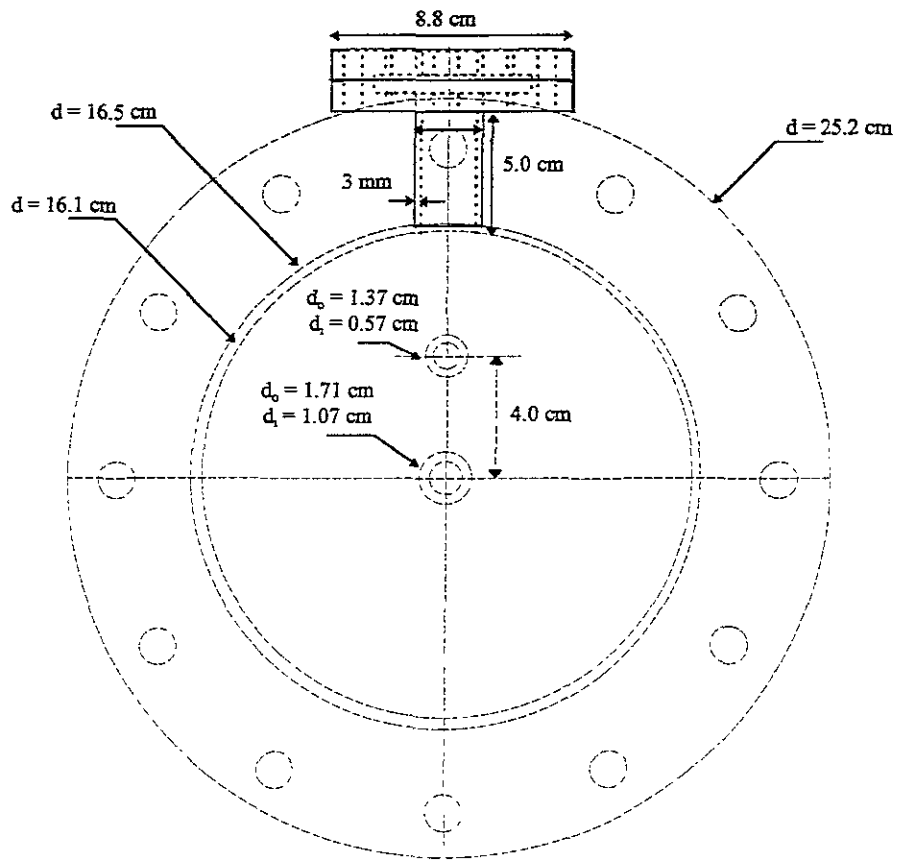
Figura 3.8 Vista lateral del diseño del condensador.



$d_i$  = diámetro interno  
 $d_o$  = diámetro externo  
 $t$  = espesor

scale 1.2

Figura 3.9 Vista superior del diseño del condensador.



$d_i$  = diámetro interno  
 $d_o$  = diámetro externo  
 $t$  = espesor

scale 1:2

Figura 3.10 Vista inferior del diseño del condensador



## ABSORBEDOR

Este componente tiene la función principal de liberar el calor útil con un nivel de temperatura mayor al proporcionado en el generador y en el evaporador, por la absorción del vapor del fluido de trabajo proveniente del evaporador en una solución concentrada de absorbente proveniente del generador.

El absorbedor se construyó como un intercambiador de calor de coraza y tubos. El intercambiador de calor es un serpentín en el que el aceite fluye a través de la parte interior y retira calor. El efecto de la absorción del fluido de trabajo en la solución concentrada de absorbente se realiza sobre la pared exterior del serpentín. Este componente como los otros se fabricó acero inoxidable 316.

El absorbedor se construyó como un intercambiador de calor, de coraza vertical con un diámetro externo de 16.7 cm y una longitud de 70 cm con una brida en la parte superior y una tapa cilíndrica en su fondo. Dentro del cuerpo cilíndrico se colocó un serpentín con una área de transferencia de calor total de 0.39 m<sup>2</sup>. Adicionalmente se le colocó un distribuidor de solución con una abertura cilíndrica 3 mm ancho sobre el rollo para formar una película delgada de la solución concentrada de absorbente a lo largo y ancho del serpentín. También, se le colocó una cople para fijar al distribuidor sobre el serpentín, este conector recibe la solución concentrada de absorbente proveniente del generador. Requiere de otros coples, uno lateral por donde pasa el fluido de trabajo en fase vapor proveniente del evaporador y otro conector en la base de la coraza para la salida de la solución diluida formada.

Similar a los demás componentes se le construyó y colocó una mirilla para observar la cantidad de la solución diluida acumulada. En su parte superior e inferior hay dos termopozos para realizar mediciones de temperatura. En la tapa del fondo, hay dos conectores para tubería. Uno de estos sirve para conectar este componente con el generador (a través del intercambiador de calor entre generador y absorbedor denominado economizador) por donde circula solución diluida. El segundo cople de la base tiene un conector sellado tipo cromatógrafo para realizar extracciones de solución y determinar su concentración. En la brida ciega, hay cuatro coples. Dos de estos sujetan al serpentín interno del absorbedor (uno para la entrada y otro para la salida). El tercer cople sirve para colocar un vacuomanómetro que mide la presión

interna del absorbedor y el último cople sirve para acoplar al sistema auxiliar de vacío.

Este componente se ha diseñado para operar con una recuperación de calor máxima  $Q_{AB}$  de 1.8 kW y un almacenamiento de la solución diluida máximo de 3.5 kg a las condiciones de diseño.

Para calcular el área de transferencia de calor requerida para el absorbedor se utilizó un coeficiente global de transferencia de calor de  $210 \text{ W/m}^2\text{°C}$ . Este valor es 20% menor de los valores reportados [Serpente, 1993], para un serpentín en la coraza de un absorbedor que es parte de una bomba de calor de 2 kW operada con la mezcla de bromuro de litio - agua. La decisión para reducir el coeficiente global de transferencia de calor se tomó basándose en la relación de viscosidad que es más alta para la mezcla del Carrol - agua comparada con la mezcla bromuro de litio - agua.

Por lo tanto, usando la ecuación (3.3) se puede determinar el  $\Delta T_{lm}$  en flujo paralelo. Y usando el coeficiente global de transferencia de calor propuesto, el área de transferencia de calor requerida por el absorbente puede ser estimada usando ecuación (3.1) como:

$$A = \frac{Q}{U\Delta T_{lm}} = \frac{1800 \text{ W}}{210 \text{ W/m}^2\text{K} * 21.6 \text{ K}} = 0.39 \text{ m}^2 \quad (3.9)$$

qué para una tubería de acero inoxidable de 9.5 mm (3/8") de diámetro externo, corresponde a un serpentín con un diámetro interior de 10.32 cm (4") y 38 vueltas consecutivas.

La tabla 3.5 lista todos los parámetros de diseño del absorbedor así como su instrumentación requerida.

Parámetro	Aceite que entra	Aceite que sale	Solución conc.	Solución diluida	Fluido de trabajo
Temperatura (°C)	26	29	90	108	90
Presión (Bar)	1.0	1.0	0.05	0.05	0.05
Concentración (%w)	0	0	73.8	69.3	
Entalpía (kJ/kg)	109.2	120.7	219.8	246.4	2665.0
Flujo (kg/s)	0.167	0.167	0.0133	0.0142	0.0009
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	998	997	1.597	1.507	0.45
Viscosidad dinámica (MPa s)	0.870	0.805	8.016	4.243	0.012
Potencia (W)	1800				
Coefficiente global de transferencia de calor (W /m <sup>2</sup> K)	210				
Area de transferencia de calor (m <sup>2</sup> )	0.39				
Termopares	Tipo T 0.6 mm de diámetro Aislamiento de PVC				
Rotámetros	De 0 a 1400 cm <sup>3</sup> /min (2)				
Bomba	Micropump de 3600 rpm para flujos hasta de 151 ml/min				
Amperímetro	Tipo Gancho Amprove ACD-10				

Tabla 3.5 Datos de diseño para el absorbedor

Las figuras 3.11 a 3.13 muestran los planos de diseño en vista frontal, vista superior y la vista inferior respectivamente con dimensiones del absorbedor diseñado.

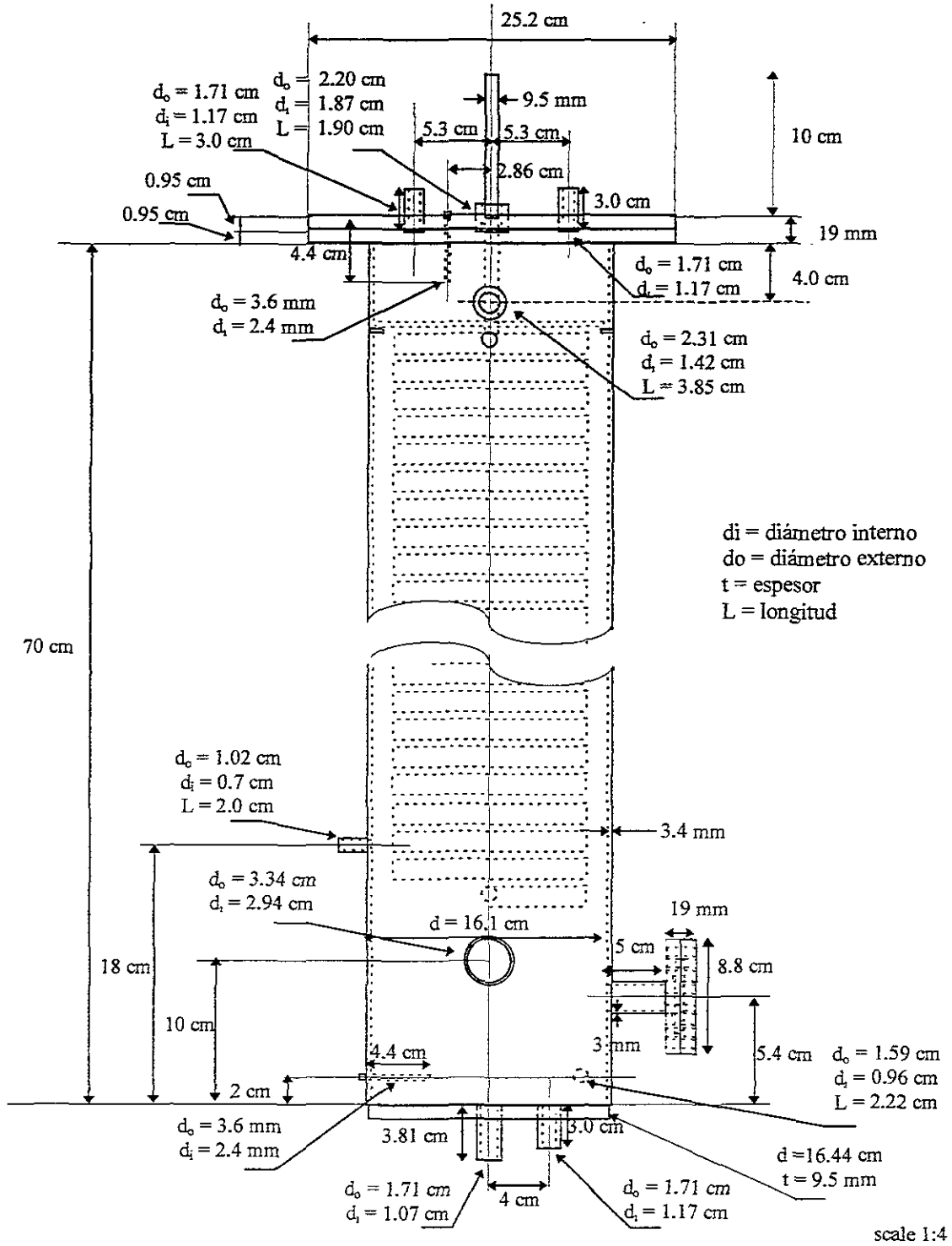
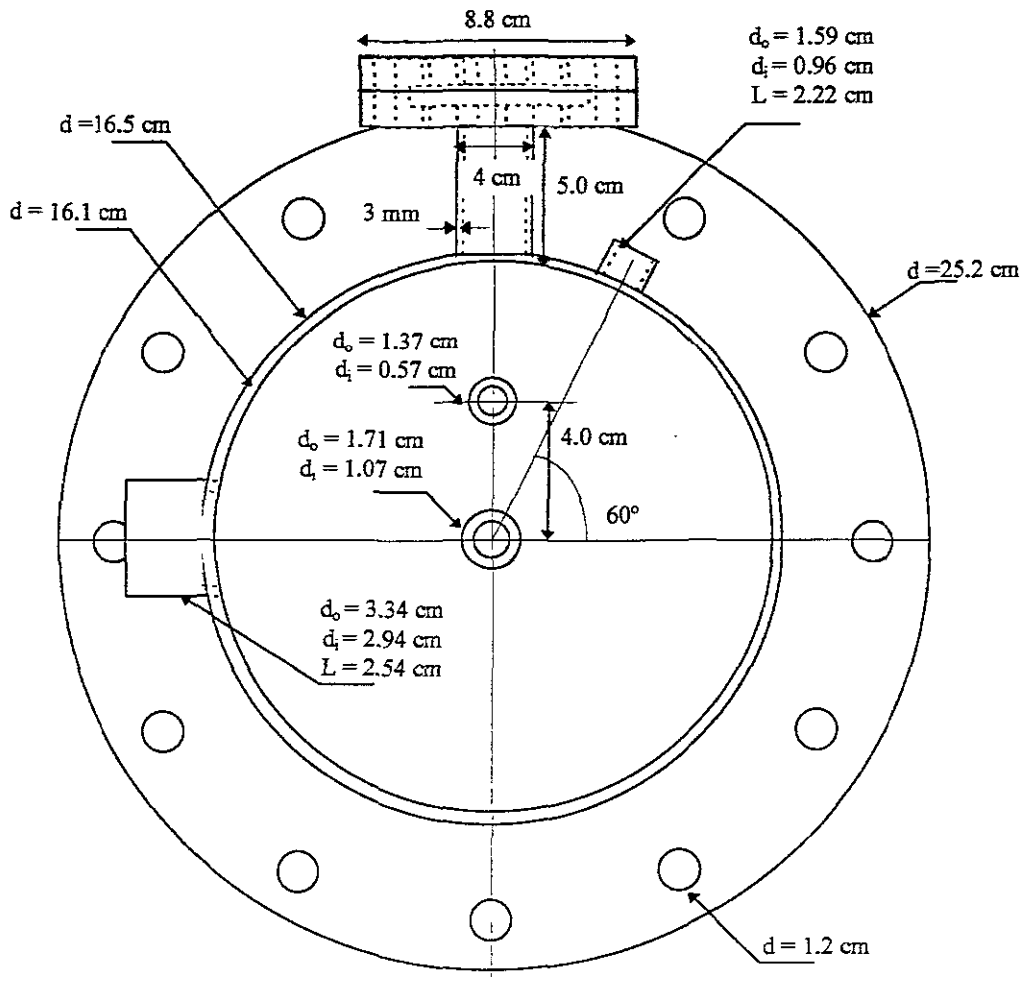


Figura 3.11 Vista frontal del diseño del absorbedor.





$d_i$  = diámetro interno  
 $d_o$  = diámetro externo  
 L = longitud

scale 1:2

Figura 3.13 Vista inferior del diseño del absorbedor.

## ECONOMIZADOR

El economizador se usa para recuperar energía internamente en el ciclo del TTA. En particular, el economizador precalienta la solución concentrada de absorbente que va del generador al absorbedor, usando el calor proporcionado de la solución diluida proveniente del absorbedor y que va hacia el generador.

Este componente se construyó para operar con una potencia máxima  $Q_{EC}$  de 850 W. Se ha diseñado básicamente como un intercambiador de calor de tubos concéntricos en que los flujos de la solución diluida circula por la parte interior del tubo interno de 9.5 mm (3/8" nominal) de diámetro externo, mientras que el flujo de la solución concentrada en absorbente circula a través de la sección anular (entre la pared exterior del tubo interno y la pared interior del tubo externo). El tubo externo tiene 12.7 mm (1/2" nominal) de diámetro. Este componente como los otros componentes principales se fabricó en acero inoxidable 316.

El coeficiente global de transferencia de calor para el economizador es de 530  $W/m^2\text{°C}$  y fue determinado usando la ecuación de Dittus-Boelter y considerando que el coeficiente global de transferencia de calor está basado en las resistencias de:

- (i) la solución diluida fluye dentro del tubo interno,
- (ii) la solución concentrada de absorbente fluye a través de la sección anular, y
- (iii) la resistencia de pared de tubo [Pitts, (1977)].

Usando la ecuación (3.2) para determinar el  $\Delta T_{lm}$  en contracorriente y usando el coeficiente global de transferencia de calor calculado, el área de transferencia de calor requerida por el economizador puede ser estimada usando ecuación (3.1) como

$$A = \frac{Q}{U\Delta T_{lm}} = \frac{850 \text{ W}}{530 \text{ W/m}^2\text{K} * 13.6 \text{ K}} = 0.12 \text{ m}^2 \quad (3.10)$$

qué para una tubería de acero inoxidable de 9.5 mm (3/8") de diámetro externo, corresponde a un serpentín con un diámetro interior de 14.1 cm y 8 vueltas sucesivas.

La tabla 3.6 lista todos los parámetros de diseño del economizador así como su instrumentación requerida.

Parámetro	Sol. conc. que entra	Sol. conc. que sale	Sol. diluida que entra	Sol. diluida que sale
Temperatura (°C)	90	140	150	108
Presión (Bar)	0.7	0.7	0.7	0.7
Concentración (%w)	73.8	73.8	69.3	69.3
Entalpía (kJ/kg)	219	327.5	317.2	246.4
Flujo (kg/s)	0.0133	0.0133	0.0142	0.0142
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	1597	1532	1478	1507
Viscosidad dinámica (MPa s)	8.016	3.484	3.162	4.243
Potencia (W)	850			
Coefficiente global de transferencia de calor (W / m <sup>2</sup> K)	530			
Area de transferencia de calor (m <sup>2</sup> )	0.12			
Termopares	Tipo T 0. 6 mm de diámetro Aislamiento de PVC			
Rotámetros	De 0 a 1400 cm <sup>3</sup> /min (2)			
Bomba	Micropump de 3600 rpm para flujos hasta de 151 ml/min Micropump de 3600 rpm para flujos hasta de 1152 ml/min			

Tabla 3.6 Datos de diseño para el intercambiador de calor (economizador)

## VÁLVULAS Y TUBERÍA

Para la conexión del TTA se utilizaron mangueras para coples y niples, tubería y tubings. Debido a que los valores de flujo másico son relativamente bajos (menores a 1000 g/min) los diámetros de tubería son pequeños: para el caso de soluciones se requiere tubing de 3/16" y dada la corrosividad [Krueger, 1964] de las soluciones de bromuro de litio se utilizó acero inoxidable 316.

En lo que respecta a válvulas, se utilizaron válvulas de aguja con bonete integral de alta precisión en acero inoxidable 316 marca Whitey – Swagelok,



para temperaturas de operación menores a 350 °C y presiones hasta de 3 kg/cm<sup>2</sup>, con conectores a la entrada y salida para tubings de 9.5 mm (3/8”).

La interconexión de los componentes se realizó con mangueras Aeroquip para baja presión. Estas mangueras tienen un tubo interior de caucho sintético, un refuerzo de una trenza textil y una cubierta de caucho sintético (que evita la deformación en el caso de presiones menores a la presión atmosférica) acopladas a la tubería con abrazaderas en acero al carbón. Estas mangueras soportan temperaturas entre -40 y 93 °C y presiones hasta de 18 kg/cm<sup>2</sup>.

## **MATERIALES Y AISLANTES**

Con el objeto de evitar problemas de corrosión [Krueger, 1964] en el transformador de calor, se utilizó acero inoxidable tipo 316 tanto en los componentes principales, como en la tubería válvulas y conexiones.

La mayoría de las uniones son soldadas a los recipientes, sin embargo, en algunas partes como en las bridas de los tanques o de las mirillas, se utilizaron sellos hechos de viton para resistir altas temperaturas. La parte restante de uniones se realiza por medio de las bridas.

El vidrio utilizado en las mirillas es de tipo templado.

La tubería del sistema auxiliar de vacío son de cobre y controladas con válvulas de bronce, ya que no están expuestas en ningún momento con las soluciones diluida o concentrada de bromuro de litio.

Para las líneas del sistema de enfriamiento se utilizó manguera para agua.

Para las líneas que conectan el sistema auxiliar de recuperación de calor se utilizó tubería de acero inoxidable tipo 316 de 9.5 mm de diámetro externo y manguera de neopreno para altas temperaturas.

Para aislar térmicamente los componentes y la tubería, se utilizó un aislante compuesto de elastómero expandido, para temperaturas de operación entre -57 y 104°C. Este aislante fue colocado en las tuberías y como coraza de los todos los componentes del transformador térmico por absorción de una etapa. Este aislante tiene un espesor de 19 mm con una conductividad térmica de 0.039 w/m°K para la temperatura del ambiente (32°C). Las corazas de los componente y las tuberías de aislante sobre las tuberías de inter-conexión de los mismos fueron sujetas con cinta aislante 3M resistente a las temperaturas de operación del equipo. Este aislante está especificado en el catálogo de Aislantes Minerales de México, en la sección AP Armaflex – Armstrong.

## **SISTEMAS AUXILIARES**

Los sistemas auxiliares primordiales en la operación del transformador de calor de una etapa son:

- el sistema de enfriamiento,
- el sistema de vacío y
- el sistema de recuperación de calor.

### **Sistema de enfriamiento**

El sistema auxiliar de enfriamiento es utilizado para condensar el vapor del fluido de trabajo que entra al condensador. El sistema consiste de dos cisternas externas a la instalación del transformador térmico por absorción de una etapa y cada una de ellas cuenta con volúmenes de 12 y 36 m<sup>3</sup> de capacidad para agua. Estas cisternas están acopladas a un sistema hidroneumático, un rotámetro, válvulas, tubería y mangueras.

El agua almacenada en una de las cisternas con el volumen de 12 m<sup>3</sup> es suministrada mediante el sistema hidroneumático y conducida mediante la tubería y las válvulas a la entrada del condensador, pasando a través del rotámetro para conocer el flujo del agua de enfriamiento que retira el calor producido por la condensación del vapor del fluido de trabajo. El agua de enfriamiento que fluye por la parte interna del serpentín del condensador condensa el vapor del fluido de trabajo sin estar en contacto con el fluido de trabajo. El agua a la salida del condensador con una temperatura ligeramente mayor a la temperatura de la cisterna se dirige hacia la segunda cisterna. El flujo de agua se regula a través de una válvula de compuerta de bronce de ½" para presiones menores a 13 kg/cm<sup>2</sup>.

### **Sistema de recuperación de calor**

Después de simular el comportamiento del transformador térmico por absorción de una etapa por medio de la computadora, se pudo determinar el intervalo de temperaturas en que opera el absorbedor, por lo que se diseñó un sistema auxiliar de recuperación de calor para poder evaluar la cantidad de energía revalorizada con este equipo.

Los componentes principales del sistema de recuperación de calor son:

- un tanque de calentamiento con regulación de temperatura un fluido térmico,
- un serpentín en la parte interior del absorbedor,
- una válvula,
- tubería de acero inoxidable,
- mangueras para altas temperaturas y
- un serpentín de acero inoxidable externo al absorbedor.

Se requiere de un tanque de calentamiento que mantenga a una temperatura constante el fluido térmico, (este equipo tiene control de temperatura de  $\pm 0.5$  °C y cuenta con una bomba integrada marca Polystat, más especificaciones en el Catálogo Cole-Parmer 1999-2000 modelo E-12105-30). El fluido que se calienta en este caso no puede ser agua, debido al intervalo de temperaturas de operación con el consecuente cambio de fase, por lo que se utilizó aceite térmico marca Multitherm PG-1 (que no presenta degradación a las temperaturas de operación del equipo y con capacidad calorífica a presión constante de 2090 J/kg/°K).

El aceite térmico es calentado y controlado a una temperatura determinada en el interior del tanque de calentamiento y posteriormente bombeado desde la tubería de acero inoxidable de la bomba hacia el serpentín interno del absorbedor a un flujo que depende de la temperatura a la cual ingresa a la bomba.

La densidad y viscosidad del aceite térmico hacen que el flujo aumente proporcionalmente con respecto a los incrementos de su temperatura.

El aceite térmico ingresa al serpentín que se encuentra en el interior del absorbedor, en dónde se lleva a cabo el proceso de absorción con liberación de calor, este calor útil a temperatura mayor que la temperatura del aceite cede calor al serpentín (suponiendo que el serpentín interior y el aceite tienen la misma temperatura) y finalmente incrementa la temperatura del aceite térmico hasta salir del absorbedor. Los valores de la temperatura del aceite térmico a la entrada y salida del serpentín del absorbedor se registran cada 5 segundos.

El aceite térmico, después de circular por el serpentín se conduce a un baño térmico, por medio de mangueras, que están construidas con un tubo interior de elastómero AQP, refuerzo de dos trenzas de alambre y cubierta de hule sintético, para presiones hasta de 404 kg/cm<sup>2</sup> y temperaturas de operación

entre  $-40$  y  $150$  °C (más especificaciones en el catálogo Aeroquip, bajo el número de parte FC195).

Para el sistema de calentamiento se construyó un serpentín externo al absorbedor e inmerso en el aceite térmico del baño térmico. Este serpentín tiene un área de intercambio de  $0.03$  m<sup>2</sup>, construido en tubing de acero inoxidable 316 sin costura de 3/8" de diámetro. Por este serpentín circula agua de enfriamiento proveniente de la salida del serpentín interior del condensador para evitar la elevación de temperatura que tendría el tanque de calentamiento al ingresar aceite térmico a la temperatura del calor útil proveniente del absorbedor, mayor a la temperatura controlada en el tanque de calentamiento.

### **Sistema de vacío**

El sistema auxiliar de vacío es utilizado para generar el vacío dentro de los componentes y tuberías del transformador térmico por absorción de una etapa.

Los componentes principales del sistema de vacío son:

- una bomba rotatoria de vacío marca Cole Parmer modelo DF-07153-22,
- un juego de válvulas y vacuomanómetros,
- trampas de líquido y
- tubería y manguera para interconectar el condensador y absorbedor a la bomba de vacío.

Este sistema se acciona para dos motivos: el llenado del equipo y el arranque del equipo. En el caso del llenado del equipo, retira todo el aire contenido en los componentes y éstos deberán de permanecer sin variación significativa al menos por 8 horas, en caso contrario, se deberá de localizar y reparar la parte que provoca el ingreso de aire a los componentes.

En el caso de la operación correcta del equipo este sistema no debe de estar en operación, ya que esto hará variar la presión en los componentes del equipo y por lo tanto no se podrá alcanzar un estado de equilibrio termodinámico.

### **CONCLUSIONES**

Se diseñó y construyó un TTA con datos de diseño termodinámico obtenidos con el modelo propuesto en el capítulo 1.

2. Se fijó una temperatura determinada en el tanque de calentamiento del aceite.
3. En una balanza analítica digital se registró la cantidad de peso acumulado por el aceite que pasa a través del serpentín del absorbedor.
4. La lectura que se obtiene de la balanza analítica se registra en una hoja de cálculo de una computadora personal.
5. Los datos registrados se correlacionaron en función del tiempo y la temperatura.
6. Se fija otra temperatura y se siguen los pasos anteriores.

Siguiendo la metodología anterior se determinó la siguiente ecuación que correlaciona el flujo de aceite en función de la temperatura presente en el tanque de calentamiento del sistema de recuperación de calor:

$$M = -4769 + 264.84T - 5.314T^2 + 0.0465T^3 - 0.0001T^4$$

$$R^2 = 0.971$$

Siendo válida para valores de T entre 40 y 150 °C, con M expresada en gramos de aceite por minuto.

### **Calibración de los reguladores de voltaje**

Debido a que no se contaba con la instrumentación necesaria para registrar automáticamente la potencia suministrada al generador y evaporador, se calibraron los reguladores de voltaje para determinar en voltaje entregado por ellos en función de la corriente suministrada. Para ello se fija una corriente, que se mide con un amperímetro de gancho y con un multímetro se mide el voltaje de la corriente, entregado por el regulador para esa corriente. Se siguió el mismo procedimiento para diferentes valores de corriente y se correlacionaron estas variables. Las ecuaciones para cada regulador de voltaje son las siguientes:

Generador  $V = 1.9037 + 7.758I$   
 $R^2 = 0.9998$

Evaporador  $V = 0.6755 + 8.0687I$   
 $R^2 = 0.9995$

en donde  $V$  es el voltaje entregado por el regulador en volts, e  $I$  es la corriente en ampers registrada con el multímetro de gancho.

### **METODOLOGÍA DE OPERACIÓN DEL EQUIPO**

Para operar adecuadamente el transformador de calor se deben seguir estrictamente ciertos procedimientos los cuales se han clasificado en cuatro diferentes rubros, siendo estos:

- (i) llenado del equipo,
- (ii) arranque del equipo,
- (iii) operación correcta del equipo y
- (iv) paro del equipo.

#### **Llenado del equipo**

#### **Ingreso de solución concentrada de absorbente en el generador y absorbedor**

El proceso de llenado de las soluciones al equipo se realiza con la siguiente metodología:

1. Se prepara la solución a la concentración que se desea.
2. Se mide (y ajusta de ser necesario) la concentración con ayuda del refractómetro.
3. Se extrae la mayor cantidad de aire atmosférico del generador para poder ingresar la solución preparada por diferencia de presiones.

4. Se conecta una manguera en la válvula del fondo del generador. Esta manguera puede ya estar conectada al fondo del recipiente en que se tiene la solución concentrada de absorbente preparada en los puntos anteriores.
5. Se permite el paso de la solución preparada hacia la manguera conectada al generador, ya sea por medio de una válvula o en caso de que no se cuente con recipiente conectable en su fondo con manguera se podría sumergir la manguera en la solución preparada.
6. Se abre la válvula a fin de que la solución ingrese al generador.
7. Se cierra la válvula cuando se considere que el nivel en el indicador es adecuado.
8. Se bombea la solución concentrada hacia el absorbedor.
9. Se repiten los pasos anteriores vigilando constantemente los indicadores de nivel para asegurar que no se excede en solución ni haya defecto de ella.
10. Se deja de bombear solución cuando el nivel en el generador y absorbedor sean los adecuados. Considérese que existe un intercambiador de calor entre el generador y el absorbedor que requiere un volumen de solución concentrada y diluida cuando el sistema de absorción está en operación.
11. Se ajustan las presiones del generador y del absorbedor, para evitar que regrese la solución.

### **Ingreso de fluido de trabajo en el condensador y evaporador**

El proceso de llenado del fluido de trabajo al equipo se realiza similarmente al llenado del generador y del absorbedor con la mezcla absorbente – fluido de trabajo. Se puede ingresar el fluido de trabajo con la siguiente metodología:

1. Se extrae la mayor cantidad de aire atmosférico del condensador para poder ingresar el fluido de trabajo a este por diferencia de presión con respecto a la presión atmosférica.
2. Se conecta una manguera en la válvula del fondo del condensador. Esta manguera puede ya estar conectada al fondo del recipiente en que se tiene al fluido de trabajo.

3. Se permite el paso del fluido de trabajo hacia la manguera conectada al condensador, ya sea por medio de una válvula o en caso de que no se cuente con recipiente conectable en su fondo con manguera se podría utilizar un matraz kitasato lleno del fluido de trabajo.
4. Se abre la válvula a fin de que el fluido de trabajo ingrese al condensador.
5. Se cierra la válvula cuando se considere que el nivel en el indicador es adecuado.
6. Se bombea el fluido de trabajo hacia el evaporador.
7. Se repiten los pasos anteriores vigilando constantemente los indicadores de nivel para asegurar que no se excede en solución ni haya defecto de ella.
8. Se deja de bombear el fluido de trabajo cuando el nivel en el condensador y en el evaporador sean los adecuados, considérese el aumento que el nivel del condensador tendrá cuando en el generador se separe el fluido de trabajo del absorbente y también considérese la disminución que tendrá el evaporador cuando esté en operación el absorbedor.
9. Se ajustan las presiones del condensador y del evaporador, para poder iniciar la metodología de arranque.

#### **Arranque de un transformador térmico por absorción de una etapa**

Una vez que se ha cargado el equipo con las soluciones puede procederse al inicio de las operaciones. Para iniciar la operación del equipo, debe seguirse la siguiente metodología:

1. Verificar que no exista fuga o fractura en alguna parte del equipo.
2. Encender los equipos de monitoreo: el adquirente de datos y computadora.
3. Iniciar lecturas y almacenamiento de datos del equipo por medio de la computadora y el programa de adquisición de datos.



4. Comprobar que las presiones internas en ambas zonas del sistema de absorción (condensador – generador y evaporador – absorbedor) son las adecuadas para las condiciones calculadas para la operación del sistema.
5. Ajustar en caso necesario, las presiones internas del equipo a las presiones a las que se desea operar el equipo, utilizando la bomba de vacío y las válvulas para estos fines.
6. Circular agua de enfriamiento hacia el condensador y encender el sistema de recuperación de calor para el absorbedor. En este último fijar la temperatura a la que se desea que el sistema controle el aceite térmico.
7. Encender los controladores de flujo acoplados a las bombas del sistema de absorción.
8. Encender la fuente de potencia para el generador y aumentar gradualmente la potencia.
9. Verificar las concentraciones en generador y absorbedor, con previo encendido el sistema de medición de concentración.
10. Circular solución del absorbedor hacia el generador y solución concentrada del generador al domo del absorbedor.
11. Vigilar el comportamiento de las temperaturas en la zona de condensación para determinar el inicio de la condensación y por lo tanto la concentración de la solución en el generador.
12. Encender la fuente de potencia para el evaporador y aumentar gradualmente la potencia.
13. Verificar que no varíe la temperatura entre el aceite que entra al absorbedor y el que sale del mismo.
14. Determinar por medio de la elevación de temperaturas en el absorbedor la evaporación del fluido de trabajo.
15. Iniciar el bombeo de condensado hacia el evaporador.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA  
FACULTAD DE INGENIERÍA

## **Operación correcta del equipo**

Cuando se ha iniciado la operación del equipo (arranque) se puede operar el equipo de manera continua a fin de alcanzar estabilidad en el proceso. Es necesario lograr estado estable en el proceso a fin de poder demostrar o comprobar condiciones de operación para la sustancia o sustancias que se estén analizando dentro del equipo.

Para poder alcanzar estabilidad es necesario operar adecuadamente el equipo, siguiendo la siguiente rutina de operación para estabilidad:

1. Una vez que se ha iniciado el funcionamiento del equipo conforme la rutina de arranque, debe verificarse que todos los pasos del arranque hayan sido llevados a cabo sin inconveniente.
2. Verificar que las presiones en las zonas del equipo sean las adecuadas.
3. Ajustar a la potencia deseada el generador.
4. Verificar las concentraciones en el generador y absorbedor para asegurar concentración constante dentro de los mismos a lo largo del desarrollo de la operación del transformador térmico.
5. Mantener el bombeo del condensado en forma continua a fin de evitar acumulación excesiva y no visible en el indicador de nivel.
6. Ajustar la potencia del evaporador para evitar la disminución o elevación de nivel del líquido en el mismo.
7. Mantener constantes los flujos de solución.
8. Vigilar continuamente los valores adquiridos y en caso de variaciones no esperadas revisar el equipo, en busca de fugas u otras causas que provoquen dichas variaciones.
9. Revisar desde el punto 2 mientras se opere el equipo.

## Paro del equipo

En el caso de que se desee detener el proceso en el equipo, a fin de evitar accidentes, debe invariablemente seguirse la siguiente metodología de paro:

1. Desconectar las fuentes de potencia del generador y evaporador.
2. En caso de fuga en alguna sección evitar el paso de fluido por ésta, de ser posible cerrar la válvula que conduce fluido hacia la fuga. Si esta fuga impide la circulación entre absorbedor y generador procurar arreglarla en el menor tiempo posible a fin de evitar derrames de solución.
3. Circular solución diluida hacia el generador desde el fondo del absorbedor y circular solución concentrada del generador hacia el absorbedor.
4. Mantener activa la circulación del agua de enfriamiento y disminuir el valor del control de temperatura en el sistema de recuperación de calor hasta que la temperatura del equipo disminuya razonablemente.
5. Apagar las bombas y cerrar las válvulas para evitar que la solución que desciende del absorbedor inunde a éste e ingrese por el ducto que lo conecta con el evaporador.
6. Igualar las presiones del sistema y cerrar todas las válvulas que interconectan las zonas de diferente presión a fin de evitar potencial de flujo entre los componentes.
7. Dependiendo de la concentración, si se considera alta la probabilidad de cristalización en el equipo, absorber agua destilada en el equipo mediante la rutina de llenado o en su defecto drenar el equipo.

Después de realizar correctamente esta metodología de paro, se puede reiniciar la operación del equipo siguiendo las metodologías de llenado, arranque y operación correcta del equipo descritas antes.

## **Referencias**

**Romero R**, Estudio de las mezclas bromuro de litio agua y Carrol - agua en transformadores térmicos por absorción de una etapa, Tesis de maestría en energía solar, UNAM, 1996

**Cardoso M J**, Estudio Teórico y Experimental de Transformadores de Calor por Absorción Operando con la Mezcla Carrol - Agua, Tesis de Maestría, UAEM, Mexico, 1999

**Spiridonov V P**, Lopatkin A A, Tratamiento matemático de datos fisicoquímicos, MIR, MOSCU, 1973

**Krueger R H**, Dockus K F & Rush W F, Lithium chromate: corrosion inhibitor for lithium bromide absorption refrigeration systems, ASHRAE J, Vol 6, pp 40 – 44, February 1964.

## Capítulo 5.- EVALUACIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

### INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de la experimentación realizada en el transformador térmico por absorción de una etapa operando con la mezcla Carrol - agua, así como los procedimientos experimentales, las consideraciones y comparaciones con los datos teóricos esperados para finalizar con las conclusiones de la evaluación del equipo experimental así como de la mezcla utilizada.

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Con el propósito de evaluar el funcionamiento del transformador de calor operando con la mezcla Carrol/agua, se siguieron las metodologías descritas en el Capítulo 4.

Las pruebas experimentales fueron realizadas tomando en cuenta las propiedades termodinámicas de la mezcla Carrol/agua mostradas en el diagrama de equilibrio para dicha mezcla, reportada por Reimann [Reimann, 1984] y mostradas en la Figura 5.1

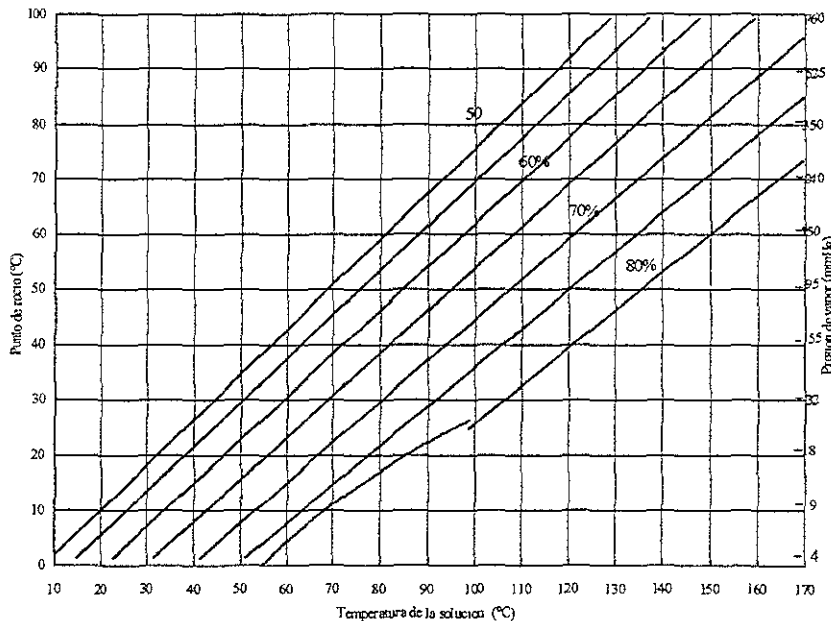


Figura 5.1. Diagrama de equilibrio de la mezcla Carrol/agua<sup>MR</sup>.

A fin de evitar posibles condiciones de cristalización en el interior del transformador térmico por absorción de una etapa, se operó este equipo con diversas concentraciones hasta llegar a una concentración máxima de 72%, lo que dejó un margen de seguridad del 8%.

Para cada experimento se registraron los siguientes parámetros:

Fecha (DMA)	T EV (°C)	T AB (°C)	T GE (°C)	T CO (°C)	QGE (w)	QEV (w)	X AB (adim)	X GE (adim)	RC (%)	M AB->GE (g/min)	M GE->AB (g/min)
	P AB (mHg)	P CO (mHg)	T aceite entrada (°C)	T aceite - salida (°C)	T BA (°C)	M CO (Kg/min)	M EV (g/min)	M aceite (g/min)			

Tabla 5.1. Parámetros observados durante la experimentación

- (i) fecha
- (ii) temperaturas en los principales componentes, agua de enfriamiento y aceite del sistema de recuperación de calor,
- (iii) potencia suministrada en el generador y evaporador,
- (iv) concentraciones de la solución en el generador y absorbedor,
- (v) % de recirculación de solución diluida al absorbedor,
- (vi) flujos máxicos del fluido de trabajo, de las soluciones concentrada y diluida,
- (vii) flujo máxico del agua en el circuito auxiliar del condensador,
- (viii) presión en el absorbedor y en el condensador,
- (ix) temperaturas del aceite a la entrada y salida del sistema de recuperación de calor,
- (x) temperatura inicial del sistema de recuperación de calor.

Para la experimentación se consideró que la condición de estado estable se alcanzaba si los parámetros registrados permanecen sin variación significativa (< 5 %) por un periodo de al menos treinta minutos.

### CONSIDERACIONES TERMODINÁMICAS

Tomando como base la Figura 5.2 y realizando balances de masa y energía en los principales componentes, las siguientes ecuaciones fueron utilizadas para calcular la relación de flujo, el incremento de temperatura, la efectividad del intercambiador, los calores internos y externos de los componentes principales, el calor perdido y el coeficiente de operación para el transformador de calor.

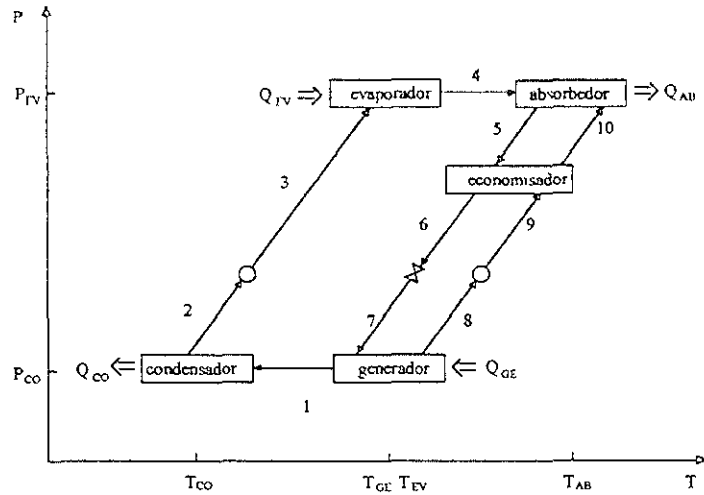


Figura 5.2. Diagrama esquemático de un transformador térmico por absorción de una etapa.

Se define la relación de flujo (FR) como

$$FR = \frac{X_{GE} - X_{WF}}{X_{GE} - X_{AB}} \quad (5.1)$$

ya que el absorbente no se evapora en el rango de temperatura bajo consideración ( $X_{WF} = 0$ ), la relación de flujo (RF) puede ser escrita para esta mezcla como;

$$FR = \frac{X_{GE}}{X_{GE} - X_{AB}} \quad (5.2)$$

El incremento de temperatura ( $\Delta T$  o GTL) para este sistema puede ser estimado como:

$$\Delta T = T_{AB} - T_{EV} \quad (5.3)$$

$$GTL = T_{OIL,LE} - T_{EV,TO} \quad (5.4)$$

Realizando balances de masa y energía, las potencias entálpicas en los principales componentes pueden ser estimadas por las siguientes ecuaciones.

$$Q_{CO,IN} = M_{WF} (H_1 - H_2) \quad (5.5)$$

$$Q_{EV,IN} = M_{WF}(H_4 - H_3) \quad (5.6)$$

$$Q_{GE,IN} = M_{GE}H_8 + M_{WF}H_1 - M_{WE,EN}H_6 \quad (5.7)$$

y

$$Q_{AB,IN} = M_{WF}H_4 + M_{GE}H_{10} - M_{WE,EN}H_5 \quad (5.8)$$

Las potencias extraídas en el condensador ( $Q_{CO,EX}$ ) y absorbedor ( $Q_{AB,EX}$ ) pueden ser calculados por las ecuaciones (5.9) y (5.10) respectivamente.

$$Q_{CO,EX} = M_{WA}C_{PWA}(T_{WA,LE} - T_{WA,EN}) \quad (5.9)$$

$$Q_{AB,EX} = M_{OIL}C_{POIL}(T_{OIL,LE} - T_{OIL,EN}) \quad (5.10)$$

Por lo tanto el coeficiente de operación (COP) esta dado como:

$$COP = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE} + Q_{EV} + WP_{WF} + WP_{GE}} \quad (5.11)$$

Ahora, si se desprecia el trabajo efectuado por las bombas (el cual es aproximadamente dos ordenes de magnitud menor que el calor suministrado a los componentes), los coeficientes de operación internos y externos pueden ser estimados por las ecuaciones (5.12) y (5.13) respectivamente.

$$COP_{IN} = \frac{Q_{AB,IN}}{Q_{GE,IN} + Q_{EV,IN}} \quad (5.12)$$

$$COP_{EX} = \frac{Q_{AB,EX}}{Q_{GE,EX} + Q_{EV,EX}} \quad (5.13)$$

El coeficiente de operación de Carnot puede ser estimado en base a las temperaturas absolutas [Yin, 2000] como:

$$COP_{CT} = \frac{T_5(T_4 - T_2)}{T_1(T_4 - T_2) + T_4(T_5 - T_1)} \quad (5.14)$$



## **SIMULACIÓN DE CONDICIONES**

Para determinar los flujos, potencias y temperaturas de operación de cada experimento se siguió el procedimiento que se describe a continuación, con ayuda del software TT-CIE ejecutándose para el modo de transformador térmico por absorción de una etapa con la mezcla Carrol - agua.

Para la ejecución del programa TT-CIE se requiere de los siguientes datos: *Temperaturas de evaporación, absorción, generación y condensación y la potencia de evaporación.* Estos datos se ingresaron mediante el siguiente procedimiento:

**Temperatura de condensación:** debido a que la temperatura de condensación tiene un valor cercano a la temperatura del agua de enfriamiento utilizada en el condensador y ésta se encuentra en una cisterna no aislada térmicamente, por lo que el agua de enfriamiento esta prácticamente a la temperatura del ambiente.

$$T_{CO} = f(T_{amb})$$

**Presión de condensador:** la presión en el interior del condensador determina la temperatura de condensación del refrigerante liberado del absorbente en el generador, por lo cual a una presión menor se operará a una temperatura menor. De esta forma, si se conoce o supone la temperatura del condensado, se puede determinar la presión a la que debe operar el condensador y que es la misma presión de operación del generador.

$$P_{GE} = P_{CO} = f(T_{CO})$$

**Concentración en el generador:** para cada experimento se prepara una solución acuosa de Carrol a una concentración en peso conocida y que permita la operación del equipo sin riesgo de cristalización.

$$X_{GE} \leq 80 \%w$$

**Temperatura de generador:** al inicio de cada experimento se fijó la presión en condensador por lo cual para cada concentración se fija (ver Figura 5.1) la temperatura de operación en generador.

$$T_{GE} = f(P_{CO}, X_{GE})$$

**Temperatura de evaporador:** la temperatura del evaporador debe ser similar a la temperatura del generador, ya que ambos componentes estarán alimentados de energía de desecho a la misma temperatura, sin embargo, esta temperatura tiene una relación directa con la presión.

$$T_{EV} \cong T_{GE}$$

**Presión de evaporador:** esta presión debe ser mayor a la presión del condensador (ver Figura 5.2) y es igual a la presión del absorbedor. Esta presión es función de la temperatura y la concentración de absorbente presentes en el absorbedor en estado de equilibrio.

$$P_{EV} = P_{AB} = f(T_{AB}, X_{AB})$$

**Potencia de evaporador:** esta potencia es necesaria para determinar el flujo de refrigerante que circula del generador al condensador, del condensador al evaporador y del evaporador al absorbedor. Este valor es conocido y depende de la potencia de desecho que se tiene, es aproximadamente la mitad de esta energía de desecho, ya que la otra parte se utilizará en el generador.

$$Q_{EV} \cong k$$

**Temperatura de absorbedor:** esta temperatura es el resultado de la absorción del refrigerante en el absorbente y depende de múltiples factores: energía extraída del absorbedor, presión del absorbedor y concentración del absorbente en la solución formada después de este proceso de absorción. Lo anterior se puede expresar como

$$T_{AB} = f(P_{EV}, X_{AB}) \quad y$$

$$X_{AB} = f(Q_{AB}, T_{AB})$$

por lo que al determinar la cantidad de energía que se extrae del absorbedor se puede conocer la concentración y temperatura del absorbedor. Sin embargo, para obtener la potencia del absorbedor se debe recurrir a un balance de energía:

$$Q_{AB} = Q_{EV} + Q_{GE} - Q_{CO}$$

del cual, se pueden conocer los valores por medio de cálculos iterativos hasta que la concentración, temperatura y potencia en el absorbedor satisfagan las ecuaciones de equilibrio de la figura 5.1.

Para poder estimar la temperatura del absorbedor presente y/o esperada en el transformador térmico por absorción de una etapa operando con la mezcla Carrol - agua, se le pide al programa TT-CIE que calcule varias temperaturas para el absorbedor a diferentes potencias y concentraciones. Con lo anterior se obtiene un listado de varias condiciones de operación para los datos ingresados y se selecciona la condición de interés.

En la mayoría de los experimentos realizados en este estudio se seleccionaron las condiciones en que la temperatura en el absorbedor y el coeficiente de operación fueran mayores, es decir, se trató de reproducir la condición límite antes del decaimiento drástico del coeficiente de operación en función de la temperatura de absorción. En la tabla 5.2 se nota para la condición sombreada un  $COP_E$  con valor de 0.445, a un  $\Delta T$  de 40 °C. Este valor se ha considerado para experimentación ya que permite un  $\Delta T$  razonablemente alto y hasta este valor los  $COP_E$  varían de su antecesor entre 1 y 6 milésimas. A partir de este valor los  $COP_E$  disminuyen más de 8 milésimas de su valor anterior haciéndose cada vez mayor esta diferencia.

© CIE-UNAM Mexico 1999																
Programed by: Rosenberg J Romero Dominguez																
jrd@mazatl.cie.unam.mx																
T_Gen	T_Con	T_Evp	T_Abs	P_Con	P_Evp	X_Abs	X_Gen	Q_Gen	Q_Evp	Q_Con	Q_Abs	COP_Ent	COP_Cnt	M_Evp	M_Abs	M_Gen
(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(mmHg)	(mmHg)	(%w)	(%w)	(kW)	(kW)	(kW)	(kW)	(dim)	(dim)	(kg/s)	(kg/s)	(kg/s)
120200-d sim																
CARROL/HO TRANSFORMADOR TERMICO																
62	22	75	104	19.85	288.91	56.20	66.28	0.432	0.480	0.476	0.436	0.478	0.617	1.89E-04	1.24E-03	1.05E-03
62	22	75	105	19.85	288.91	56.78	66.28	0.430	0.480	0.476	0.434	0.477	0.612	1.89E-04	1.32E-03	1.13E-03
62	22	75	106	19.85	288.91	57.34	66.28	0.427	0.480	0.476	0.431	0.475	0.607	1.89E-04	1.40E-03	1.21E-03
62	22	75	107	19.85	288.91	57.90	66.28	0.425	0.480	0.476	0.429	0.474	0.603	1.89E-04	1.49E-03	0.0013042
62	22	75	108	19.85	288.91	58.44	66.28	0.422	0.480	0.476	0.426	0.472	0.598	1.89E-04	1.60E-03	1.41E-03
62	22	75	109	19.85	288.91	58.96	66.28	0.418	0.480	0.476	0.422	0.470	0.594	1.89E-04	1.71E-03	1.52E-03
62	22	75	110	19.85	288.91	59.48	66.28	0.414	0.480	0.476	0.418	0.467	0.589	1.89E-04	1.84E-03	1.65E-03
62	22	75	111	19.85	288.91	60.00	66.28	0.409	0.480	0.476	0.413	0.464	0.585	1.89E-04	1.99E-03	1.80E-03
62	22	75	112	19.85	288.91	60.50	66.28	0.403	0.480	0.476	0.407	0.461	0.580	1.89E-04	2.16E-03	1.98E-03
62	22	75	113	19.85	288.91	60.98	66.28	0.396	0.480	0.476	0.400	0.457	0.576	1.89E-04	2.36E-03	2.17E-03
62	22	75	114	19.85	288.91	61.48	66.28	0.388	0.480	0.476	0.392	0.451	0.572	1.89E-04	2.61E-03	2.42E-03
62	22	75	115	19.85	288.91	61.96	66.28	0.377	0.480	0.476	0.381	0.445	0.568	1.89E-04	2.90E-03	2.71E-03
62	22	75	116	19.85	288.91	62.42	66.28	0.365	0.480	0.476	0.369	0.437	0.564	1.89E-04	3.24E-03	3.05E-03
62	22	75	117	19.85	288.91	62.90	66.28	0.349	0.480	0.476	0.353	0.425	0.560	1.89E-04	3.70E-03	3.51E-03
62	22	75	118	19.85	288.91	63.36	66.28	0.327	0.480	0.476	0.331	0.410	0.556	1.89E-04	4.28E-03	4.10E-03
62	22	75	119	19.85	288.91	63.80	66.28	0.300	0.480	0.476	0.304	0.389	0.553	1.89E-04	5.05E-03	4.86E-03
62	22	75	120	19.85	288.91	64.26	66.28	0.258	0.480	0.476	0.262	0.355	0.549	1.89E-04	0.0061944	6.01E-03
62	22	75	121	19.85	288.91	64.70	66.28	0.194	0.480	0.476	0.198	0.294	0.545	1.89E-04	7.92E-03	7.73E-03
62	22	75	122	19.85	288.91	65.14	66.28	0.082	0.480	0.476	0.086	0.153	0.542	1.89E-04	1.10E-02	1.08E-02
01-12-200014.36.33																

Tabla 5.2. Simulación obtenida por el programa TT-CIE para una condición de operación propuesta para experimentación

Una vez fijadas las temperaturas de generador, evaporador y condensador, y la potencia del evaporador, se procede a fijar la potencia en el generador y los flujos másicos internos del transformador térmico por absorción de una etapa.

## **RESULTADOS EXPERIMENTALES**

La tabla 5.3 (ubicada al final de este capítulo en varias hojas) muestra los valores de las temperaturas, presiones, concentración de las soluciones, potencias internas y externas, relación de flujo, incrementos de temperatura y coeficientes de operación internos y externos para el transformador de calor operando con la mezcla Carrol/agua. Las entalpías del agua y de la solución utilizadas para el cálculo de las potencias internas listadas en la tabla 5.1 están referidas a los trabajos publicados acerca de las entalpías del agua [Perry, 1984] y de la mezcla Carrol - agua [Reimann, 1984].

Los valores de los calores específicos para el agua y aceite térmico utilizados para calcular las ecuaciones (5.9) y (5.10) fueron tomados de la literatura [Perry, 1984 y Barragan, 1989].

Los principales parámetros de operación de un TTA son el COP y el  $\Delta T$ . Estos parámetros se muestran en las figuras que se presentan a continuación.

### **Coeficientes de operación**

El Coeficiente de operación (COP) calculado con la ecuación 5.13 se encuentra en la tabla 5.3 para cada condición experimental y sus valores varían desde valores cercanos a 0 (condiciones extremas en donde la diferencia de temperaturas entre la entrada y salida del aceite fue imperceptible) hasta de 0.35 en el caso de potencia de generador de 320 W, hasta 0.20 para potencias de generación de 350 W y 371 W, hasta 0.26 en el caso de potencias de generación de 404 W. A continuación se muestran figuras para series de experimentos diseñados para determinar la dependencia del COP en función de las diferentes variables del TTA.

La figura 5.3 muestra al COP en función de  $T_{GE}$  para potencias constantes de evaporador y generador de 400 y 320 W respectivamente. En esta figura se puede observar que el COP aumenta conforme aumenta el valor de  $T_{GE}$ , hasta un valor máximo de 0.35 correspondiente a 78 °C de  $T_{GE}$ .

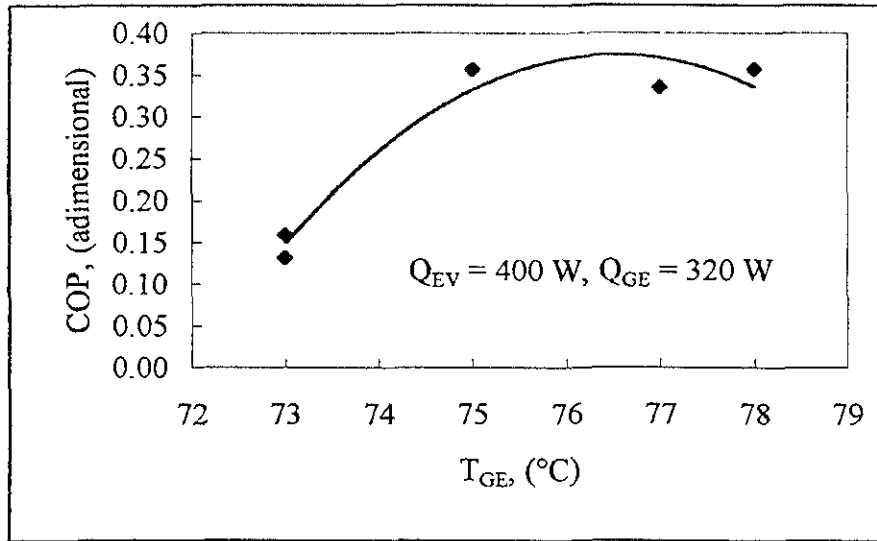


Figura 5.3. COP en función de  $T_{GE}$  para  $Q_{EV}$  y  $Q_{GE}$  constantes.

La figura 5.4 muestra al COP en función de  $T_{AB}$  para potencias constantes en el generador y el evaporador, así como para una concentración constante en el generador de 61 %. En esta figura se puede observar que el valor del COP disminuye al incrementarse el valor de  $T_{AB}$ . Este comportamiento se puede explicar por el requerimiento de energía que requiere el TTA en el absorbedor para poder elevar el valor  $T_{AB}$  disminuyendo  $Q_{AB}$  y por lo tanto el COP.

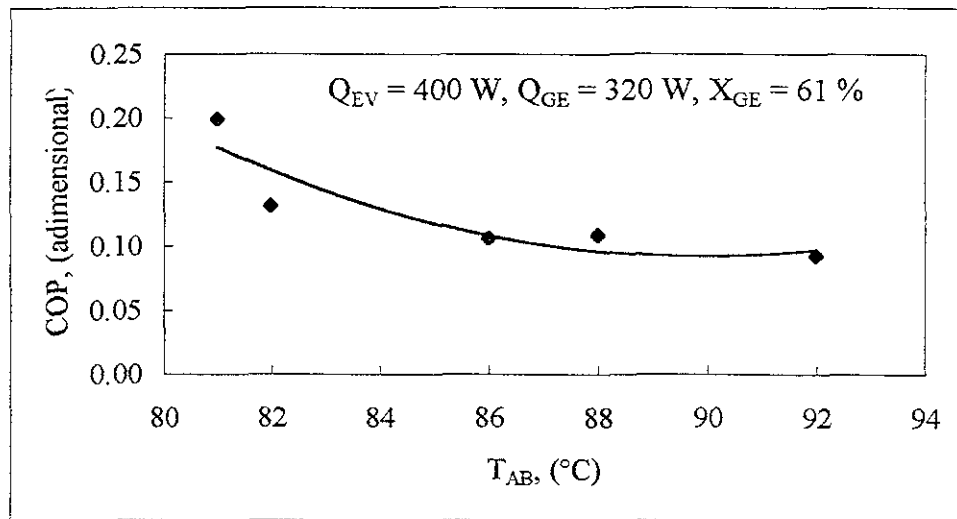


Figura 5.4. COP en función de  $T_{AB}$  a  $Q_{EV}$ ,  $Q_{GE}$  y  $X_{GE}$  constantes.

La figura 5.5 muestra al COP en función de  $T_{AB}$  para potencias constantes en el generador y el evaporador, así como para una concentración constante en el generador

de 63 %. En esta figura, similar a la figura 5.4, se observa una disminución del COP en función del incremento de  $T_{AB}$ . En esta figura se aprecia que se puede operar a mayores  $T_{AB}$  pero con COP menores a los mostrados en la figura 5.4.

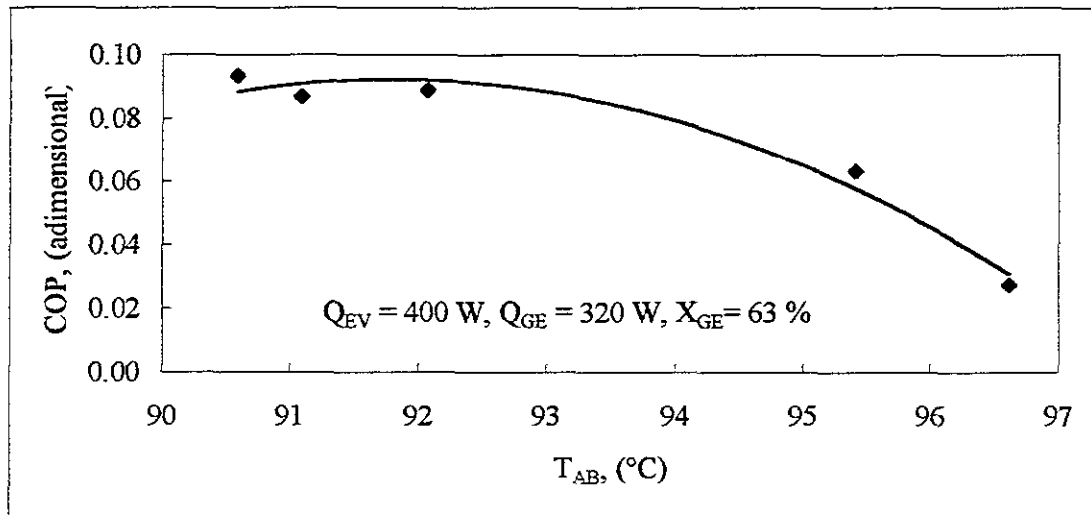


Figura 5.5. COP en función de  $T_{AB}$  a  $Q_{EV}$ ,  $Q_{GE}$  y  $X_{GE}$  constantes.

La figura 5.6 muestra al COP en función de  $T_{AB}$  para potencias constantes en el generador y el evaporador, así como para una concentración constante en el generador de 65 %. Similar a las figuras 5.4 y 5.5, se observa una disminución del valor del COP conforme aumenta el valor de  $T_{AB}$ ,

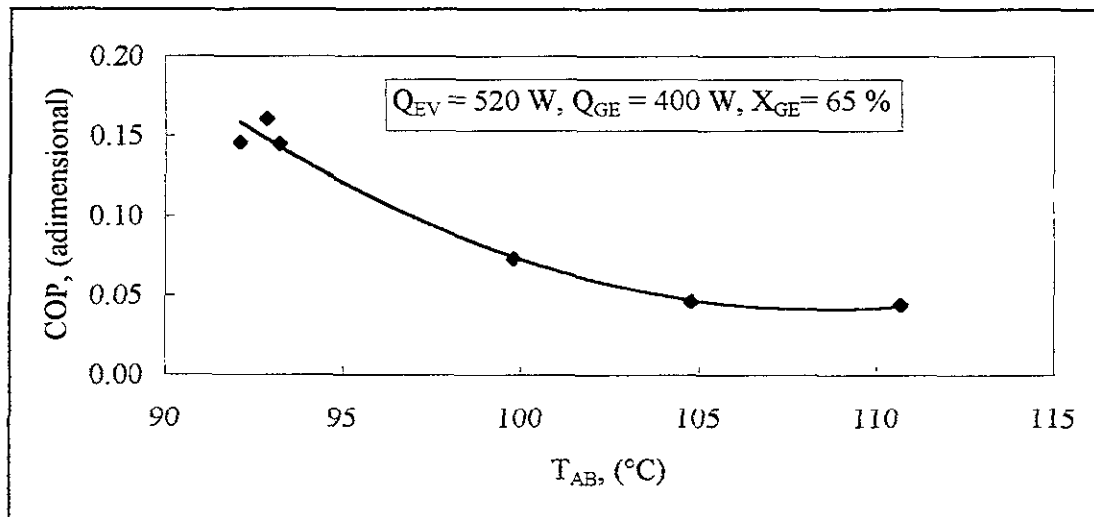


Figura 5.6. COP en función de  $T_{AB}$  a  $Q_{EV}$ ,  $Q_{GE}$  y  $X_{GE}$  constantes.

La figura 5.7 muestra al COP en función de  $T_{AB}$  para potencias constantes en el generador y el evaporador, así como para una concentración constante en el generador

de 66 %. Similar a las figuras anteriores se observa una disminución del valor del COP con el incremento de  $T_{AB}$ , pudiendo operar hasta  $104\text{ }^{\circ}\text{C}$  pero con un COP de 0.015.

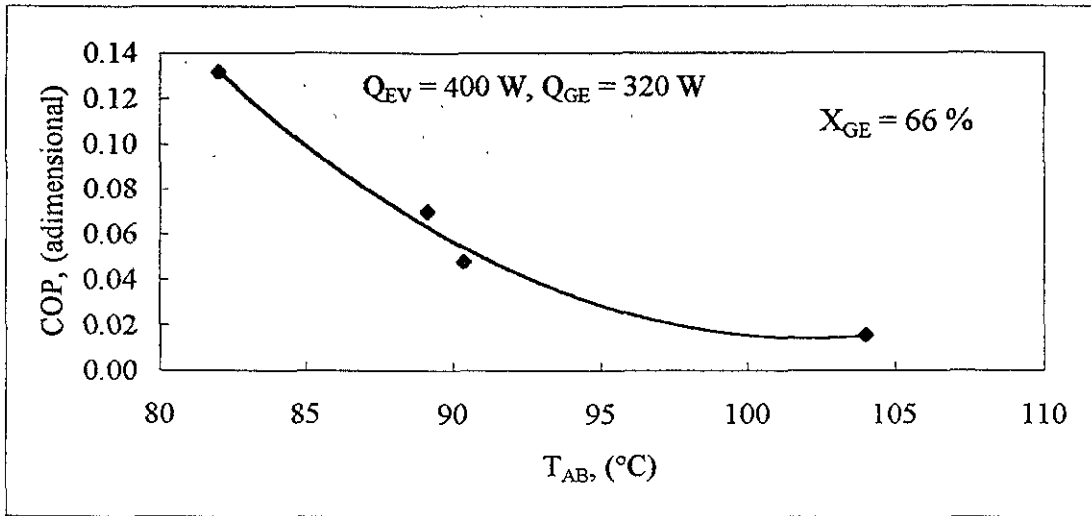


Figura 5.7. COP en función de  $T_{AB}$  a  $Q_{EV}$ ,  $Q_{GE}$  y  $X_{GE}$  constantes.

Las figuras 5.4 a 5.7 muestran claramente que se pueden obtener mayores valores de  $T_{AB}$  al operar con mayores concentraciones de Carrol en el TTA y que el COP disminuye su valor al operar a mayores valores de  $T_{AB}$ .

**Incremento de temperatura**

El incremento de temperatura se definió en la ecuación 5.3, e indica el nivel de revaloración que se logra en el TTA de la energía suministrada. Depende de las temperaturas del evaporador y el absorbedor, que a su vez está influenciada por la temperatura del generador. A continuación se muestran figuras del  $\Delta T$  en función de varios parámetros del TTA.

Las figuras 5.8 y 5.9 muestran al  $\Delta T$  en función de la  $T_{AB}$  para potencias de evaporador y generador constantes así como una concentración de Carrol fija en el generador. En esta figura se puede observar que el  $\Delta T$  aumenta al incrementarse el valor de  $T_{AB}$ , lo cual es esperado debido a la forma en que está definido el  $\Delta T$ . Si aumenta  $T_{AB}$  y el  $T_{EV}$  se mantiene constante, el valor de  $\Delta T$  aumenta. En estas figuras se muestra que para un valor de  $T_{AB}$  de  $96.6\text{ }^{\circ}\text{C}$  se obtiene un  $\Delta T$  de  $30.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  con  $X_{GE}$  de 63 %, mientras que para un valor de  $T_{AB}$  de  $110.7$  se puede obtener un  $\Delta T$  de  $46.2$  operando el TTA con

$X_{GE}$  de 65 %. Esto conduce a la conclusión de que es el  $\Delta T$  aumenta su valor al incrementar la concentración de Carrol en el TTA, así como el valor  $T_{AB}$ .

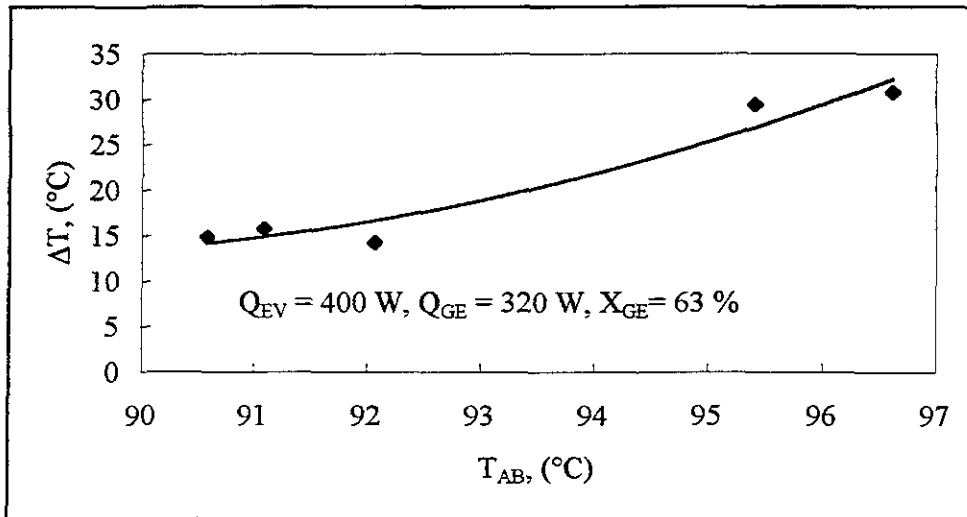


Figura 5.8.  $\Delta T$  en función de  $T_{AB}$  para  $Q_{EV}$ ,  $Q_{GE}$  y  $X_{GE}$  constantes.

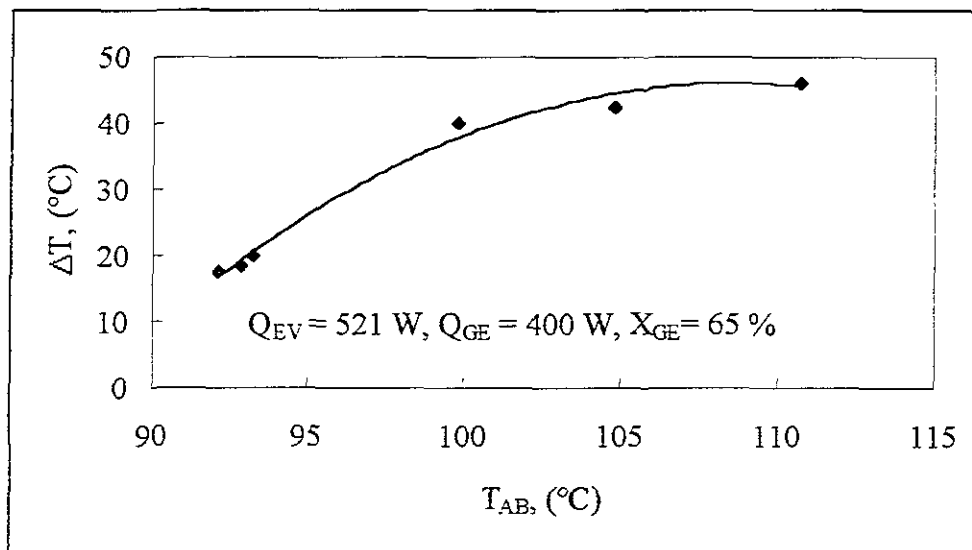


Figura 5.9.  $\Delta T$  en función de  $T_{AB}$  para  $Q_{EV}$ ,  $Q_{GE}$  y  $X_{GE}$  constantes.

La figura 5.10 muestra al  $\Delta T$  en función de la  $T_{EV}$  para potencias constantes de evaporador y generador. En esta figura se muestra que un incremento en el valor de  $T_{EV}$  disminuye el valor de  $\Delta T$ . Esto se puede explicar con la definición de  $\Delta T$ , de la ecuación 5.3, en la que un aumento del minuendo hace  $\Delta T$  disminuya.



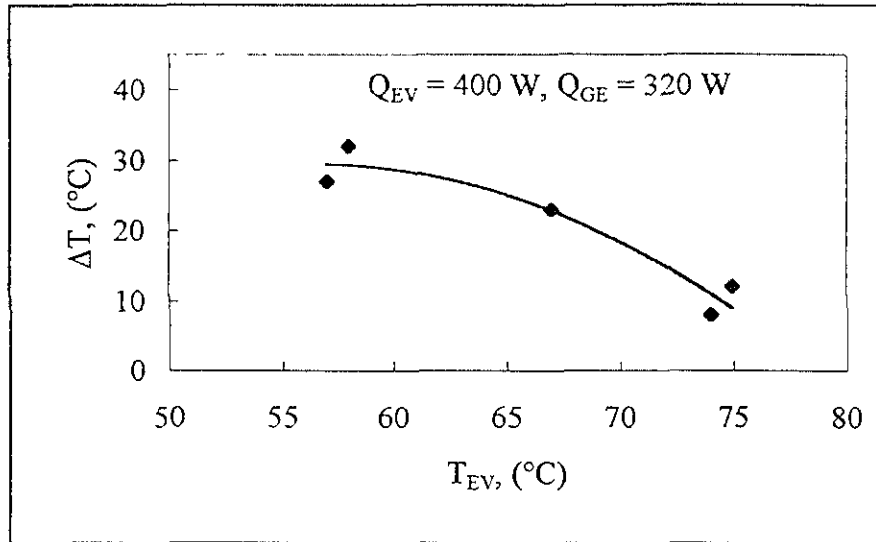


Figura 5.10.  $\Delta T$  en función de  $T_{EV}$  para  $Q_{EV}$  y  $Q_{GE}$  constantes.

La figura 5.11 muestra al  $\Delta T$  en función de la diferencia de concentraciones  $\Delta X = X_{GE} - X_{AB}$  para el intervalo de concentración de Carrol en el generador de 62 a 70 %. En esta figura se puede observar que el aumento del valor  $\Delta X$  produce un incremento en  $\Delta T$ , sin embargo, el valor máximo de  $\Delta T$  se obtiene para un valor  $\Delta X$  de 1.6.

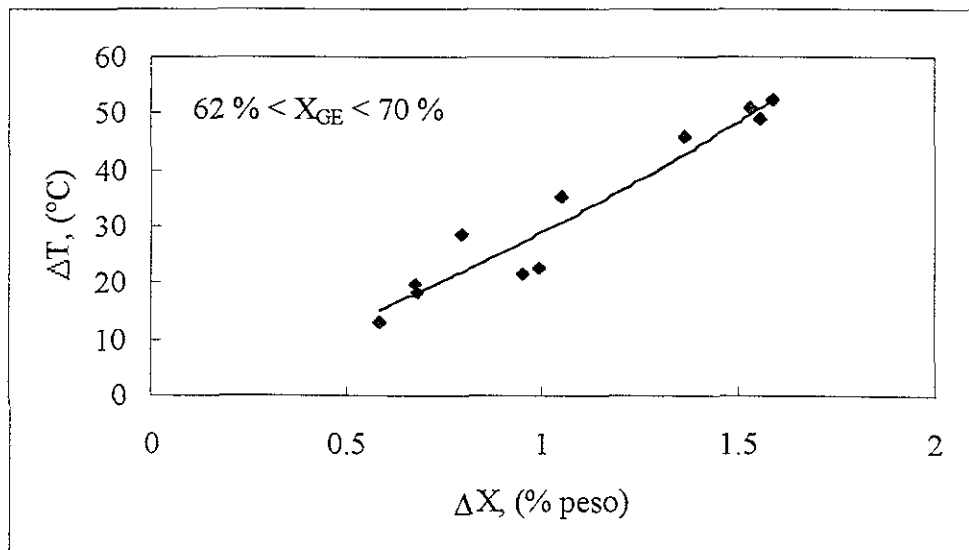


Figura 5.11.  $\Delta T$  en función de  $\Delta X$  para un intervalo de  $X_{GE}$ .

## ***Intervalos de operación del transformador térmico por absorción de una etapa operando con la mezcla Carrol - agua***

### ***Relación de flujo***

La relación de flujo calculada con la ecuación 5.2 se encuentra en la tabla 5.3 para cada condición experimental. En esta tabla se puede ver que existen diferentes valores desde 0 hasta 770 para potencias de 320 W, hasta 195 para valores de 350 W, hasta de 160 para potencias de 371 W y hasta 361 para potencias de 404 W en el generador.

### ***Potencia de evaporación***

La potencia de evaporación fue calculada para cada experimento a partir de los valores de voltaje y corriente medidos in situ. Los valores calculados con las correlaciones mostradas en la calibración de los reguladores de voltaje se muestran en la tabla 5.3, en la que se puede ver que se suministraron diferentes valores para diferentes potencias de generación. Los valores están comprendidos entre 400 y 704 W para el evaporador y de 310 a 415 W para el generador.

### ***Potencia obtenida de absorbedor***

Las potencias obtenidas en el absorbedor varían desde valores cercanos a 0 hasta valores máximos de 256 w. Estos valores fueron obtenidos para las potencias de generador entre 310 y 415 w.

### ***Concentración de Carrol en la solución acuosa del generador***

La concentración de Carrol en el generador se calculó en función de la correlación encontrada con el índice de refracción (IR). Estos valores muestran que los diferentes experimentos llevados a cabo se realizaron con concentraciones entre 57 % y 70 %.

### ***Concentración de Carrol en la solución acuosa del absorbedor***

Similarmente a la concentración calculada en el generador, se utilizó la correlación con el IR. Estos valores indican que las concentraciones en el absorbedor variaron entre 56 y 68 %.

### ***Diferencia de concentración entre las soluciones del generador y el absorbedor***

La diferencia máxima de concentraciones entre generador y absorbedor, para los experimentos realizados a diferentes potencias de generación con la mezcla Carrol – agua fue de 4.68. Sin embargo, la mayor cantidad de experimentos se llevó a cabo con valores inferiores a 2.0.

### ***Flujo de aceite del sistema de recuperación de calor***

El flujo del sistema de recuperación de calor (aceite recirculado) osciló entre 67.5 y 556.0 g/min, mostrando que conforme se incrementa la potencia del generador, se incrementa el flujo de aceite de recuperación de calor. Este incremento en el flujo es debido a la disminución de viscosidad del aceite en función del aumento en la temperatura de recuperación (fija por el absorbedor).

### ***Temperaturas de generación***

En la experimentación llevada a cabo se mantuvo la independencia de la temperatura de generación con respecto a la potencia de la misma. La temperatura de generación es función directa de la presión y la concentración de la sustancia y no así de la potencia de generación, como se puede observar en la figura 5.1.

### ***Temperaturas de absorción***

La temperatura de absorción se calcula en función al modelo descrito anteriormente y varía para diferentes potencias de generación. A medida que se incrementa la potencia de generador se pueden obtener mayores temperaturas de absorción. En el caso de la menor potencia de generación 320 W se obtuvieron desde 81 hasta 103.1 °C, mientras que para la mayor potencia de generación 404 W se obtuvieron desde 89.4 hasta 128.3 °C en la absorción.

### ***Temperaturas de condensación***

Las temperaturas de condensación en los experimentos fue función de la temperatura del ambiente. En general, el condensador operó entre 22.0 y 46.1 °C, por lo que se puede considerar como un intervalo muy pequeño de operación e incluso en varios experimentos se operó al mismo valor.

### ***Temperaturas de ingreso del aceite en el sistema de recuperación de calor***

En los experimentos se varió la temperatura del aceite en intervalos de 10 °C a partir de 60°C para los experimentos con potencia de generación igual o mayor de 350 W y solo en los experimentos de la potencia menor 320 W se utilizaron temperaturas desde 31 °C hasta 95 °C.

### ***Temperaturas de salida del aceite en el sistema de recuperación de calor***

Las temperaturas obtenidas en el sistema de recuperación de calor a la salida del absorbedor tuvieron valores desde 78.0 hasta 118.5 °C para las potencias de generación superiores a 350 W y en el caso de potencias de generación de 320 W valores hasta de 94 °C. Con los experimentos se concluyó que la **temperatura de aceite a la salida** del sistema de recuperación de calor **no depende** de la **temperatura** del aceite al **ingreso** del absorbedor. Por lo cual si se puede considerar representativo el incremento de temperatura entre absorbedor y evaporador.

### ***Incremento de temperatura del sistema de recuperación de calor***

En las series de experimentos llevados a cabo se calculó para la potencia extraída en el absorbedor con las ecuación 5.10 que la máxima diferencia de temperaturas en el sistema de recuperación de aceite es de 27 °C.

### ***Factor de recirculación interno del absorbedor (RC)***

El factor de recirculación (RC) representa la fracción de solución que se recircula del fondo del absorbedor al domo del mismo. En la tabla 5.3 se presentan las condiciones de recirculación en que se realizaron los experimentos, para diferentes potencias de generación, la mayoría de las condiciones de recirculación tuvieron valores de recirculación entre 0.3 y 0.9 sistemáticamente para determinar el valor óptimo que favorece la absorción del vapor de agua en la solución acuosa de Carrol (ver siguiente capítulo).

### Resumen de Intervalos de operación

Los límites de los parámetros de las condiciones de operación del transformador térmico por absorción de una etapa operando con la mezcla Carrol - agua llevadas a cabo se pueden resumir en la tabla 5.4.

	$T_{CO}$ (°C)	$T_{GE}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$X_{GE}$ (adim)	$X_{AB}$ (adim)	$P_{CO}$ (inHg)	$P_{AB}$ (inHg)	$Q_{EV,EX}$ (W)	$Q_{GE,EX}$ (W)	$Q_{CO,EX}$ (W)	$Q_{AB,EX}$ (W)
Medias	31.8	78.0	71.5	94.1	62.60	61.60	27.19	19.81	456.6	351.9	726.3	82.2
Mínimos	22.0	60.0	51.3	81.0	57.44	56.87	24.00	9.00	400.0	319.9	463.4	8.1
Máximos	46.1	104.2	90.5	128.3	70.02	68.43	28.00	25.00	704.1	415.9	1013.8	256.9
Desv.Std	6.3	7.8	8.7	7.4	2.33	2.19	0.82	3.88	67.3	36.1	89.4	56.3
	$COP_{EX}$ (adim)	$COP_{EX(A$ B-EV) (adim)	$COP_{IN}$ (adim)	RC (%)	FR (adim)	$Q_{AB,EX,AB}$ -EV (W)	$Q_{AB,IN}$ (W)	$\Delta Q_{AB}$ (W)	$\% \Delta Q_{AB}$ (adim)	$T_{AB,IN}$ (°C)	$T_{AB,EX}$ (°C)	
Medias	0.10	0.28	0.47	0.47	85.4	234.6	398.8	164.1	-417.6	102.9	94	
Mínimos	0.01	0.01	0.40	0.20	14.1	9.7	0.4	-420.3	-72411.1	84.0	81	
Máximos	0.36	0.92	0.51	1.00	770.5	1017.3	633.0	419.2	97.4	128.0	128	
Desv.Std	0.07	0.17	0.02	0.19	76.8	163.5	72.3	136.2	5782.6	8.8	7	
	$\Delta T_{IN}$ (°C)	$T_{AB,EX} - T_{EV,EX}$ (°C)	$\Delta \Delta T$ (°C)	$M_{EV}$ (g/min)	$M_{AB \rightarrow GE}$ (g/min)	$M_{GE \rightarrow AB}$ (g/min)	$M_{WA}$ (Kg/min)	$M_{aceite}$ (g/min)	$T_{BA}$ (°C)	$T_{OIL,IN}$ (°C)	$T_{OIL,LE}$ (°C)	$\Delta T_{OIL}$ (°C)
Medias	31	22.56	8.84	13.1	532.0	529.9	2.2	284.6	81.2	76.0	84.4	8.3
Mínimos	27	1.00	-0.64	6.0	380.0	0.9	1.3	67.6	30.9	31.0	41.3	1.0
Máximos	52	52.52	30.00	18.0	1000.0	1000.0	20.4	556.1	120.3	113.6	118.5	27.0
Desv.Std	5	11.30	8.88	1.9	153.3	159.5	1.5	63.7	12.6	11.7	10.2	5.3

Tabla 5.4. Límites de parámetros en la operación del transformador térmico por absorción de una etapa operado con la mezcla Carrol - agua.

### **Correlaciones obtenidas para cada parámetro de diseño**

A partir de los datos obtenidos se han correlacionado las variables de diseño más importantes a fin de poder utilizar estas correlaciones en diseños innovadores de absorbedores para transformadores térmicos por absorción de una etapa.

### **Coefficiente de operación en función de la potencia del absorbedor**

El parámetro más representativo del funcionamiento y utilidad de un transformador térmico por absorción de una etapa es el coeficiente de operación. El coeficiente de operación depende directamente de la potencia del absorbedor e inversamente de las potencias de generación y evaporación (ecuación 5.11), por lo cual se obtiene una dependencia lineal en las condiciones de operación en las que se mantienen constantes la potencia del generador y del evaporador.

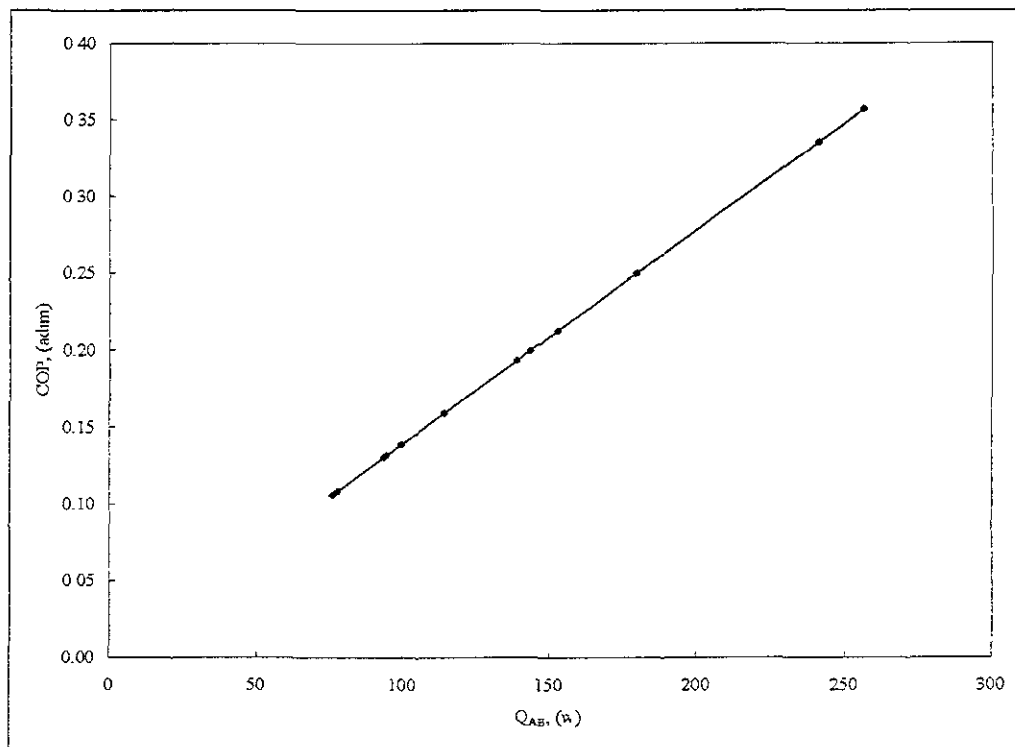


Figura 5.12. Coeficiente de operación en función de la potencia obtenida en el absorbedor

La figura 5.12 muestra la dependencia lineal del coeficiente de operación de un transformador térmico por absorción de una etapa, de acuerdo a la ecuación 5.11, cuando las potencias del generador y evaporador son constantes ( $Q_{GE} = 319 \text{ W}$ ,  $Q_{EV} = 400 \text{ W}$ ). En esta figura se muestra que la mayor potencia obtenida en el absorbedor (256 W) corresponde al mayor coeficiente de operación con valor de 0.356, sin embargo esto ha sido posible por el aumento de la concentración en el generador

### *Temperatura máxima de recuperación de la energía revalorizada*

Otro parámetro importante de un transformador térmico por absorción de una etapa (TTA) es el nivel térmico al cual se revaloriza la energía. Esto es útil en la evaluación de la conveniencia del acoplamiento a un proceso específico, ya que termodinámicamente se debe de poder operar un TTA con las condiciones propias de un sistema existente del cual se toman las corrientes de desecho y en el cual se revalorizarán hasta un nivel térmico útil para el mismo proceso.

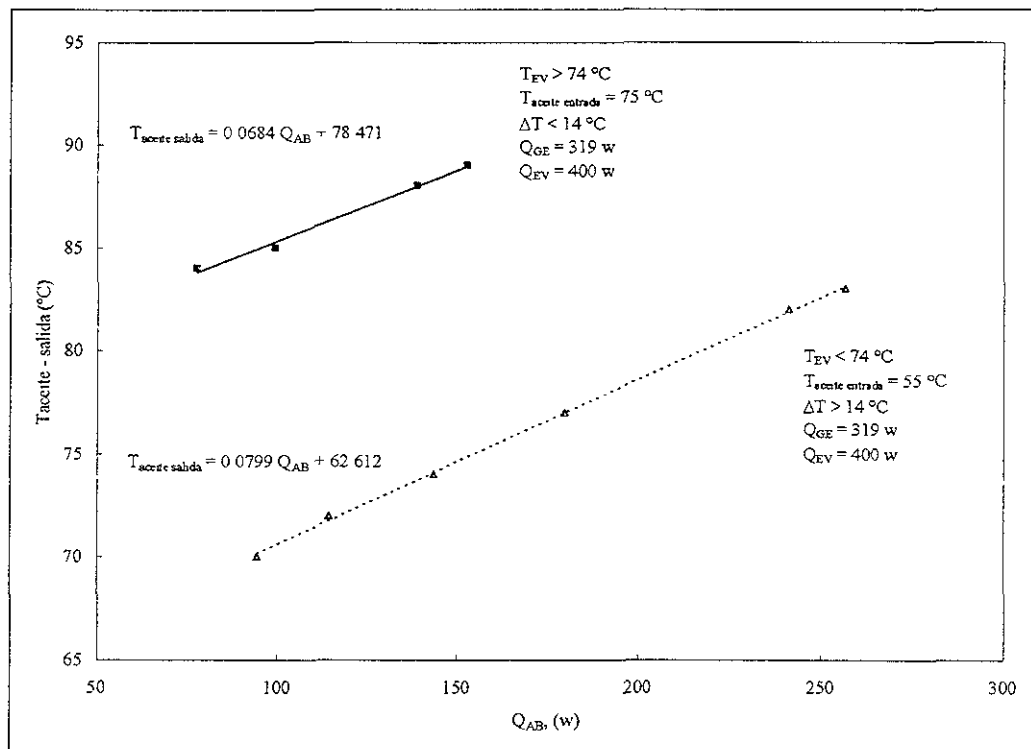


Figura 5.13. Temperatura de aceite a la salida del sistema de recirculación en función de diferentes potencias de absorción.

En la figura 5.13 se muestra una dependencia lineal de la temperatura del aceite a la salida del sistema de recuperación de energía con respecto a la potencia obtenida en el absorbedor para potencias constantes en generador y evaporador. Se muestra también un incremento de temperatura de 15.8 °C entre las dos series de experimentos, los valores menores corresponden a los experimentos llevados a cabo con temperatura de aceite al inicio del sistema de recuperación de energía de 55 °C, mientras que los valores mayores corresponden a 75°C. Es importante mencionar que el valor máximo para la serie inferior de la gráfica es de 82.3°C mientras que el valor máximo para la serie superior corresponde a 89.2 °C. Esto es congruente con el modelo mostrado, en el que se predice que un mayor incremento de temperatura se puede lograr con un costo (disminución) de potencia útil (ver tabla 5.2).

### ***Incremento de temperatura en función de la diferencia de concentraciones***

Según los estudios teóricos [Yin, 2000; Best, 1997; Eisa, 1986] con mezclas basadas en bromuro de litio el incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) presenta una dependencia inversamente proporcional a la diferencia de concentraciones ( $\Delta X$ ), obteniéndose los valores máximos del  $\Delta T$  para valores cercanos a la unidad.

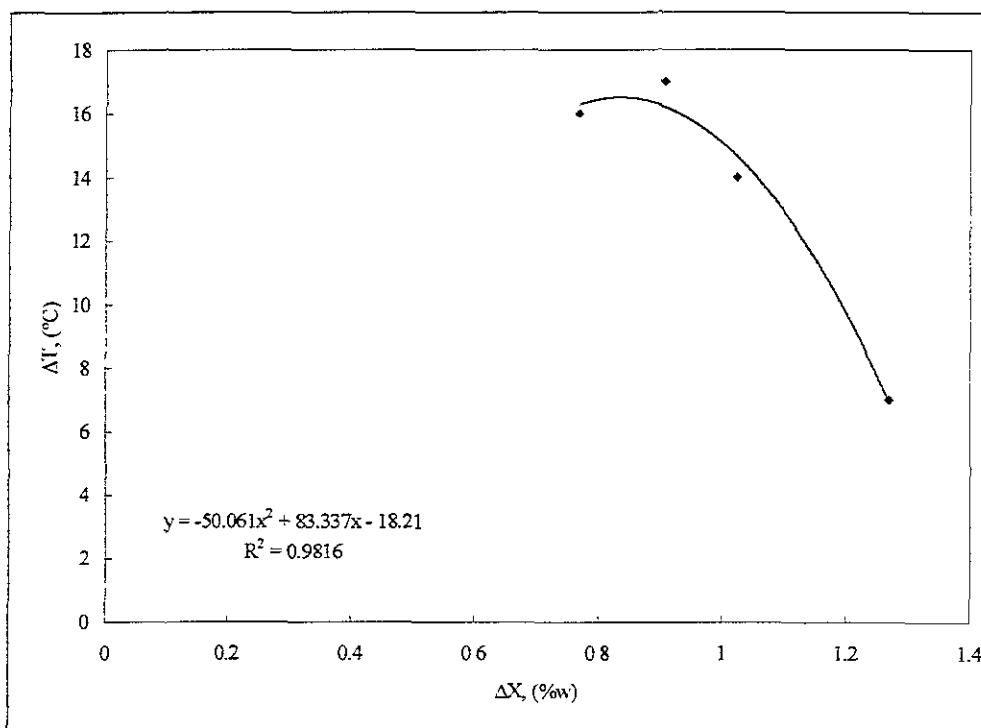


Figura 5.14. Incremento de temperatura en función de la diferencia de concentraciones de un transformador térmico por absorción de una etapa.



En las figuras 5.11 y 5.14 se muestra una variación en el incremento de temperatura al aumentar la diferencia de concentraciones. Este efecto se debe a que un aumento de concentración implica un aumento de presión en la zona de alta presión, por lo cual aumenta la temperatura de evaporador sin elevarse la temperatura del absorbedor, disminuyendo así la diferencia de temperaturas entre absorbedor y evaporador que se considera como el incremento de temperatura.

Una implicación relevante de este efecto es el conocimiento que se tiene ahora del máximo incremento de temperatura como función de la menor diferencia de concentraciones entre el generador y el absorbedor.

### *Temperatura de generador en función de la concentración*

Según el diagrama de equilibrio mostrado en la figura 5.1 se puede determinar para una temperatura y una presión dadas la concentración de absorbente que permanecerá en equilibrio dentro del generador. En el caso de que la presión sea constante, la temperatura de equilibrio será una función directa de la concentración de absorbente en el generador.

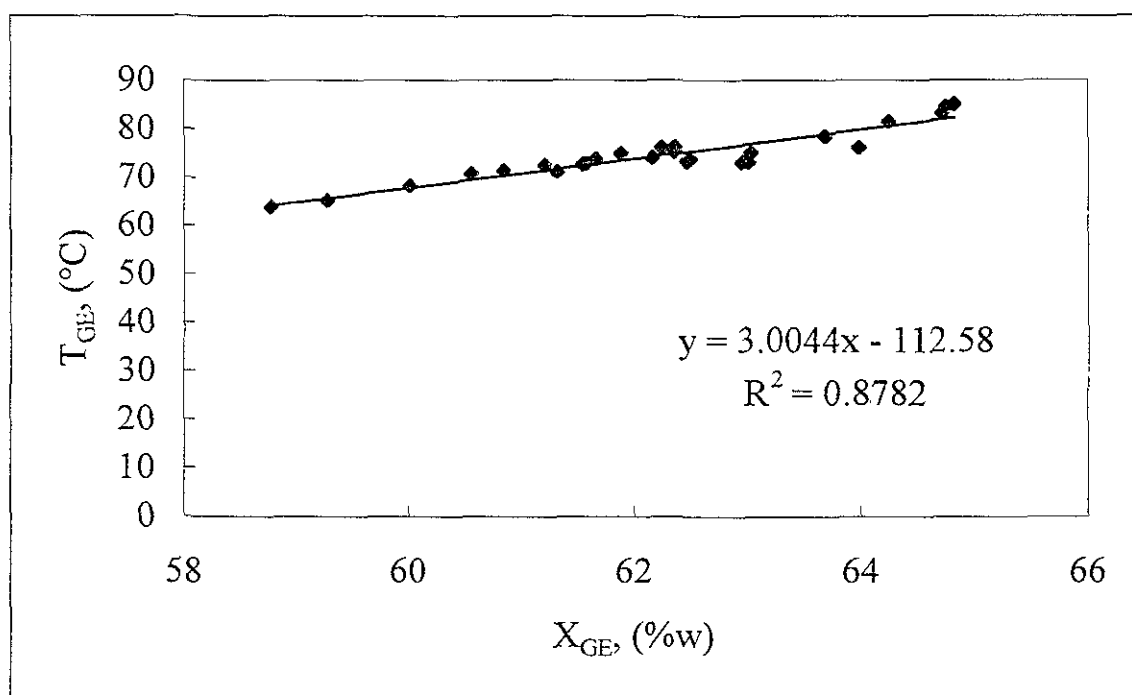


Figura 5.15. Temperatura en función de la concentración de Carrol en el generador

Como se muestra en la figura 5.1, a una presión constante (línea horizontal en la figura 5.1) un incremento de concentración (desplazamiento a la derecha de la figura 5.1) implicará un incremento en la temperatura para alcanzar el estado de equilibrio, por lo cual, una fuente de calor de desecho a mediana temperatura requerirá menor concentración de Carrol en el generador que alguna otra fuente de desecho con mayor temperatura operando a la misma presión. Este comportamiento experimental de las concentraciones en el generador es totalmente congruente con el modelo presentado y mostrado en la figura 5.15.

**Presión de absorbedor en función de la concentración en el absorbedor**

La presión del absorbedor es igual a la presión del evaporador, debido a que se encuentran en intercomunicación, para el proceso de generación de vapor que se pone en contacto con la solución diluida del absorbedor. Esta presión de absorbedor depende de la temperatura y la concentración de absorbente en esta zona, por lo que si se opera el absorbedor con una temperatura constante, la presión del absorbedor queda dependiente exclusivamente de la concentración de absorbente en el absorbedor. Este comportamiento modelado se corrobora con datos experimentales mostrados en la figura 5.16.

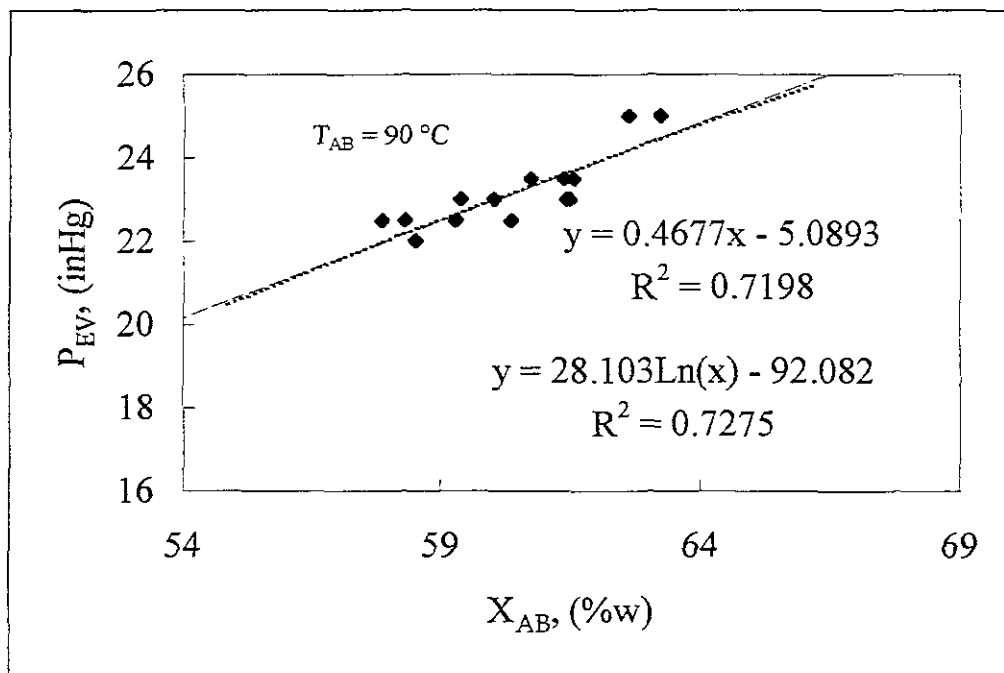


Figura 5.16. Presión de evaporador en función de la concentración en el absorbedor

En la figura 5.16 se puede observar que la presión para una temperatura constante muestra una correlación semi - logarítmica, que corresponde en la Figura 5.1 a una línea vertical con su valor menor en la parte superior. Esta correlación indica una dependencia moderada ( $R^2 = 0.72$ ) con respecto a la concentración, por lo cual, se correlacionará ahora con la temperatura, esperando un mayor factor de correlación.

### ***Presión del absorbedor en función de la temperatura de evaporación***

La presión también se puede correlacionar en función de la temperatura de evaporación. Para esto, se supone que no existen partículas de absorbente presentes en el evaporador y por lo tanto, para evaporar a una temperatura mayor, se requerirá de una presión mayor. Es decir, un valor inferior de vacío. Recordando que 0 pulgadas de mercurio (inHg) equivalen a la presión atmosférica.

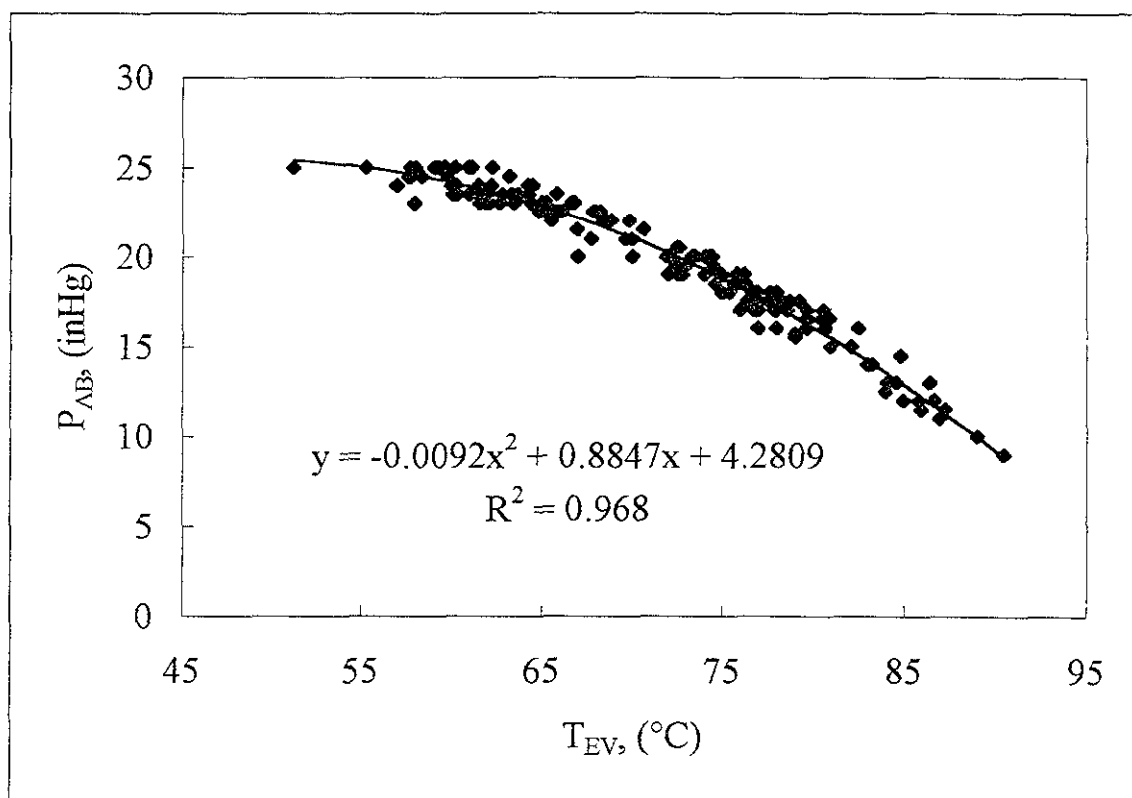


Figura 5.17. Presión del absorbedor en función de la temperatura de evaporación.

En la figura 5.17 se muestra una dependencia notoria ( $R^2=0.968$ ) de la presión con respecto a la temperatura del refrigerante. Debido a que en este caso el refrigerante es

agua libre de absorbente, se evaporaría a 100°C con una presión atmosférica, (0 inHg). Similarmente, se evapora agua a 50°C a 25 inHg.

**Concentración del absorbente en el absorbedor en función de la concentración de absorbente presente en el generador**

La concentración del absorbente en el sistema es diferente de cero en el generador y en el absorbedor. Estas concentraciones dependen principalmente de la temperatura y presión presentes en cada uno de los componentes a fin de permanecer en equilibrio. Una vez que se ha determinado la presión de operación en el generador, y conociendo la temperatura de la energía a revalorizar (calor de desecho) se determina la concentración en función del diagrama de equilibrio (Figura 5.1), por lo tanto esta concentración es conocida.

La temperatura del absorbedor depende inversamente del coeficiente de operación (COP) del transformador térmico por absorción de una etapa, por lo tanto, a mayor temperatura de revalorización, se operará con menor COP. Finalmente, la presión de operación del absorbedor puede conocerse, considerando que la temperatura del evaporador es la temperatura a la que se suministra la energía de desecho y asumiendo que el evaporador se encuentra libre de absorbente se puede determinar la presión de evaporación del fluido de trabajo a dicha temperatura, asumiendo que se trata de un compuesto puro (ver figura 5.17).

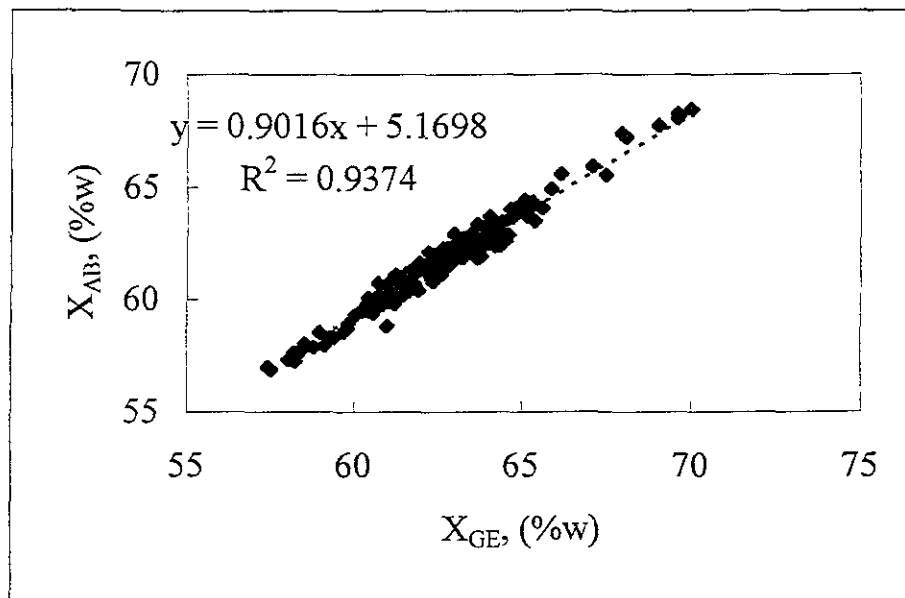


Figura 5.18. Concentración de Carrol en el absorbedor en función de la concentración presente en el generador.

En la figura 5.18 se puede ver que existe una relación lineal en las concentraciones presentes en el equipo. La concentración del absorbedor es menor en promedio una unidad, con un valor mínimo de 56.9 y un valor máximo de 61.6. Y ajustan razonablemente a la ecuación:

$$X_{AB} = 0.9016 X_{GE} + 5.1698$$

Esta ecuación teóricamente indicaría una diferencia máxima de 5.16 unidades de concentración, mientras que experimentalmente la diferencia máxima entre las concentraciones del generador y absorbedor fue de 4.68 unidades de concentración.

### **CORRELACIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS PARA DISEÑO DE ABSORBEDORES**

Las series de experimentos llevados a cabo en el transformador térmico por absorción de una etapa con la mezcla Carrol - agua han arrojado suficiente información para correlacionar algunos parámetros de diseño para un absorbedor de película descendente.

#### **Potencia revalorizada en función de varios parámetros**

La potencia revalorizada depende de varios parámetros. Analizando la figura 5.2, se observa que en un balance de energía macroscópico:

$$Q_{AB} = M_{EV} (H_4) + M_{GE} (H_{10}) - M_{AB} (H_5) \quad (5.15)$$

dónde

$$\begin{aligned} H_4 &= f(T_{EV}) \\ H_5 &= f(T_{AB}, X_{AB}) \\ H_{10} &= f(T_{GE}, X_{GE}) \end{aligned}$$

por lo que  $Q_{AB} = f_1 (M_{EV}, M_{AB}, M_{GE}, T_{EV}, T_{AB}, T_{GE}, X_{AB}, X_{GE}) \quad (5.16)$

Para poder determinar la dependencia de  $Q_{AB}$  con estas variables, se llevaron a cabo la siguiente consideraciones:

$$P_{EV} = K_1, P_{AB} = K_2 \text{ Y } M_{EV} = K_3,$$

para potencia y presión de evaporación el flujo de refrigerante es constante.

$$M_{GE} \cong M_{AB}$$

Esta suposición es válida al considerar que el orden de magnitud del flujo del refrigerante es menor al orden de magnitud de estos flujos, por lo cual en un balance de materia el flujo de solución diluida tiende al flujo de solución concentrada.

$$T_{EV} \cong T_{GE}$$

Esta suposición es válida al considerar en la figura 5.2 que el nivel térmico que alimenta de energía de desecho al generador y evaporador es el mismo, por lo que la diferencia (relativamente pequeña) entre estos valores solo depende de las variaciones de presión.

$$X_{GE} = K_4$$

No hay generación ni acumulación de absorbente dentro del generador (condición de equilibrio termodinámico) por lo que la concentración de absorbente dentro del generador permanece constante a lo largo del experimento.

Por todas las consideraciones anteriores, se puede reducir la función  $Q_{AB}$  como:

$$Q_{AB} = f_2 (M_{AB}, T_{EV}, T_{AB}, X_{AB}) \quad (5.17)$$

Esta función, se puede reagrupar como

$$Q_{AB} = f_3 \{ f_4(M_{AB}) + f_5(T_{EV}) - f_6(T_{AB}, X_{AB}) \} \quad (5.18)$$

$$\text{dónde} \quad f_4(M_{AB}) = Q_{AB,4} \quad (5.19)$$

$$f_5(T_{EV}) = Q_{AB,5} \quad (5.20)$$

$$f_6(T_{AB}, X_{AB}) = Q_{AB,6} \quad (5.21)$$

$$Q_{AB,4}$$

Esta función depende del flujo de solución diluida circulante en el transformador térmico por absorción de una etapa. Es una variación cuadrática que es independiente de la temperatura de absorción.

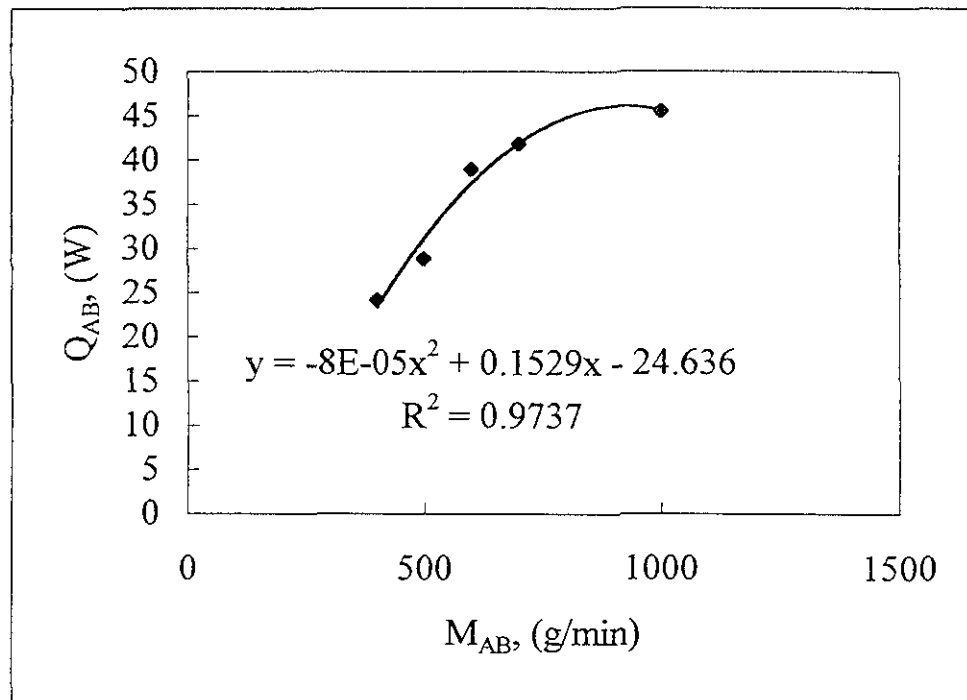


Figura 5.19. Potencia de Absorción y coeficiente de operación en función del flujo de solución diluida

En la figura 5.19 se observa que a medida que se incrementa el flujo en el absorbedor se incrementa la potencia y el coeficiente de operación, sin embargo, este es el comportamiento ideal cuando se circula aceite a temperatura ambiente y se extrae la mayor cantidad de energía posible con el máximo incremento de temperatura.

$$Q_{AB,4} = -8e-5 M_{AB}^2 + 0.1529 M_{AB} - 24.636 \quad (5.22)$$

dónde  $Q_{AB,4}$  está en Watts y  $M_{AB}$  está expresado en g/min

$Q_{AB,5}$

Debido a las suposiciones hechas, esta función dependerá de la temperatura del evaporador, con un flujo constante de refrigerante ( $M_{EV} = K_3$ ), por lo que se puede asociar directamente a la potencia de evaporación.

$$Q_{AB,5} = Q_{EV} \text{ (expresados en Watts)} \quad (5.23)$$

$Q_{AB,6}$

Finalmente,  $Q_{AB,6}$  debe ser dependiente de la presión presente en el absorbedor, que es una función de la concentración y la temperatura, por lo tanto, el efecto asociado a dicho efecto debe ser una parte de la potencia obtenida en el absorbedor.

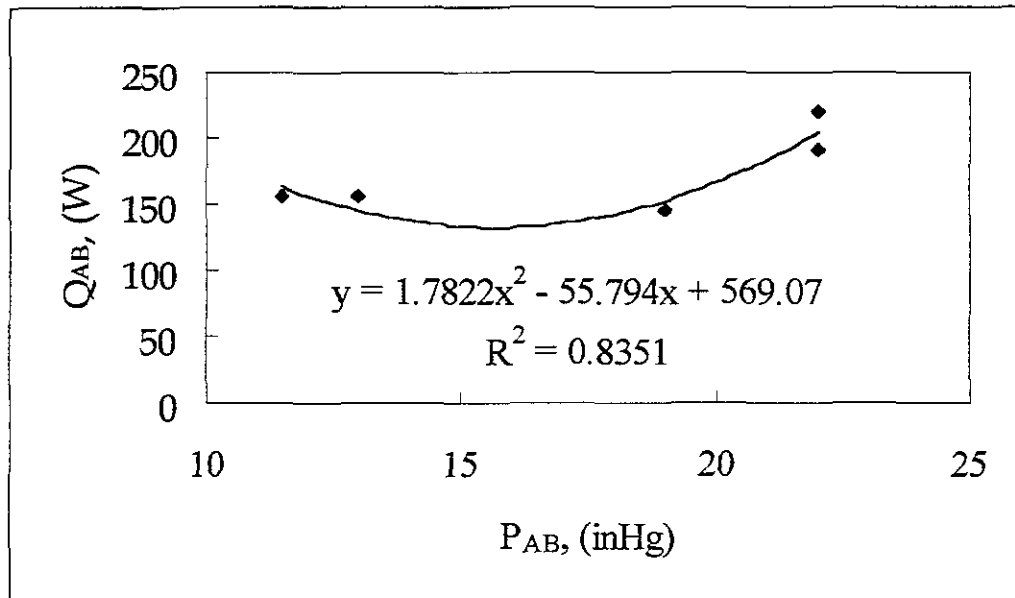


Figura 5.20. Potencia de absorción retirada en función de la presión en el absorbedor.

En la figura 5.20 se puede observar que existe un valor mínimo de la potencia retirada en el absorbedor en función de la presión. Este valor corresponde a una diferencia mayor (1.16) de concentraciones entre las soluciones diluida y concentrada, con respecto a las demás diferencias (cercanas a 1).

Por lo cual se puede considerar que

$$Q_{AB,6} = 1.7822 P_{AB}^2 - 55.794 P_{AB} + 569.07 \quad (5.24)$$

dónde  $Q_{AB,6}$  está expresada en Watts y  $P_{AB}$  está expresada en inHg.

La suposición que se hace en la ecuación 5.18, en la que la  $f_6(T_{AB}, X_{AB})$  es restada, se debe a la ecuación inicial 5.15, en la cual se muestra que el término dependiente de  $(T_{AB}, X_{AB})$  es disminuido de las aportaciones debidas a  $(T_{EV})$  y a  $(T_{GE}, X_{GE})$ .



Lo anterior conduce a una ecuación semi-empírica, al sustituir las ecuaciones 5.22, 5.23 y 5.24 en la ecuación 5.18. Resultando con esto una correlación de datos experimentales de la forma:

$$Q_{AB} = (-8e-5 M_{AB}^2 + 0.1529 M_{AB} - 24.636) + (Q_{EV}) - (1.7822 P_{AB}^2 - 55.794 P_{AB} + 569.07) \quad (5.25)$$

Válida para las suposiciones arriba señaladas.

Esta ecuación, reproduce los valores teóricos calculados con el programa TT-CIE, con una diferencia máxima de 62.8 % y mínima de 8.2 %.

La figura 5.21 muestra la variación de los datos calculados con la ecuación 5.25 y los calculados utilizando el programa TT-CIE. En esta figura se muestra una gran dispersión que ubica a los valores calculados con la ecuación 5.25 en su mayoría 28 % inferiores a los calculados con el programa TT-CIE, que usa el modelo mostrado en el capítulo 1. Cabe destacar que a pesar de no ser un valor exacto, requiere de pocos parámetros que pueden obtenerse en el lugar de operación del TTA y evaluar de forma sencilla un valor aproximado de la potencia a obtenerse en el absorbedor.

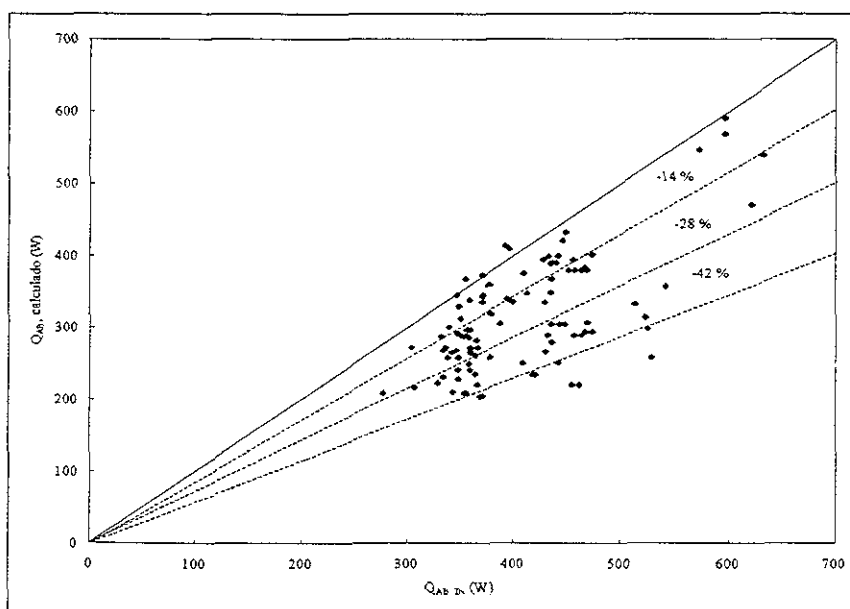


Figura 5.12. Comparación del  $Q_{AB}$  calculado con la ecuación 5.25 con respecto al obtenido con el programa TT-CIE.

Fecha	M <sub>AB</sub>	P <sub>AB</sub>	Q <sub>EV,EX</sub>	Q <sub>AB,EX</sub>	Q <sub>AB</sub> (eq. 5.25)	$\Delta Q_{AB}$	%error	Fecha	M <sub>AB</sub>	P <sub>AB</sub>	Q <sub>EV,EX</sub>	Q <sub>AB,IN</sub>	Q <sub>AB</sub> (eq. 5.25)	$\Delta Q_{AB}$	%error
(DMA)	(g/min)	(inHg)	(W)	(W)	(W)	(W)	(adim)	(DMA)	(g/min)	(inHg)	(W)	(W)	(W)	(W)	(adim)
120500	600	25.0	400.09	93.73	150.30	56.58	37.64	120500	600	25.0	400.09	404.0	150.30	-253.70	62.8
130300	400	25.0	483.59	124.22	219.22	95.00	43.33	130300	400	25.0	483.59	455.0	219.22	-235.78	51.8
130300	400	25.0	483.59	115.44	219.22	103.78	47.34	130300	400	25.0	483.59	462.0	219.22	-242.78	52.5
130300	400	25.0	483.59	135.97	219.22	83.25	37.98	130300	400	25.0	483.59	462.0	219.22	-242.78	52.5
130300	400	25.0	521.80	142.06	257.43	115.37	44.81	130300	400	25.0	521.80	529.0	257.43	-271.57	51.3
130300	400	25.0	521.80	155.56	257.43	101.87	39.57	130300	400	25.0	521.80	529.0	257.43	-271.57	51.3
130300	400	25.0	561.46	167.30	297.09	129.79	43.69	130300	400	25.0	561.46	525.0	297.09	-227.91	43.4
150500	600	25.0	434.91	153.52	185.12	31.60	17.07	150500	600	25.0	434.91	368.0	185.12	-182.88	49.7
150500	600	25.0	434.91	106.57	185.12	78.56	42.43	150500	600	25.0	434.91	366.0	185.12	-180.88	49.4
150500	600	25.0	434.91	34.12	185.12	151.01	81.57	150500	600	25.0	434.91	365.0	185.12	-179.88	49.3
220500	600	25.0	483.59	65.51	233.80	168.29	71.98	220500	600	25.0	483.59	421.0	233.80	-187.20	44.5
220500	600	25.0	483.59	46.10	233.80	187.70	80.28	220500	600	25.0	483.59	418.0	233.80	-184.20	44.1
250500	600	25.0	521.80	179.64	272.01	92.37	33.96	250500	600	25.0	521.80	513.0	272.01	-240.99	47.0

Tabla 5.5. Correlación de datos experimentales y comparación con la ecuación 5.25 para presiones bajas.

Fecha	M <sub>AB</sub>	P <sub>AB</sub>	Q <sub>EV,EX</sub>	Q <sub>AB,EX</sub>	Q <sub>AB</sub> (eq. 5.25)	$\Delta Q_{AB}$	%error	Fecha	M <sub>AB</sub>	P <sub>AB</sub>	Q <sub>EV,EX</sub>	Q <sub>AB,IN</sub>	Q <sub>AB</sub> (eq. 5.25)	$\Delta Q_{AB}$	%error
(DMA)	(g/min)	(inHg)	(W)	(W)	(W)	(W)	(adim)	(DMA)	(g/min)	(inHg)	(W)	(W)	(W)	(W)	(adim)
20300	400	9.0	521.80	116.48	334.24	217.76	65.15	20300	400	9.0	521.80	430.0	334.24	-95.76	22.3
130100	400	12.0	400.09	69.82	267.64	197.82	73.91	130100	400	12.0	400.09	346.0	267.64	-78.36	22.6
150100	400	12.0	400.09	55.65	267.64	211.99	79.21	150100	400	12.0	400.09	365.0	267.64	-97.36	26.7
150100	400	11.5	400.09	66.52	260.68	194.17	74.48	150100	400	11.5	400.09	364.0	260.68	-103.32	28.4
150100	400	11.0	400.09	77.86	252.84	174.97	69.20	150100	400	11.0	400.09	365.0	252.84	-112.16	30.7
160300	400	11.5	521.80	155.85	382.39	226.54	59.24	160300	400	11.5	521.80	467.0	382.39	-84.61	18.1
250300	500	12.0	521.80	23.11	397.44	374.33	94.19	250300	500	12.0	521.80	433.0	397.44	-35.56	8.2
260200	400	12.0	400.09	44.14	267.64	223.50	83.51	260200	400	12.0	400.09	334.0	267.64	-66.36	19.9
280200	400	12.5	400.09	138.87	273.71	134.84	49.26	280200	400	12.5	400.09	317.0	273.71	-43.29	13.7
290200	400	10.0	434.91	112.22	269.29	157.06	58.33	290200	400	10.0	434.91	359.0	269.29	-89.71	25.0

Tabla 5.6. Correlación de datos experimentales y comparación con la ecuación 5.25 para presiones cercanas a la atmosférica

En el caso de presiones de absorción cercanas a la atmosférica (entre 9 y 17 inHg) la correlación semiempírica tiene variaciones menores al 30% con respecto a los simulados con el TT-CIE. Y para presiones menores (entre 17.5 y 25 inHg) la variación aumenta con respecto a datos arrojados por el programa TT-CIE, como se muestra en las tablas 5.5 y 5.6.

Estas variaciones pueden deberse a dos principales causas, el material del cual está fabricado el transformador térmico y las irreversibilidades dentro del sistema.

Si a estas variaciones, se pueden considerar asociadas a una efectividad en los componentes [George, 1989] de generación de vapor expresada como  $\eta$ , se podría incluir a esta efectividad en la potencia de evaporación como una corrección por pérdidas, es decir, se podría remplazar al sumando  $Q_{EV}$  por  $Q_{EV} / \eta$ . Con estos valores de efectividad se podría obtener un valor muy cercano al modelado. Por ejemplo en caso de  $\eta = 0.8$  para los experimentos llevados a cabo el % de error para presiones cercanas a la presión atmosférica se reduciría a 8 % y en el caso de presiones bajas a 30 %.

### **EFFECTO DE LA CONDUCTIVIDAD DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CALOR**

El transformador térmico por absorción de una etapa fue diseñado y construido en acero inoxidable 316L, (ver capítulo 3) por lo cual existe una conductividad relativamente baja [Perry, 1984]. La conductividad del acero inoxidable (80 W/m K) a las condiciones de operación ( $T_{AB} = 100^{\circ}\text{C}$ ) es la quinta parte de la conductividad del cobre (398 W/m K), por lo cual, en la ecuación 5.10

$$Q_{AB,EX} = M_{OIL} C_{P_{OIL}} (T_{OIL,LE} - T_{OIL,EN}) \quad (5.10)$$

si se supone un sistema de recuperación de calor construido en cobre, la diferencia de temperaturas será mayor (considerando una eficiencia de transporte del 70 % similar a la supuesta en el programa TT-CIE) 3.5 veces que la actual, por lo que el valor  $Q_{AB,EX}$  se incrementa y las diferencias con los valores calculados por el programa TT-CIE disminuyen.

En las tablas 5.7 y 5.8 se muestra que la cantidad de energía recuperada en un sistema de recuperación construido en cobre,  $Q_{AB,CU}$  difiere entre 1.9 % y 67.3 % con respecto a la simulación hecha con el programa TT-CIE, para presiones bajas mientras que para presiones cercanas a la atmosférica la diferencia tiene valores entre 5.2 % y 53.7 %.

Fecha (DMA)	M <sub>AB</sub> (g/min)	P <sub>AB</sub> (inHg)	Q <sub>EV,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,IN</sub> (W)	Q <sub>AB,CU</sub> (W)	ΔQ <sub>AB</sub> (W)	%error (adim)
120500	600	25.0	400.09	404.0	328.04	-75.96	18.8
130300	400	25.0	483.59	455.0	434.78	-20.22	4.4
130300	400	25.0	483.59	462.0	404.04	-57.96	12.5
130300	400	25.0	483.59	462.0	475.90	13.90	3.0
130300	400	25.0	521.80	529.0	497.22	-31.78	6.0
130300	400	25.0	521.80	529.0	544.46	15.46	2.9
130300	400	25.0	561.46	525.0	585.55	60.55	11.5
150500	600	25.0	434.91	368.0	537.32	169.32	46.0
150500	600	25.0	434.91	366.0	372.98	6.98	1.9
150500	600	25.0	434.91	365.0	119.41	-245.59	67.3
220500	600	25.0	483.59	421.0	229.28	-191.72	45.5
220500	600	25.0	483.59	418.0	161.35	-256.65	61.4
250500	600	25.0	521.80	513.0	628.75	115.75	22.6

Tabla 5.7. Comparación de datos correlacionados con la ecuación 5.25 y suponiendo una conductividad de cobre en el sistema de recuperación de calor para presiones bajas

Fecha (DMA)	M <sub>AB</sub> (g/min)	P <sub>AB</sub> (inHg)	Q <sub>EV,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,IN</sub> (W)	Q <sub>AB,CU</sub> (W)	ΔQ <sub>AB</sub> (W)	%error (adim)
20300	400	9.0	521.80	430.0	407.67	22.33	5.2
130100	400	12.0	400.09	346.0	244.38	101.62	29.4
150100	400	12.0	400.09	365.0	194.78	170.22	46.6
150100	400	11.5	400.09	364.0	232.82	131.18	36.0
150100	400	11.0	400.09	365.0	272.53	92.47	25.3
160300	400	13.0	521.80	474.0	544.46	70.46	14.9
160300	400	11.5	521.80	467.0	545.48	78.48	16.8
250300	500	13.0	521.80	396.0	205.84	190.16	48.0
260200	400	12.0	400.09	334.0	154.49	179.51	53.7
280200	400	12.5	400.09	317.0	486.03	169.03	53.3
290200	400	10.0	434.91	359.0	392.78	33.78	9.4
300300	700	13.0	521.80	446.0	277.29	168.71	37.8

Tabla 5.8. Comparación de datos correlacionados con la ecuación 5.25 y suponiendo una conductividad de cobre en el sistema de recuperación de calor para presiones cercanas a la atmosférica

Estas diferencias son menores hasta en un 57 % con respecto al sistema construido en acero inoxidable. Es decir, se podría recuperar hasta 1.75 veces más energía que la que se recuperó en estos experimentos. Aún cuando la conductividad sea cinco veces mayor, no se podrá tener temperaturas mayores a las temperaturas de equilibrio presentes en el absorbedor. Sin embargo, se podrá aumentar el coeficiente de operación de 0.36 a 0.50 en condiciones de operación óptimas.

### **COMPARACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS CON EXPERIMENTALES**

Los datos experimentales obtenidos, se obtuvieron conforme a la metodología de operación descrita en el capítulo 4 y siguiendo el procedimiento experimental descrito en el presente capítulo. Estos datos difieren de los datos simulados con el programa TT-CIE en la mayor parte de los casos. Estas diferencias, como se mencionó en la sección anterior se atribuyen principalmente a la conductividad del material del cual está hecho el equipo y las irreversibilidades del mismo ciclo. Estas irreversibilidades obligan al sistema a desfazarse hasta una condición de equilibrio dependiente de las condiciones de operación presentes en el equipo. Por lo anterior, se muestran las diferencias entre los parámetros que varían significativamente entre los valores teóricos y experimentales.

#### **Coeficiente de operación**

En la tabla 5.3 se muestran los coeficientes de operación calculados en función de las entalpías calculadas con las temperaturas, concentraciones y presiones en cada una de las condiciones experimentadas ( $COP_{IN}$ ). Este coeficiente de operación es en la totalidad de los casos mayor al coeficiente de operación experimental ( $COP_{EX}$ ). Estas diferencias tienen valores entre 0.13 y 0.18 para coeficientes de operación con temperaturas de absorción mayores a 90 °C. Y para los coeficientes de operación a temperaturas de absorción menores, en cuyos casos el valor  $COP_{IN}$  es mayor, la diferencia alcanza valores de 0.40. Es decir, las diferencias entre los coeficientes de operación teórico - experimental es menor, para los valores pequeños de COP.

El valor promedio del coeficiente de operación del transformador térmico por absorción de una etapa fue de 0.10, con un valor máximo de 0.36 con un incremento de temperatura de 32 °C (fecha 201299).

## Potencia revalorizada

En la misma tabla se presenta para cada experimento la potencias teóricas esperada en el absorbedor ( $Q_{AB,IN}$ ). Esta potencia teórica de energía revalorizada se calculó en función de las temperaturas de operación de cada experimento y la potencia suministrada en el evaporador y generador, con ayuda del programa TT-CIE.

Una vez calculada la potencia teórica útil del absorbedor se comparó con la potencia obtenida experimentalmente en el absorbedor del transformador térmico, mostrándose esta diferencia también en la tabla 5.3. La diferencia es mayor en temperaturas altas de absorción. Esta diferencia se debe principalmente a la incapacidad del sistema de recuperación de calor de retirar toda la energía útil revalorizada en el absorbedor. Las diferencias varían entre el 32.1 % y el 97.8 %. Es decir, en el mejor de los casos se obtuvo el 67.9 % de la potencia calculada por el programa TT-CIE.

## Incremento de temperatura

Otro parámetro importante en el diseño y desempeño de un transformador térmico por absorción de una etapa es el incremento de temperaturas. Este valor varía del teórico calculado, por la tendencia del sistema al equilibrio termodinámico con los parámetros presentes en cada experimento. Es decir, una vez fija la presión y concentración, el sistema tenderá a un valor de temperatura para permanecer en equilibrio, sin embargo, este valor en algunas ocasiones difiere del teórico calculado. Esta diferencia se puede considerar como un estado de equilibrio desfasado del teórico debido principalmente por la diferencia de presión con respecto al valor teórico.

El incremento de temperatura se definió como el incremento en grados centígrados obtenido en la energía recuperada en el absorbedor con respecto a la energía suministrada en el evaporador,  $T_{AB,EX} - T_{EV,EX}$ . El incremento teórico  $T_{AB,I} - T_{EV}$ , difiere del experimental solamente en el minuendo, ya que  $T_{EV,EX} = T_{EV}$ . Sin embargo, existe una diferencia pequeña (en promedio de 8.9 °C) entre los valores  $T_{AB,EX}$  y  $T_{AB,I}$ . En la mayoría de los casos, esta diferencia tendió a cero.

Finalmente, se puede considerar que el incremento de temperatura experimental es prácticamente el mismo valor que se puede calcular con el programa TT-CIE.

## CONCLUSIONES

En este capítulo se mostraron los principales resultados experimentales obtenidos durante el estudio experimental de un transformador térmico por absorción de una etapa operando con la mezcla Carrol - agua.

En los resultados mostrados en este capítulo se mostraron los límites de operación del equipo para las temperaturas, presiones y concentraciones de sus principales componentes.

Las correlaciones encontradas para los principales parámetros de diseño tienen factores de correlación razonablemente aceptables para la representatividad del desempeño del transformador térmico por absorción de una etapa operado con la mezcla Carrol - agua.

Se ha propuesto una correlación para el cálculo rápido de la potencia revalorizada en función de parámetros termodinámicos de fácil medición en un equipo experimental.

La operación del equipo mostró que el cambio de material y por lo tanto de la conductividad pueden lograr coeficientes de operación calculados por el modelo presentado.

Por otro lado, se ha demostrado que la operación del transformador térmico por absorción de una etapa con Carrol - agua, se encuentra en condiciones de operación similares a las predichas con el modelo mostrado, ya que en la mayoría de los experimentos realizados, la diferencia entre las temperaturas calculadas para el absorbedor y los valores alcanzados en los experimentos tiende a cero. Con esta conclusión se puede considerar que el programa TT-CIE utilizado es una herramienta muy útil y representativa para el cálculo de condiciones experimentales de los transformadores térmicos por absorción de una etapa.

Finalmente se mostró una correlación semi - empírica de parámetros medibles en la operación *in situ* de un TTA como lo son la potencia de evaporación, el flujo de solución y la presión del absorbedor para tener un cálculo rápido y confiable de la potencia útil revalorizada en el absorbedor.

## **Referencias**

- Barragan R M**, Heat Transformer Studies, Ph. D. Thesis, University of Salford, UK., (1994).
- Best R**, Rivera W., Cardoso M.J., Romero R.J. and Holland F.A., Modelling of single-stage and advanced absorption heat transformers operating with the water / Carrol mixture, Applied Thermal Engineering, Vol 17, No 11, pp 1111 – 1122, 1997
- Eisa M A R**, Best R. and Holland F.A., Thermodynamic design data for absorption heat transformers – Part I. Operating on water-lithium bromide. Heat Recovery Systems 6(5), pp.421-432, 1986
- George J M** and Srinvasa M. S., influence of absorber effectiveness on performance of vapour absorption heat transformers, Int. J. Energy Research, Vol 13, pp 629 – 638, 1989
- Jernqvist A.**, Abrahamsson K. and Aly G., On the efficiencies of absorption heat transformers, Heat Recovery Systems & CHP, 12(4), 323-334, 1992
- McNelly L A**, Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide ASHRAE Transactions, 85(1), 413-434, 1979
- Perry R H** and Green D, Perry's Chemical Engineers' Handbook, Sixth Ed., McGraw Hill, Inc., USA., pp. 3.237-3.245, 1984.
- Reimann R C** and Biermann W J, Development of a single family absorption chiller for use in solar heating and cooling systems, Phase III Final Report, Prepared for the USA Department of Energy under contract EG-77-C-03-1587, Carrier Corporation, October, 1984
- Yin J**, Shi L, Zhu M, Han L, Performance analysis of an absorption heat transformer with diferent working fluid combinations, Applied Energy, 67, 281 - 292, 2000



Fecha (DMA)	T <sub>CO</sub> (°C)	T <sub>GE</sub> (°C)	T <sub>EV</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)	X <sub>GE</sub> (%w)	X <sub>AB</sub> (%w)	P <sub>CO</sub> (inHg)	P <sub>AB</sub> (inHg)	Q <sub>EV,EX</sub> (W)	Q <sub>GE,EX</sub> (W)	Q <sub>CO,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,EX</sub> (W)
10300	31.9	71.3	81.0	92.0	62.4	62.0	27.0	15.0	483.6	371.7	759.8	95.5
10400	35.5	70.9	63.3	89.5	57.4	57.0	27.5	23.5	521.8	404.6	874.1	52.3
10400	37.5	73.0	66.7	94.4	58.2	57.5	27.5	23.0	521.8	404.6	898.8	27.6
20300	37.4	83.1	90.5	91.5	62.3	61.0	27.0	9.0	521.8	404.6	809.9	116.5
30400	32.4	74.0	64.3	93.6	62.2	61.4	28.0	23.5	400.1	319.9	648.2	71.9
30400	31.3	63.8	65.2	86.9	58.8	57.9	28.0	22.5	400.1	319.9	695.8	24.2
30400	32.3	68.1	65.8	91.7	60.0	59.3	28.0	22.5	400.1	319.9	681.1	38.9
30400	31.5	65.2	65.8	88.5	59.3	58.3	28.0	22.5	400.1	319.9	691.2	28.9
30400	34.0	75.2	65.8	96.6	62.4	61.6	28.0	23.5	400.1	319.9	700.2	19.8
30400	33.5	72.8	66.0	95.4	61.6	61.2	28.0	22.5	400.1	319.9	674.4	45.6
30400	32.8	71.0	66.2	94.6	61.3	60.4	28.0	22.5	400.1	319.9	678.2	41.8
40300	33.2	77.5	71.9	92.0	63.8	61.9	27.0	20.0	521.8	404.6	832.3	94.2
40300	33.2	76.4	72.8	92.5	63.7	61.8	27.0	19.0	521.8	404.6	823.3	103.1
40300	34.4	79.4	73.3	93.2	64.0	62.5	27.0	20.0	521.8	404.6	792.4	134.1
40300	35.5	78.0	74.3	92.9	63.2	61.9	27.0	20.0	521.8	404.6	777.6	148.8
40300	36.0	77.8	74.4	92.1	62.7	61.4	27.0	20.0	521.8	404.6	791.4	135.0
40300	32.1	73.8	74.6	92.9	62.5	61.3	27.0	18.5	521.8	404.6	808.8	117.6
60400	34.8	76.7	68.4	89.1	62.0	61.3	27.5	22.0	400.1	319.9	684.3	35.7
60400	32.3	75.6	69.6	91.5	62.2	61.2	27.5	21.0	400.1	319.9	672.8	47.2
60400	33.7	79.2	72.6	98.5	62.8	61.7	27.5	20.5	483.6	319.9	788.7	14.8
60400	36.2	79.1	73.5	99.4	62.4	61.9	27.5	20.0	521.8	319.9	815.1	26.6
60400	35.4	78.4	76.2	103.1	61.8	60.7	27.5	19.0	659.6	319.9	940.6	39.0
90300	32.1	74.2	72.4	94.0	63.7	62.1	27.0	19.5	483.6	371.7	732.4	122.9
100400	30.9	71.2	67.7	89.0	62.6	61.2	27.5	21.0	400.1	319.9	690.4	29.7
100400	33.2	73.8	74.3	88.1	62.8	61.5	27.5	20.0	400.1	319.9	684.1	35.9
110400	33.9	74.1	63.7	87.4	61.6	60.3	28.0	23.5	400.1	319.9	682.4	37.7
110400	33.9	74.6	64.3	88.8	61.9	60.4	28.0	24.0	400.1	319.9	676.2	43.8
110400	33.9	73.5	64.4	90.0	61.5	60.2	28.0	23.0	400.1	319.9	683.5	36.5
110400	33.5	72.8	64.9	88.3	61.5	60.4	28.0	22.5	400.1	319.9	685.7	34.3
110400	32.4	71.6	65.2	88.5	61.4	60.6	28.0	22.5	400.1	319.9	690.5	29.6
120100	22.0	66.0	74.0	81.0	58.0	57.3	27.0	19.0	400.1	319.9	576.5	143.5

Fecha (DMA)	COP <sub>EX</sub> (adim)	COP <sub>EX,(AB-EV)</sub> (adim)	COP <sub>IN</sub> (adim)	ΔCOP (adim)	RC (%)	FR (adim)	Q <sub>AB,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,IN</sub> (W)	ΔQ <sub>AB</sub> (W)	%ΔQ <sub>AB</sub> (adim)	T <sub>AB,IN</sub> (°C)	T <sub>AB,EX</sub> (°C)
10300	0.112	0.127	0.438	0.326	0.3	160.82	95.5	375.0	279.5	74.5	110.0	92.0
10400	0.056	0.254	0.452	0.396	0.3	126.08	52.3	432.0	379.7	87.9	91.0	89.5
10400	0.030	0.317	0.462	0.432	0.3	80.69	27.6	441.0	413.4	93.7	94.0	94.4
20300	0.126	0.012	0.453	0.327	0.7	46.36	116.5	430.0	313.5	72.9	121.0	91.5
30400	0.100	0.384	0.473	0.373	0.3	76.76	71.9	358.0	286.1	79.9	93.0	93.6
30400	0.034	0.071	0.414	0.380	0.3	63.65	24.2	278.0	253.8	91.3	93.0	86.9
30400	0.054	0.106	0.455	0.401	0.3	82.53	38.9	329.0	290.1	88.2	93.0	91.7
30400	0.040	0.081	0.438	0.398	0.3	60.82	28.9	307.0	278.1	90.6	93.0	88.5
30400	0.027	0.445	0.468	0.441	0.3	77.31	19.8	350.0	330.2	94.3	96.0	96.6
30400	0.063	0.134	0.467	0.404	0.3	145.87	45.6	345.0	299.4	86.8	95.0	95.4
30400	0.058	0.123	0.469	0.411	0.3	63.43	41.8	348.0	306.2	88.0	94.0	94.6
40300	0.102	0.213	0.47	0.368	0.6	33.87	94.2	464.0	369.8	79.7	101.0	92.0
40300	0.111	0.214	0.466	0.355	0.5	33.77	103.1	456.0	352.9	77.4	102.0	92.5
40300	0.145	0.228	0.473	0.328	0.7	43.01	134.1	469.0	334.9	71.4	102.0	93.2
40300	0.161	0.218	0.467	0.306	0.8	46.02	148.8	458.0	309.2	67.5	103.0	92.9
40300	0.146	0.203	0.464	0.318	0.9	48.08	135.0	452.0	317.0	70.1	103.0	92.1
40300	0.127	0.203	0.459	0.332	0.4	54.72	117.6	442.0	324.4	73.4	104.0	92.9
60400	0.050	0.259	0.48	0.430	0.3	92.33	35.7	364.0	328.3	90.2	96.0	89.1
60400	0.066	0.277	0.471	0.405	0.3	61.90	47.2	359.0	311.8	86.9	99.0	91.5
60400	0.018	0.333	0.473	0.455	0.3	58.19	14.8	435.0	420.2	96.6	102.0	98.5
60400	0.032	0.325	0.469	0.437	0.3	140.63	26.6	463.0	436.4	94.2	102.0	99.4
60400	0.040	0.297	0.464	0.424	0.3	53.46	39.0	573.0	534.0	93.2	105.0	103.1
90300	0.144	0.262	0.463	0.319	0.3	40.30	122.9	413.0	290.1	70.2	101.0	94.0
100400	0.041	0.257	0.47	0.429	0.3	45.91	29.7	348.0	318.3	91.5	96.0	89.0
100400	0.050	0.170	0.458	0.408	0.4	47.26	35.9	338.0	302.1	89.4	103.0	88.1
110400	0.052	0.292	0.475	0.423	0.8	48.27	37.7	362.0	324.3	89.6	92.0	87.4
110400	0.061	0.308	0.478	0.417	1	40.57	43.8	366.0	322.2	88.0	92.0	88.8
110400	0.051	0.314	0.472	0.421	0.6	48.02	36.5	356.0	319.5	89.8	92.0	90.0
110400	0.048	0.286	0.472	0.424	0.4	55.62	34.3	354.0	319.7	90.3	93.0	88.3
110400	0.041	0.281	0.473	0.432	0.3	72.19	29.6	356.0	326.4	91.7	93.0	88.5
120100	0.199	0.073	0.458	0.259	0.6	77.04	143.5	336.0	192.5	57.3	103.0	81.0

Fecha (DMA)	$\Delta T_{IN}$ (°C)	$T_{AB,EX}$ (°C)	$T_{EV,EX}$ (°C)	$\Delta\Delta T$ (°C)	% $\Delta\Delta T$ (adim)	$M_{EV}$ (g/min)	$M_{AB \rightarrow GE}$ (g/min)	$M_{GE \rightarrow AB}$ (g/min)	$M_{WA}$ (Kg/min)	$M_{OIL}$ (g/min)	$T_{BA}$ (°C)	$T_{OIL,IN}$ (°C)	$T_{OIL,LE}$ (°C)	$\Delta T_{OIL}$ (°C)
10300	29.0	11.0	18.0	62.1	12	400	400	2.04	283.8	80.6	75.0	84.7	9.66	
10400	27.7	26.1	1.5	5.6	16	700	700	2.04	258.6	81.0	75.0	80.8	5.81	
10400	27.3	27.7	-0.4	1.3	14	700	700	2.04	304.0	90.0	85.0	87.6	2.61	
20300	30.5	1.1	29.5	96.6	12	400	400	2.04	295.1	80.9	75.0	86.3	11.33	
30400	28.7	29.3	-0.6	2.2	12	600	600	2.04	270.4	80.7	75.0	82.6	7.63	
30400	27.8	21.7	6.1	21.9	16	400	400	2.04	67.5	30.9	31.0	41.3	10.30	
30400	27.2	25.9	1.3	4.9	14	600	600	2.04	84.6	31.0	33.0	46.2	13.21	
30400	27.2	22.7	4.5	16.6	14	500	500	2.04	73.9	31.0	32.0	43.2	11.21	
30400	30.2	30.8	-0.6	2.1	12	600	600	2.04	299.0	90.3	85.0	86.9	1.90	
30400	29.0	29.4	-0.4	1.4	12	1000	1000	2.04	94.5	31.2	35.0	48.9	13.85	
30400	27.8	28.4	-0.6	2.1	12	700	700	2.04	89.2	31.1	34.0	47.5	13.46	
40300	29.1	20.1	9.0	31.1	12	400	400	2.04	283.1	80.7	75.0	84.6	9.55	
40300	29.2	19.7	9.5	32.4	12	400	400	2.04	288.0	80.9	75.0	85.3	10.28	
40300	28.7	19.9	8.8	30.6	12	400	400	2.04	304.2	81.0	75.0	87.7	12.65	
40300	28.7	18.6	10.1	35.2	12	400	400	2.04	311.6	81.2	75.0	88.7	13.71	
40300	28.6	17.7	10.9	38.1	12	400	400	2.04	304.7	81.3	75.0	87.7	12.72	
40300	29.4	18.3	11.1	37.9	12	400	400	2.04	295.7	80.9	75.0	86.4	11.42	
60400	27.6	20.7	7.0	25.2	12	600	600	2.04	259.5	80.8	77.0	81.0	3.95	
60400	29.4	21.9	7.5	25.5	12	400	400	2.04	261.0	80.8	76.0	81.2	5.19	
60400	29.4	26.0	3.5	11.8	12	600	600	2.04	295.9	90.7	85.0	86.4	1.44	
60400	28.5	25.9	2.6	9.3	16	600	600	2.04	303.3	90.3	85.0	87.5	2.52	
60400	28.8	26.9	1.9	6.6	18	600	600	2.04	310.9	90.6	85.0	88.6	3.60	
90300	28.6	21.6	7.0	24.5	14	380	400	2.04	298.5	81.1	75.0	86.8	11.82	
100400	28.3	21.3	7.0	24.8	12	400	400	2.04	249.7	80.7	76.0	79.4	3.41	
100400	28.7	13.8	14.9	51.8	12	400	400	1.25	253.8	80.9	76.0	80.1	4.06	
110400	28.3	23.7	4.6	16.2	14	400	400	2.04	255.0	80.8	76.0	80.2	4.24	
110400	27.7	24.6	3.2	11.4	14	400	400	2.04	258.9	80.9	76.0	80.9	4.86	
110400	27.6	25.5	2.0	7.4	14	400	400	2.04	254.2	80.9	76.0	80.1	4.12	
110400	28.1	23.4	4.7	16.7	14	400	400	2.04	252.8	80.7	76.0	79.9	3.90	
110400	27.8	23.3	4.5	16.2	14	400	400	2.04	249.7	80.8	76.0	79.4	3.40	
120100	29.0	7.0	22.0	75.9	16	400	400	2.04	216.8	60.7	55.0	74.0	19.00	

Fecha (DMA)	T <sub>CO</sub> (°C)	T <sub>GE</sub> (°C)	T <sub>EV</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)	X <sub>GE</sub> (%w)	X <sub>AB</sub> (%w)	P <sub>CO</sub> (inHg)	P <sub>AB</sub> (inHg)	Q <sub>EV,EX</sub> (W)	Q <sub>GE,EX</sub> (W)	Q <sub>CO,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,EX</sub> (W)
120200	22.0	60.0	72.0	82.0	58.4	57.6	27.0	19.0	400.1	319.9	648.5	71.5
120200	22.0	67.0	72.0	98.0	60.3	59.6	27.0	20.0	508.9	415.9	667.8	257.0
120200	22.0	62.0	75.0	92.0	59.4	58.3	27.0	18.0	446.8	350.5	688.3	109.1
120200	22.0	69.0	77.0	88.0	60.4	59.5	27.0	16.0	483.6	371.7	740.5	114.8
120500	38.4	88.5	60.2	94.1	62.1	61.5	26.0	25.0	400.1	319.9	626.3	93.7
120500	38.8	89.1	62.8	96.7	62.1	61.3	26.0	23.5	400.1	319.9	696.1	23.9
130100	40.3	87.1	85.8	90.8	57.5	56.9	27.0	12.0	400.1	319.9	650.2	69.8
130300	33.5	79.4	59.2	91.6	64.3	62.5	27.0	25.0	483.6	371.7	731.1	124.2
130300	33.4	78.7	59.3	90.8	64.2	62.4	27.0	25.0	483.6	371.7	739.9	115.4
130300	33.5	80.1	59.6	92.3	64.5	62.8	27.0	25.0	483.6	371.7	719.3	136.0
130300	33.3	76.1	60.3	91.8	63.3	61.9	27.0	24.0	483.6	371.7	744.6	110.7
130300	33.9	80.5	61.0	95.0	64.5	62.7	27.0	25.0	521.8	371.7	751.4	142.1
130300	33.3	74.3	61.0	92.4	62.6	61.1	27.0	23.5	483.6	371.7	760.9	94.4
130300	33.6	80.9	61.1	94.9	64.5	62.6	27.0	25.0	521.8	371.7	737.9	155.6
130300	34.1	72.7	62.1	90.2	62.4	60.8	27.0	23.0	483.6	371.7	781.5	73.8
130300	34.4	81.4	62.3	96.2	64.1	62.8	27.0	25.0	561.5	371.7	765.9	167.3
130300	34.0	81.8	63.2	97.5	64.4	62.4	27.0	24.5	561.5	371.7	741.2	192.0
131299	23.0	68.0	70.0	97.0	64.5	61.1	27.0	20.0	400.1	319.9	540.1	179.9
140100	22.0	67.0	78.0	92.0	61.2	60.3	27.0	16.0	458.9	319.9	762.1	16.8
140100	22.0	67.0	79.0	85.0	61.1	59.9	27.0	15.5	458.9	319.9	734.7	44.1
140100	22.0	67.0	79.0	84.0	61.6	60.4	27.0	15.7	458.9	319.9	734.7	44.1
150100	22.0	83.0	85.0	89.0	60.4	59.8	26.0	12.0	400.1	319.9	664.4	55.7
150100	22.0	83.0	86.0	88.0	61.0	60.2	26.0	11.5	400.1	319.9	653.5	66.5
150100	22.0	84.0	87.0	88.0	61.0	60.7	26.0	11.0	400.1	319.9	642.2	77.9
150200	22.0	62.0	67.0	88.0	59.7	58.6	27.0	21.5	400.1	319.9	696.1	23.9
150200	22.0	67.0	70.0	90.0	61.2	59.8	27.0	20.0	446.8	350.5	725.0	72.4
150500	33.4	78.4	57.7	96.8	63.7	62.6	27.5	25.0	434.9	350.5	631.9	153.5
150500	34.9	81.5	59.1	100.4	64.3	63.2	27.5	25.0	434.9	350.5	678.9	106.6
150500	34.8	83.1	90.0	102.2	64.7	63.6	27.5	25.0	434.9	350.5	751.3	34.1
151299	22.0	78.0	78.0	106.0	66.1	61.4	27.0	18.0	400.1	393.5	755.4	38.1
151299	22.0	76.0	83.0	104.0	67.5	65.5	27.0	14.0	400.1	393.5	781.4	12.2

Fecha (DMA)	COP <sub>EX</sub> (adim)	COP <sub>EX,(AB-EV)</sub> (adim)	COP <sub>IN</sub> (adim)	ΔCOP (adim)	RC (%)	FR (adim)	Q <sub>AB,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,IN</sub> (W)	ΔQ <sub>AB</sub> (W)	%ΔQ <sub>AB</sub> (adim)	T <sub>AB,IN</sub> (°C)	T <sub>AB,EX</sub> (°C)
120200	0.099	0.099	0.434	0.335	0.4	77.92	71.5	304.0	232.5	76.5	101.0	82.0
120200	0.278	0.314	0.463	0.185	0.4	86.79	257.0	436.0	179.0	41.1	101.0	98.0
120200	0.137	0.179	0.441	0.304	0.4	55.88	109.1	349.0	239.9	68.7	104.0	92.0
120200	0.134	0.114	0.461	0.327	0.4	65.28	114.8	410.0	295.2	72.0	107.0	88.0
120500	0.130	0.469	0.494	0.364	0.4	101.29	93.7	404.0	310.3	76.8	94.0	94.1
120500	0.033	0.506	0.493	0.460	0.4	71.70	23.9	395.0	371.1	93.9	97.0	96.7
130100	0.097	0.066	0.464	0.367	0.5	86.08	69.8	346.0	276.2	79.8	117.0	90.8
130300	0.145	0.395	0.478	0.333	0.8	36.12	124.2	455.0	330.8	72.7	92.0	91.6
130300	0.135	0.378	0.482	0.347	0.7	34.41	115.4	462.0	346.6	75.0	91.0	90.8
130300	0.159	0.406	0.482	0.323	0.9	38.13	136.0	462.0	326.0	70.6	92.0	92.3
130300	0.129	0.375	0.471	0.342	0.6	45.15	110.7	442.0	331.3	75.0	92.0	91.8
130300	0.159	0.409	0.479	0.320	0.6	36.33	142.1	529.0	386.9	73.1	95.0	95.0
130300	0.110	0.363	0.467	0.357	0.5	41.64	94.4	430.0	335.6	78.0	92.0	92.4
130300	0.174	0.414	0.479	0.305	0.7	33.83	155.6	529.0	373.4	70.6	95.0	94.9
130300	0.086	0.311	0.471	0.385	0.4	39.73	73.8	436.0	362.2	83.1	90.0	90.2
130300	0.179	0.406	0.479	0.300	0.7	48.60	167.3	525.0	357.7	68.1	96.0	96.2
130300	0.206	0.425	0.479	0.273	0.8	32.23	192.0	523.0	331.0	63.3	98.0	97.5
131299	0.250	0.307	0.466	0.216	0.9	18.88	179.9	348.0	168.1	48.3	99.0	97.0
140100	0.022	0.151	0.454	0.432	0.6	63.24	16.8	378.0	361.2	95.6	108.0	92.0
140100	0.057	0.068	0.452	0.395	0.5	52.03	44.1	376.0	331.9	88.3	109.0	85.0
140100	0.057	0.057	0.452	0.395	0.5	50.49	44.1	376.0	331.9	88.3	109.0	84.0
150100	0.077	0.052	0.477	0.400	0.9	104.69	55.7	365.0	309.3	84.8	116.0	89.0
150100	0.092	0.026	0.476	0.384	0.8	76.22	66.5	364.0	297.5	81.7	117.0	88.0
150100	0.108	0.014	0.477	0.369	0.7	165.19	77.9	365.0	287.1	78.7	118.0	88.0
150200	0.033	0.232	0.462	0.429	0.4	52.12	23.9	334.0	310.1	92.8	95.0	88.0
150200	0.091	0.227	0.465	0.374	0.4	44.58	72.4	387.0	314.6	81.3	99.0	90.0
150500	0.195	0.551	0.448	0.253	0.4	60.21	153.5	368.0	214.5	58.3	97.0	96.8
150500	0.136	0.640	0.45	0.314	0.4	63.12	106.6	366.0	259.4	70.9	100.0	100.4
150500	0.043	0.201	0.457	0.414	0.4	59.51	34.1	365.0	330.9	90.7	121.0	102.2
151299	0.048	0.449	0.477	0.429	0.9	14.12	38.1	365.0	326.9	89.6	108.0	106.0
151299	0.015	0.323	0.47	0.455	0.3	34.01	12.2	353.0	340.8	96.5	113.0	104.0

Fecha (DMA)	$\Delta T_{IN}$ (°C)	$T_{AB,EX} - T_{EV,EX}$ (°C)	$\Delta\Delta T$ (°C)	% $\Delta\Delta T$ (adim)	$M_{EV}$ (g/min)	$M_{AB \rightarrow GE}$ (g/min)	$M_{GE \rightarrow AB}$ (g/min)	$M_{WA}$ (Kg/min)	$M_{OIL}$ (g/min)	$T_{BA}$ (°C)	$T_{OIL,IN}$ (°C)	$T_{OIL,LE}$ (°C)	$\Delta T_{OIL}$ (°C)
120200	29.0	10.0	19.0	65.5	12	400	400	2.04	205.3	70.9	62.0	72.0	10.00
120200	29.0	26.0	3.0	10.3	12	400	400	2.04	320.8	70.8	67.0	90.0	23.00
120200	29.0	17.0	12.0	41.4	12	400	400	2.04	240.9	70.8	65.0	78.0	13.00
120200	30.0	11.0	19.0	63.3	12	400	400	2.04	253.4	70.7	67.0	80.0	13.00
120500	33.8	33.9	-0.1	0.4	12	600	600	2.04	285.6	81.0	75.5	84.9	9.42
120500	34.2	33.8	0.3	1.0	12	600	600	2.04	309.2	90.6	86.1	88.4	2.22
130100	31.2	4.9	26.2	84.2	10	400	400	2.04	277.6	80.0	76.5	83.7	7.22
130300	32.8	32.4	0.4	1.1	12	400	400	2.04	299.2	81.0	75.0	86.9	11.92
130300	31.7	31.5	0.2	0.6	14	400	400	2.04	294.6	81.0	75.0	86.3	11.25
130300	32.4	32.7	-0.3	0.9	12	400	400	2.04	305.2	80.7	75.0	87.8	12.79
130300	31.7	31.5	0.2	0.6	14	400	400	2.04	292.1	80.8	75.0	85.9	10.88
130300	34.1	34.0	0.0	0.1	12	400	400	2.04	308.3	81.3	75.0	88.2	13.23
130300	31.0	31.4	-0.4	1.4	16	400	400	2.04	283.2	80.8	75.0	84.6	9.57
130300	33.9	33.7	0.1	0.4	12	400	400	2.04	314.9	80.9	75.0	89.2	14.18
130300	27.9	28.1	-0.1	0.5	16	400	400	2.04	271.5	81.0	75.0	82.8	7.8
130300	33.7	33.9	-0.2	0.6	12	400	400	2.04	320.6	81.1	75.0	90.0	14.98
130300	34.8	34.3	0.5	1.4	12	400	400	2.04	332.2	81.2	75.0	91.6	16.59
131299	29.0	27.0	2.0	6.9	12	400	400	2.04	234.8	60.7	55.0	77.0	22.00
140100	30.0	14.0	16.0	53.3	14	500	500	2.04	240.9	80.4	76.0	78.0	2.00
140100	30.0	6.0	24.0	80.0	16	500	500	2.04	253.4	81.0	75.0	80.0	5.00
140100	30.0	5.0	25.0	83.3	16	500	500	2.04	253.4	80.5	75.0	80.0	5.00
150100	31.0	4.0	27.0	87.1	12	400	400	2.04	266.3	80.5	76.0	82.0	6.00
150100	31.0	2.0	29.0	93.5	12	400	400	2.04	272.8	81.0	76.0	83.0	7.00
150100	31.0	1.0	30.0	96.8	14	400	400	2.04	279.4	81.0	76.0	84.0	8.00
150200	28.0	21.0	7.0	25.0	14	400	400	2.04	228.7	80.0	73.0	76.0	3.00
150200	29.0	20.0	9.0	31.0	12	400	400	2.04	259.8	80.2	73.0	81.0	8.00
150500	39.3	39.1	0.2	0.4	16	600	600	2.04	318.0	80.9	75.8	89.6	13.86
150500	40.9	41.3	-0.4	1.0	16	600	600	2.04	349.2	90.7	85.2	93.9	8.76
150500	31.0	12.2	18.8	60.6	16	600	600	2.04	371.0	99.7	94.2	96.8	2.64
151299	30.0	28.0	2.0	6.7	12	400	400	2.04	365.0	98.9	93.0	96.0	3.00
151299	30.0	21.0	9.0	30.0	6	400	0.92	2.04	349.9	99.3	93.0	94.0	1.00

Fecha (DMA)	T <sub>CO</sub> (°C)	T <sub>GE</sub> (°C)	T <sub>EV</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)	X <sub>GE</sub> (%w)	X <sub>AB</sub> (%w)	P <sub>CO</sub> (inHg)	P <sub>AB</sub> (inHg)	Q <sub>EV,EX</sub> (W)	Q <sub>GE,EX</sub> (W)	Q <sub>CO,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,EX</sub> (W)
160300	43.6	94.3	68.5	99.0	59.0	58.5	24.0	22.0	521.8	404.6	735.4	191.0
160300	45.8	94.1	69.9	99.9	58.5	58.0	24.0	22.0	521.8	404.6	706.0	220.4
160300	30.4	70.1	72.5	100.9	61.6	60.4	27.0	19.0	521.8	404.6	780.4	146.0
160300	43.5	93.5	79.6	97.4	58.2	57.6	24.0	16.0	521.8	404.6	747.5	178.9
160300	44.5	93.9	84.6	99.8	59.1	58.0	24.0	13.0	521.8	404.6	770.9	155.6
160300	46.1	93.8	87.3	96.0	58.5	57.9	24.0	11.5	521.8	404.6	770.6	155.9
160500	35.5	84.6	65.3	93.8	62.7	61.9	27.0	23.0	483.6	371.7	739.2	116.0
160500	38.2	88.0	66.8	99.6	63.6	62.4	27.0	23.0	483.6	371.7	766.8	88.4
160500	36.4	89.8	68.3	103.4	64.0	63.0	27.0	22.5	483.6	371.7	839.0	16.3
180100	22.0	70.0	62.0	90.0	62.5	61.7	27.0	23.5	400.1	319.9	684.7	35.3
180100	22.0	70.0	65.0	90.0	62.4	61.6	27.0	23.0	400.1	319.9	684.7	35.3
180100	22.0	70.0	70.0	90.0	62.3	61.3	27.0	21.0	400.1	319.9	653.5	66.5
180400	31.3	78.7	76.6	88.1	64.0	63.2	28.0	18.0	400.1	319.9	689.2	30.9
180400	35.9	81.9	76.9	90.4	64.1	63.5	28.0	18.0	400.1	319.9	685.5	34.6
180400	33.5	81.0	76.9	89.3	64.3	63.3	28.0	18.0	400.1	319.9	660.0	60.0
180400	35.0	77.9	77.6	86.9	64.0	63.3	28.0	17.5	400.1	319.9	695.9	24.2
180400	34.7	77.1	78.3	89.1	64.1	63.7	28.0	17.5	400.1	319.9	669.7	50.3
190400	34.1	77.5	75.4	91.1	63.7	63.3	28.0	18.0	400.1	319.9	657.5	62.5
190400	34.5	82.7	75.8	90.6	63.5	62.9	28.0	18.5	400.1	319.9	652.8	67.2
190400	34.0	80.3	76.1	88.8	63.3	62.7	28.0	18.5	400.1	319.9	661.4	58.7
190400	35.5	77.6	77.9	92.1	63.0	62.9	28.0	17.0	400.1	319.9	656.0	64.0
200400	33.9	80.5	75.6	87.7	62.8	62.3	28.0	18.5	400.1	319.9	687.2	32.8
200400	36.3	78.3	76.4	86.9	62.5	62.0	28.0	17.5	400.1	319.9	705.3	14.8
200400	32.7	76.4	76.8	89.1	62.2	62.1	28.0	17.0	400.1	319.9	700.2	19.8
200400	34.4	82.6	77.6	88.6	63.1	62.5	28.0	18.0	400.1	319.9	671.2	48.8
201299	22.0	77.0	57.0	84.0	61.0	60.6	27.0	24.0	400.1	319.9	478.9	241.2
201299	22.0	78.0	58.0	90.0	61.6	61.0	27.0	23.0	400.1	319.9	463.5	256.6
201299	22.0	75.0	67.0	90.0	63.0	62.4	27.0	20.0	400.1	319.9	463.5	256.6
201299	22.0	73.0	74.0	82.0	66.2	65.6	27.0	20.0	400.1	319.9	625.4	94.6
201299	22.0	73.0	75.0	87.0	65.4	63.5	27.0	19.0	400.1	319.9	605.6	114.4
210100	22.0	74.0	60.0	90.0	61.4	60.6	27.0	24.0	400.1	319.9	664.4	55.7

Fecha (DMA)	COP <sub>EX</sub> (adim)	COP <sub>EX,(AB-EV)</sub> (adim)	COP <sub>IN</sub> (adim)	ΔCOP (adim)	RC (%)	FR (adim)	Q <sub>AB,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,IN</sub> (W)	ΔQ <sub>AB</sub> (W)	%ΔQ <sub>AB</sub> (adim)	T <sub>AB,IN</sub> (°C)	T <sub>AB,EX</sub> (°C)
160300	0.206	0.381	0.499	0.293	0.4	132.93	191.0	521.0	330.0	63.3	99.0	99.0
160300	0.238	0.389	0.494	0.256	0.4	115.43	220.4	517.0	296.6	57.4	100.0	99.9
160300	0.158	0.331	0.451	0.293	0.3	52.98	146.0	428.0	282.0	65.9	102.0	100.9
160300	0.193	0.218	0.484	0.291	0.5	102.05	178.9	494.0	315.1	63.8	110.0	97.4
160300	0.168	0.180	0.475	0.307	0.4	51.06	155.6	474.0	318.4	67.2	116.0	99.8
160300	0.168	0.102	0.471	0.303	0.5	89.08	155.9	467.0	311.1	66.6	118.0	96.0
160500	0.136	0.348	0.495	0.359	0.4	78.32	116.0	474.0	358.0	75.5	94.0	93.8
160500	0.103	0.455	0.494	0.391	0.4	56.95	88.4	467.0	378.6	81.1	100.0	99.6
160500	0.019	0.527	0.494	0.475	0.4	60.99	16.3	469.0	452.7	96.5	103.0	103.4
180100	0.049	0.343	0.48	0.431	0.6	75.16	35.3	374.0	338.7	90.6	90.0	90.0
180100	0.049	0.307	0.482	0.433	0.5	80.17	35.3	369.0	333.7	90.4	93.0	90.0
180100	0.092	0.264	0.472	0.380	0.4	62.09	66.5	358.0	291.5	81.4	99.0	90.0
180400	0.043	0.143	0.47	0.427	0.7	74.49	30.9	356.0	325.1	91.3	107.0	88.1
180400	0.048	0.173	0.47	0.422	1	99.75	34.6	356.0	321.4	90.3	107.0	90.4
180400	0.083	0.160	0.472	0.389	0.9	64.84	60.0	359.0	299.0	83.3	107.0	89.3
180400	0.034	0.113	0.459	0.425	0.5	95.25	24.2	339.0	314.8	92.9	108.0	86.9
180400	0.070	0.136	0.455	0.385	0.3	171.33	50.3	333.0	282.7	84.9	108.0	89.1
190400	0.087	0.193	0.465	0.378	0.3	181.99	62.5	348.0	285.5	82.0	104.0	91.1
190400	0.093	0.195	0.478	0.385	0.9	106.51	67.2	368.0	300.8	81.7	105.0	90.6
190400	0.081	0.163	0.472	0.391	0.7	116.17	58.7	358.0	299.3	83.6	105.0	88.8
190400	0.089	0.182	0.459	0.370	0.3	770.50	64.0	339.0	275.0	81.1	108.0	92.1
200400	0.046	0.148	0.472	0.426	0.7	114.32	32.8	358.0	325.2	90.8	105.0	87.7
200400	0.021	0.122	0.462	0.441	0.5	125.44	14.8	344.0	329.2	95.7	105.0	86.9
200400	0.027	0.143	0.458	0.431	0.3	374.57	19.8	338.0	318.2	94.1	107.0	89.1
200400	0.068	0.140	0.474	0.406	0.9	115.36	48.8	362.0	313.2	86.5	108.0	88.6
201299	0.335	0.348	0.493	0.158	0.9	164.68	241.2	398.0	156.8	39.4	84.0	84.0
201299	0.356	0.422	0.489	0.133	0.7	95.01	256.6	393.0	136.4	34.7	90.0	90.0
201299	0.356	0.304	0.49	0.134	0.5	99.92	256.6	378.0	121.4	32.1	95.0	90.0
201299	0.131	0.075	0.474	0.343	0.3	108.05	94.6	361.0	266.4	73.8	103.0	82.0
201299	0.159	0.119	0.473	0.314	0.3	34.42	114.4	359.0	244.6	68.1	104.0	87.0
210100	0.077	0.386	0.484	0.407	0.7	86.57	55.7	384.0	328.3	85.5	90.0	90.0



Fecha (DMA)	$\Delta T_{IN}$ (°C)	$T_{AB,EX} - T_{LV,EX}$ (°C)	$\Delta\Delta T$ (°C)	% $\Delta\Delta T$ (adim)	$M_{EV}$ (g/min)	$M_{AB \rightarrow GE}$ (g/min)	$M_{GE \rightarrow AB}$ (g/min)	$M_{WA}$ (Kg/min)	$M_{OIL}$ (g/min)	$T_{BA}$ (°C)	$T_{OIL,IN}$ (°C)	$T_{OIL,LE}$ (°C)	$\Delta T_{OIL}$ (°C)
160300	30.5	30.5	0.0	0.1	14	400	400	2.04	331.8	81.2	75.0	91.5	16.53
160300	30.2	30.0	0.1	0.5	14	400	400	2.04	345.0	80.9	75.0	93.3	18.34
160300	29.5	28.4	1.1	3.7	14	400	400	2.04	310.2	80.7	75.0	88.5	13.51
160300	30.4	17.8	12.6	41.5	14	400	400	2.04	326.1	81.0	75.0	90.8	15.75
160300	31.4	15.2	16.2	51.7	14	400	400	2.04	314.9	81.0	75.0	89.2	14.18
160300	30.7	8.7	22.1	71.8	14	400	400	2.04	315.1	81.1	75.0	89.2	14.20
160500	28.7	28.6	0.2	0.7	16	600	600	2.04	299.6	81.1	75.9	87.0	11.12
160500	33.2	32.8	0.4	1.2	16	600	600	2.04	340.4	90.8	85.3	92.7	7.46
160500	34.7	35.1	-0.4	1.2	16	600	600	2.04	368.5	100.1	95.2	96.5	1.27
180100	28.0	28.0	0.0	0.0	14	500	500	20.4	253.4	80.6	76.0	80.0	4.00
180100	28.0	25.0	3.0	10.7	14	500	500	2.04	253.4	80.7	76.0	80.0	4.00
180100	29.0	20.0	9.0	31.0	14	500	500	2.04	272.8	80.3	76.0	83.0	7.00
180400	30.4	11.4	19.0	62.4	14	600	600	2.04	258.2	81.3	77.3	80.8	3.43
180400	30.1	13.6	16.6	55.0	14	600	600	2.04	263.8	81.1	77.9	81.6	3.76
180400	30.1	12.4	17.7	58.7	14	600	600	2.04	266.2	81.3	75.5	82.0	6.47
180400	30.4	9.4	21.1	69.2	14	600	600	2.04	248.7	81.0	76.5	79.3	2.79
180400	29.7	10.9	18.9	63.5	12	600	600	2.04	258.8	80.8	75.3	80.8	5.58
190400	28.6	15.7	12.9	45.2	12	800	800	2.04	254.5	80.9	73.1	80.2	7.05
190400	29.2	14.8	14.4	49.4	14	800	800	2.04	272.2	81.0	75.8	82.9	7.09
190400	28.9	12.7	16.2	56.0	14	800	800	2.04	264.8	81.3	75.4	81.8	6.36
190400	30.1	14.2	15.9	52.9	14	800	800	2.04	264.8	81.0	74.8	81.8	6.94
200400	29.4	12.1	17.3	58.8	14	1000	1000	2.04	253.5	81.1	76.3	80.0	3.72
200400	28.6	10.5	18.1	63.3	14	1000	1000	2.04	239.6	81.2	76.0	77.8	1.77
200400	30.2	12.3	17.9	59.3	12	1000	1000	2.04	240.6	80.7	75.6	78.0	2.36
200400	30.4	11.0	19.4	63.8	14	1000	1000	2.04	263.9	80.9	76.3	81.6	5.31
201299	27.0	27.0	0.0	0.0	10	400	400	2.04	266.3	61.0	56.0	82.0	26.00
201299	32.0	32.0	0.0	0.0	11	400	400	2.04	272.8	60.7	56.0	83.0	27.00
201299	28.0	23.0	5.0	17.9	12	400	400	2.04	272.8	60.5	56.0	83.0	27.00
201299	29.0	8.0	21.0	72.4	12	400	400	2.04	194.0	60.6	56.0	70.0	14.00
201299	29.0	12.0	17.0	58.6	14	400	400	2.04	205.3	60.7	56.0	72.0	16.00
210100	30.0	30.0	0.0	0.0	14	500	500	2.04	266.3	80.6	76.0	82.0	6.00

Fecha (DMA)	T <sub>CO</sub> (°C)	T <sub>GE</sub> (°C)	T <sub>EV</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)	X <sub>GE</sub> (%w)	X <sub>AB</sub> (%w)	P <sub>CO</sub> (inHg)	P <sub>AB</sub> (inHg)	Q <sub>EV,EX</sub> (W)	Q <sub>GE,EX</sub> (W)	Q <sub>CO,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,EX</sub> (W)
210100	22.0	75.0	60.0	89.0	61.3	60.5	27.0	24.0	400.1	319.9	664.4	55.7
210100	22.0	73.0	62.0	92.0	61.3	61.0	27.0	23.0	400.1	319.9	653.5	66.5
210100	22.0	73.0	70.0	86.0	61.7	61.2	27.0	20.0	400.1	319.9	644.0	76.0
210100	22.0	73.0	70.0	84.0	61.8	61.3	27.0	20.0	400.1	319.9	711.8	8.2
210100	22.0	73.0	77.0	95.0	62.0	61.6	27.0	17.0	400.1	319.9	704.5	15.5
210300	33.9	74.9	60.1	88.5	61.9	61.2	27.5	23.5	400.1	319.9	692.0	28.0
210300	33.3	73.7	60.3	88.4	61.7	60.7	27.5	23.5	400.1	319.9	695.7	24.4
210300	31.5	70.6	61.6	87.4	60.6	59.4	27.5	23.0	400.1	319.9	699.2	20.8
210300	34.7	71.3	62.0	90.4	60.8	60.0	27.5	23.0	400.1	319.9	701.0	19.0
210300	36.4	76.2	62.2	91.2	62.4	61.5	27.5	23.0	400.1	319.9	685.0	35.0
220500	33.1	78.9	51.3	91.8	64.4	63.4	27.5	25.0	483.6	371.7	789.8	65.5
220500	33.3	81.4	55.3	97.2	64.6	63.5	27.5	25.0	483.6	371.7	809.2	46.1
220500	33.6	82.9	57.8	100.9	64.8	64.1	27.5	24.5	483.6	371.7	827.8	27.5
230500	33.6	79.7	58.4	96.3	63.8	62.4	27.0	24.5	521.8	404.6	791.3	135.2
230500	34.2	82.1	59.8	99.8	64.0	62.9	27.0	24.5	521.8	404.6	858.9	67.6
230500	34.6	85.3	62.3	104.8	64.9	64.0	27.0	24.0	521.8	404.6	884.1	42.3
230500	35.3	88.8	64.5	110.7	65.9	64.9	27.0	24.0	521.8	404.6	885.8	40.6
240100	22.0	66.0	76.0	84.0	61.2	61.1	27.0	17.0	400.1	319.9	678.1	42.0
240400	32.2	73.7	74.5	98.1	62.5	61.7	28.0	19.5	400.1	319.9	653.0	67.0
240400	33.6	73.2	76.3	98.5	62.5	61.4	28.0	18.5	434.9	319.9	655.2	99.6
240400	34.5	85.1	78.6	98.8	64.8	63.8	28.0	17.0	434.9	350.5	767.0	18.4
240400	33.8	72.7	79.7	100.6	61.6	60.7	28.0	17.0	483.6	319.9	725.5	78.0
240400	34.5	84.5	79.8	101.3	64.8	63.8	28.0	16.5	434.9	350.5	724.0	61.4
240400	34.0	72.6	82.5	99.5	61.2	59.8	28.0	16.0	521.8	319.9	749.3	92.5
250300	36.8	75.7	84.1	91.6	58.2	57.3	26.5	13.0	521.8	404.6	867.6	58.8
250300	37.6	82.6	86.7	101.5	60.7	59.7	27.0	12.0	521.8	404.6	903.3	23.1
250400	38.4	81.7	78.7	91.8	61.1	60.8	27.5	17.5	434.9	350.5	736.6	48.9
250400	38.2	81.1	78.7	91.6	61.1	60.4	27.5	17.5	434.9	350.5	747.0	38.4
250400	36.4	80.8	79.2	91.3	61.1	60.1	27.5	17.5	434.9	350.5	736.6	48.8
250400	36.8	79.0	80.6	93.0	60.2	59.5	27.5	17.0	434.9	350.5	733.7	51.7
250500	38.5	88.1	58.0	95.8	62.7	62.2	26.0	25.0	521.8	404.6	746.8	179.6

Fecha (DMA)	COP <sub>EX</sub> (adim)	COP <sub>EX,(AB-EV)</sub> (adim)	COP <sub>IN</sub> (adim)	ΔCOP (adim)	RC (%)	FR (adim)	Q <sub>AB,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,IN</sub> (W)	ΔQ <sub>AB</sub> (W)	%ΔQ <sub>AB</sub> (adim)	T <sub>AB,IN</sub> (°C)	T <sub>AB,EX</sub> (°C)
210100	0.077	0.374	0.486	0.409	0.8	74.40	55.7	388.0	332.3	85.7	89.0	89.0
210100	0.092	0.396	0.483	0.391	0.6	180.64	66.5	378.0	311.5	82.4	92.0	92.0
210100	0.106	0.211	0.477	0.371	0.4	137.27	76.0	367.0	291.0	79.3	99.0	86.0
210100	0.011	0.159	0.477	0.466	0.5	129.68	8.2	367.0	358.8	97.8	99.0	84.0
210100	0.022	0.194	0.47	0.448	0.35	170.80	15.5	354.0	338.5	95.6	107.0	95.0
210300	0.039	0.334	0.476	0.437	0.4	95.98	28.0	371.0	343.0	92.5	89.0	88.5
210300	0.034	0.326	0.477	0.443	0.4	66.17	24.4	373.0	348.6	93.5	88.0	88.4
210300	0.029	0.297	0.471	0.442	0.4	51.09	20.8	360.0	339.2	94.2	90.0	87.4
210300	0.026	0.325	0.459	0.433	0.3	73.20	19.0	343.0	324.0	94.4	90.0	90.4
210300	0.049	0.348	0.474	0.425	0.3	70.00	35.0	366.0	331.0	90.4	91.0	91.2
220500	0.077	0.443	0.461	0.384	0.4	65.23	65.5	421.0	355.5	84.4	92.0	91.8
220500	0.054	0.542	0.459	0.405	0.4	60.71	46.1	418.0	371.9	89.0	97.0	97.2
220500	0.032	0.642	0.45	0.418	0.4	84.77	27.5	409.0	381.5	93.3	101.0	100.9
230500	0.146	0.438	0.464	0.318	0.4	47.00	135.2	464.0	328.8	70.9	96.0	96.3
230500	0.073	0.505	0.46	0.387	0.4	57.99	67.6	457.0	389.4	85.2	100.0	99.8
230500	0.046	0.615	0.454	0.408	0.4	79.33	42.3	443.0	400.7	90.4	105.0	104.8
230500	0.044	0.779	0.462	0.418	0.4	67.21	40.6	448.0	407.4	90.9	111.0	110.7
240100	0.058	0.093	0.456	0.398	0.35	361.16	42.0	333.0	291.0	87.4	105.0	84.0
240400	0.093	0.315	0.46	0.367	0.3	77.70	67.0	342.0	275.0	80.4	103.0	98.1
240400	0.132	0.297	0.447	0.315	0.3	57.55	99.6	350.0	250.4	71.5	105.0	98.5
240400	0.023	0.272	0.476	0.453	0.4	61.26	18.4	396.0	377.6	95.4	109.0	98.8
240400	0.097	0.264	0.435	0.338	0.3	75.08	78.0	371.0	293.0	79.0	110.0	100.6
240400	0.078	0.306	0.475	0.397	0.3	67.94	61.4	394.0	332.6	84.4	110.0	101.3
240400	0.110	0.206	0.431	0.321	0.3	43.66	92.5	392.0	299.5	76.4	113.0	99.5
250300	0.063	0.075	0.433	0.370	0.3	60.45	58.8	396.0	337.2	85.1	114.0	91.6
250300	0.025	0.195	0.454	0.429	0.3	57.02	23.1	433.0	409.9	94.7	118.0	101.5
250400	0.062	0.150	0.464	0.402	0.3	195.53	48.9	377.0	328.1	87.0	109.0	91.8
250400	0.049	0.144	0.46	0.411	0.3	85.87	38.4	371.0	332.6	89.6	109.0	91.6
250400	0.062	0.138	0.46	0.398	0.3	61.05	48.8	371.0	322.2	86.8	109.0	91.3
250400	0.066	0.146	0.453	0.387	0.3	79.99	51.7	359.0	307.3	85.6	111.0	93.0
250500	0.194	0.476	0.487	0.293	0.4	142.34	179.6	513.0	333.4	65.0	96.0	95.8

Fecha (DMA)	$\Delta T_{IN}$ (°C)	$T_{AB,EX} - T_{EV,EX}$ (°C)	$\Delta \Delta T$ (°C)	$\% \Delta \Delta T$ (adim)	$M_{EV}$ (g/min)	$M_{AB \rightarrow GE}$ (g/min)	$M_{GE \rightarrow AB}$ (g/min)	$M_{WA}$ (Kg/min)	$M_{OIL}$ (g/min)	$T_{BA}$ (°C)	$T_{OIL,IN}$ (°C)	$T_{OIL,LE}$ (°C)	$\Delta T_{OIL}$ (°C)
210100	29.0	29.0	0.0	0.0	14	500	500	2.04	266.3	80.8	76.0	82.0	6.00
210100	30.0	30.0	0.0	0.0	14	500	500	2.04	272.8	81.3	76.0	83.0	7.00
210100	29.0	16.0	13.0	44.8	14	500	500	2.04	272.8	80.5	75.0	83.0	8.00
210100	29.0	14.0	15.0	51.7	14	500	500	2.04	234.8	80.0	76.0	77.0	1.00
210100	30.0	18.0	12.0	40.0	12	500	500	2.04	222.8	80.3	73.0	75.0	2.00
210300	28.9	28.4	0.5	1.6	12	800	800	2.04	242.8	80.7	75.0	78.3	3.31
210300	27.7	28.1	-0.4	1.5	12	600	600	2.04	240.4	80.8	75.0	77.9	2.91
210300	28.4	25.8	2.6	9.2	12	400	400	2.04	237.9	80.5	75.0	77.5	2.51
210300	28.0	28.4	-0.3	1.2	12	600	600	2.04	236.7	80.7	75.0	77.3	2.31
210300	28.9	29.1	-0.2	0.8	12	950	1000	2.04	247.5	80.6	75.0	79.1	4.06
220500	40.7	40.6	0.2	0.4	14	600	600	2.04	267.9	81.1	75.2	82.3	7.02
220500	41.7	41.8	-0.1	0.4	16	600	600	2.04	318.1	90.9	85.5	89.6	4.16
220500	43.2	43.1	0.1	0.2	16	600	600	2.04	365.4	100.1	93.9	96.1	2.16
230500	37.6	37.9	-0.3	0.7	16	600	600	2.04	307.7	81.3	75.5	88.2	12.61
230500	40.2	40.0	0.2	0.4	16	600	600	2.04	335.5	90.5	86.3	92.1	5.78
230500	42.7	42.5	0.2	0.5	16	600	600	2.04	384.4	100.2	95.4	98.5	3.16
230500	46.5	46.2	0.3	0.6	16	600	600	2.04	448.3	109.6	103.8	106.4	2.60
240100	29.0	8.0	21.0	72.4	11	600	600	2.04	240.9	80.6	73.0	78.0	5.00
240400	28.5	23.6	5.0	17.4	14	400	400	2.04	275.9	81.2	76.5	83.5	6.97
240400	28.7	22.2	6.5	22.7	14	400	400	2.04	289.8	81.2	75.7	85.5	9.87
240400	30.4	20.2	10.2	33.5	10	600	600	2.04	303.5	90.5	85.8	87.5	1.74
240400	30.3	20.9	9.4	31.0	14	400	400	2.04	290.9	81.2	78.0	85.7	7.70
240400	30.2	21.5	8.7	28.8	10	600	600	2.04	320.1	90.7	84.4	89.9	5.51
240400	30.5	17.0	13.5	44.3	14	400	400	2.04	293.0	81.1	77.0	86.0	9.06
250300	30.0	7.6	22.4	74.7	14	500	500	2.04	262.6	81.0	75.0	81.4	6.43
250300	31.3	14.8	16.5	52.7	14	500	500	2.04	349.2	99.5	92.0	93.9	1.90
250400	30.3	13.1	17.2	56.7	12	1000	1000	2.04	258.3	80.6	75.3	80.8	5.43
250400	30.3	12.9	17.4	57.4	12	800	800	2.04	251.9	81.0	75.4	79.8	4.38
250400	29.8	12.0	17.7	59.5	12	600	600	2.04	258.0	81.2	75.3	80.7	5.43
250400	30.4	12.5	18.0	59.0	14	600	600	2.04	263.8	81.0	76.0	81.6	5.63
250500	38.0	37.8	0.2	0.4	12	600	600	2.04	334.9	80.7	76.6	92.0	15.40

Fccha (DMA)	T <sub>CO</sub> (°C)	T <sub>GE</sub> (°C)	T <sub>EV</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)	X <sub>GE</sub> (%w)	X <sub>AB</sub> (%w)	P <sub>CO</sub> (inHg)	P <sub>AB</sub> (inHg)	Q <sub>EV,EX</sub> (W)	Q <sub>GE,EX</sub> (W)	Q <sub>CO,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,EX</sub> (W)
260200	24.0	73.0	73.0	89.0	63.0	62.2	27.0	19.5	400.1	319.9	644.0	76.0
260200	24.0	76.0	74.0	88.0	64.0	63.0	27.0	19.0	400.1	319.9	620.4	99.7
260200	24.0	75.0	78.0	95.0	63.0	62.1	27.0	17.0	400.1	319.9	567.1	153.0
260200	24.0	73.0	85.0	92.0	63.0	61.7	27.0	12.0	400.1	319.9	675.9	44.1
260400	32.3	87.6	83.2	96.3	68.0	67.4	28.0	14.0	434.9	350.5	701.5	83.9
270400	34.1	84.7	78.1	97.8	65.1	64.4	28.0	17.5	434.9	350.5	681.6	103.9
280200	23.0	75.0	77.0	86.0	61.9	60.4	27.0	17.5	400.1	319.9	675.9	44.1
280200	23.0	72.0	78.0	86.0	60.9	59.9	27.0	16.0	400.1	319.9	655.1	64.9
280200	23.0	73.0	78.0	85.0	61.3	60.2	27.0	17.0	400.1	319.9	665.7	54.3
280200	23.0	70.0	83.0	88.0	60.5	59.7	27.0	14.0	400.1	319.9	665.7	54.3
280200	23.0	67.0	84.0	93.0	60.4	60.1	27.0	12.5	400.1	319.9	581.2	138.9
280300	33.0	74.4	57.6	92.5	62.4	61.0	28.0	24.5	521.8	404.6	862.4	64.1
280300	33.2	70.4	61.5	94.1	61.1	60.0	28.0	23.5	521.8	404.6	826.1	100.4
280300	33.7	78.1	61.5	99.0	63.3	62.1	28.0	24.0	521.8	404.6	847.4	79.0
280300	36.9	78.6	67.9	105.9	63.5	62.3	28.0	22.5	521.8	404.6	747.8	178.6
280300	37.3	80.0	68.0	107.5	63.8	62.4	28.0	22.5	521.8	404.6	824.7	101.7
280300	36.1	79.2	70.6	110.3	63.4	62.5	28.0	21.5	521.8	404.6	806.6	119.8
280400	34.7	84.3	79.6	98.0	64.7	64.0	28.0	16.5	483.6	371.7	740.9	114.4
280400	35.2	85.3	80.7	99.8	64.8	63.7	28.0	16.0	483.6	371.7	806.8	48.5
280400	35.7	87.2	82.1	104.5	65.3	64.3	28.0	15.0	483.6	371.7	830.8	24.5
290200	23.0	73.0	89.0	91.0	63.3	62.0	27.0	10.0	434.9	350.5	673.2	112.2
290500	33.6	90.8	63.5	101.8	69.0	67.7	27.5	23.0	521.8	404.6	821.9	104.5
290500	35.1	95.1	66.8	112.8	69.6	68.2	27.5	23.0	659.6	404.6	921.5	142.8
290500	35.5	96.5	68.9	117.9	69.6	68.0	27.5	22.0	704.1	404.6	926.6	182.2
290500	36.0	97.2	72.5	123.6	69.7	68.1	27.5	20.5	704.1	404.6	1011.0	97.7
290500	36.6	99.1	75.8	128.3	70.0	68.4	27.5	19.0	704.1	404.6	1013.9	94.9
300300	39.6	82.3	80.5	94.9	61.8	61.3	27.0	16.5	521.8	404.6	795.2	131.2
300300	39.1	83.0	80.9	95.4	61.9	61.2	27.0	16.5	521.8	404.6	809.6	116.9
300300	41.5	86.0	84.8	103.6	61.3	61.1	25.0	14.5	521.8	404.6	788.3	138.1
300300	43.1	88.2	86.4	107.9	61.0	60.4	25.0	13.0	521.8	404.6	847.2	79.2
300500	39.0	104.2	65.6	103.5	68.1	67.2	26.0	22.0	521.8	404.6	682.4	244.0

Fecha (DMA)	COP <sub>EX</sub> (adim)	COP <sub>EX,(AB-EV)</sub> (adim)	COP <sub>IN</sub> (adim)	ΔCOP (adim)	RC (%)	FR (adim)	Q <sub>AB,EX</sub> (W)	Q <sub>AB,IN</sub> (W)	ΔQ <sub>AB</sub> (W)	%ΔQ <sub>AB</sub> (adim)	T <sub>AB,IN</sub> (°C)	T <sub>AB,EX</sub> (°C)
260200	0.106	0.211	0.473	0.367	0.7	82.05	76.0	359.0	283.0	78.8	102.0	89.0
260200	0.138	0.194	0.477	0.339	0.6	62.49	99.7	366.0	266.3	72.8	103.0	88.0
260200	0.212	0.258	0.47	0.258	0.5	69.58	153.0	355.0	202.0	56.9	108.0	95.0
260200	0.061	0.086	0.457	0.396	0.4	49.59	44.1	334.0	289.9	86.8	116.0	92.0
260400	0.107	0.163	0.479	0.372	0.3	116.10	83.9	402.0	318.1	79.1	113.0	96.3
270400	0.132	0.253	0.478	0.346	0.3	95.58	103.9	400.0	296.1	74.0	108.0	97.8
280200	0.061	0.110	0.472	0.411	0.7	40.61	44.1	358.0	313.9	87.7	107.0	86.0
280200	0.090	0.103	0.465	0.375	0.4	60.68	64.9	347.0	282.1	81.3	108.0	86.0
280200	0.075	0.088	0.467	0.392	0.5	53.78	54.3	350.0	295.7	84.5	108.0	85.0
280200	0.075	0.063	0.455	0.380	0.3	72.31	54.3	332.0	277.7	83.6	113.0	88.0
280200	0.193	0.134	0.444	0.251	0.2	175.04	138.9	317.0	178.1	56.2	114.0	93.0
280300	0.069	0.349	0.447	0.378	0.4	43.78	64.1	432.0	367.9	85.2	93.0	92.5
280300	0.108	0.332	0.417	0.309	0.3	56.24	100.4	379.0	278.6	73.5	94.0	94.1
280300	0.085	0.470	0.451	0.366	0.4	56.33	79.0	435.0	356.0	81.8	99.0	99.0
280300	0.193	0.548	0.42	0.227	0.3	55.41	178.6	372.0	193.4	52.0	106.0	105.9
280300	0.110	0.603	0.403	0.293	0.4	46.07	101.7	347.0	245.3	70.7	108.0	107.5
280300	0.129	0.618	0.404	0.275	0.3	70.43	119.8	355.0	235.2	66.2	110.0	110.3
280400	0.134	0.223	0.473	0.339	0.3	94.07	114.4	435.0	320.6	73.7	110.0	98.0
280400	0.057	0.249	0.474	0.417	0.3	62.66	48.5	437.0	388.5	88.9	111.0	99.8
280400	0.029	0.328	0.476	0.447	0.3	65.75	24.5	440.0	415.5	94.4	112.0	104.5
290200	0.143	0.026	0.455	0.312	0.3	46.21	112.2	359.0	246.8	68.7	120.0	91.0
290500	0.113	0.334	0.494	0.381	0.6	51.55	104.5	514.0	409.5	79.7	102.0	101.8
290500	0.134	0.447	0.486	0.352	0.6	50.95	142.8	621.0	478.2	77.0	113.0	112.8
290500	0.164	0.705	0.472	0.308	0.6	44.65	182.2	633.0	450.8	71.2	118.0	117.9
290500	0.088	0.791	0.454	0.366	0.6	45.49	97.7	597.0	499.3	83.6	124.0	123.6
290500	0.086	0.918	0.455	0.369	0.6	44.10	94.9	597.0	502.1	84.1	128.0	128.3
300300	0.142	0.164	0.456	0.314	0.5	137.68	131.2	438.0	306.8	70.0	111.0	94.9
300300	0.126	0.161	0.462	0.336	0.4	88.16	116.9	449.0	332.1	74.0	111.0	95.4
300300	0.149	0.257	0.457	0.308	0.4	361.52	138.1	439.0	300.9	68.5	116.0	103.6
300300	0.086	0.318	0.46	0.374	0.4	101.93	79.2	446.0	366.8	82.2	117.0	107.9
300500	0.263	0.516	0.508	0.245	0.8	77.56	244.0	542.0	298.0	55.0	105.0	103.5

Fecha (DMA)	$\Delta T_{IN}$ (°C)	$T_{AB,EX} - T_{EV,EX}$ (°C)	$\Delta\Delta T$ (°C)	% $\Delta\Delta T$ (adim)	$M_{EV}$ (g/min)	$M_{AB \rightarrow GE}$ (g/min)	$M_{GE \rightarrow AB}$ (g/min)	$M_{WA}$ (Kg/min)	$M_{OIL}$ (g/min)	$T_{BA}$ (°C)	$T_{OIL,IN}$ (°C)	$T_{OIL,LE}$ (°C)	$\Delta T_{OIL}$ (°C)
260200	29.0	16.0	13.0	44.8	12	400	400	2.04	272.8	80.9	75.0	83.0	8.00
260200	29.0	14.0	15.0	51.7	12	400	400	2.04	286.1	81.0	75.0	85.0	10.00
260200	30.0	17.0	13.0	43.3	12	400	400	2.04	313.7	81.1	75.0	89.0	14.00
260200	31.0	7.0	24.0	77.4	12	400	400	2.04	253.4	80.7	75.0	80.0	5.00
260400	29.8	13.0	16.8	56.3	12	400	400	2.04	282.5	81.0	75.9	84.5	8.53
270400	29.9	19.7	10.2	34.2	10	600	600	2.04	290.1	81.0	75.3	85.6	10.28
280200	30.0	9.0	21.0	70.0	10	400	400	2.04	253.4	80.6	75.0	80.0	5.00
280200	30.0	8.0	22.0	73.3	10	400	400	2.04	266.3	80.9	75.0	82.0	7.00
280200	30.0	7.0	23.0	76.7	10	400	400	2.04	259.8	80.8	75.0	81.0	6.00
280200	30.0	5.0	25.0	83.3	10	400	400	2.04	259.8	80.7	75.0	81.0	6.00
280200	30.0	9.0	21.0	70.0	10	400	400	2.04	306.7	80.6	75.0	88.0	13.00
280300	35.4	34.9	0.5	1.3	12	600	600	2.04	265.8	80.6	75.0	81.9	6.92
280300	32.6	32.7	-0.1	0.3	12	600	600	2.04	270.5	81.2	72.0	82.7	10.65
280300	37.5	37.5	0.0	0.0	12	600	600	2.04	333.7	90.0	85.0	91.8	6.8
280300	38.2	38.1	0.1	0.3	12	600	600	2.04	383.3	90.9	85.0	98.4	13.38
280300	40.0	39.5	0.5	1.2	12	600	600	2.04	405.6	99.5	94.0	101.2	7.2
280300	39.4	39.7	-0.3	0.8	16	600	600	2.04	414.4	99.9	94.0	102.3	8.3
280400	30.4	18.4	12.0	39.4	12	600	600	2.04	297.1	81.1	75.6	86.6	11.06
280400	30.3	19.1	11.2	37.0	12	600	600	2.04	320.5	90.3	85.6	90.0	4.34
280400	29.9	22.4	7.5	25.1	12	600	600	2.04	358.7	100.1	93.2	95.2	1.96
290200	31.0	2.0	29.0	93.5	10	400	400	2.04	292.9	80.8	75.0	86.0	11.00
290500	38.5	38.3	0.2	0.5	16	600	600	2.04	232.1	80.5	76.6	89.5	12.93
290500	46.2	46.0	0.2	0.4	16	600	600	2.04	297.0	90.9	86.6	100.4	13.80
290500	49.1	49.0	0.1	0.2	16	600	600	2.04	457.6	101.2	96.1	107.5	11.43
290500	51.5	51.1	0.4	0.8	16	600	600	2.04	492.3	111.2	105.8	111.5	5.70
290500	52.2	52.5	-0.3	0.6	16	600	600	2.04	556.1	120.3	113.6	118.5	4.90
300300	30.5	14.4	16.1	52.7	12	700	700	2.04	302.8	81.0	75.0	87.4	12.44
300300	30.1	14.5	15.6	51.7	12	700	700	2.04	295.3	81.0	75.0	86.4	11.36
300300	31.2	18.8	12.4	39.8	12	700	700	2.04	364.1	90.3	85.0	95.9	10.89
300300	30.6	21.5	9.1	29.8	12	700	700	2.04	394.2	99.4	94.0	99.8	5.77
300500	39.4	37.9	1.5	3.8	18	600	600	2.04	362.0	80.6	76.3	95.6	19.35

## **Capítulo 6.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DEL REFLUJO EN UN TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA OPERANDO CON LA MEZCLA CARROL – AGUA**

### ***INTRODUCCIÓN***

En el presente capítulo se presenta el estudio experimental de un transformador térmico por absorción de una etapa (TTA) en el cual se ha variado la concentración de la mezcla Carrol - agua en el generador y absorbedor para determinar el efecto del reflujo de solución diluida.

### ***DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA***

En un TTA operando con la mezcla Carrol - agua se obtiene una solución diluida en el fondo del absorbedor a mayor temperatura que la solución concentrada proveniente del generador si no se ha logrado intercambiar la totalidad de la energía térmica producida por el efecto de absorción que se lleva a cabo en el absorbedor.

La solución diluida es típicamente circulada al generador con un paso intermedio para el intercambio de calor entre la solución proveniente del generador y la solución proveniente del fondo del absorbedor a una temperatura mayor [Best, 1997].

El recircular una parte de la solución que se obtiene en el fondo del absorbedor para incorporarla con la solución concentrada puede promover el proceso de absorción y aumentar con esto el coeficiente de operación (COP) y/o el incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) [Romero, 1996].





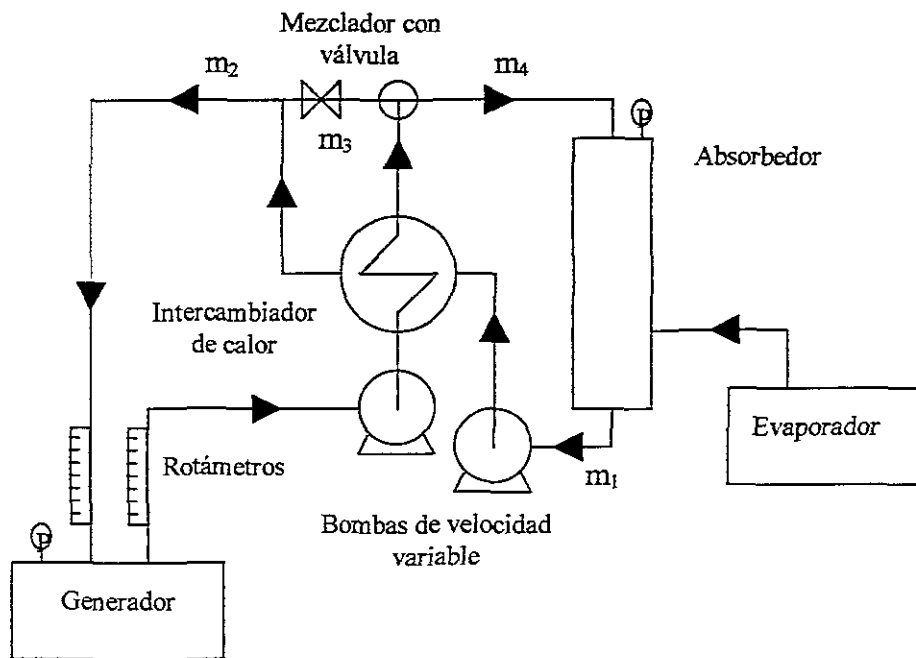


Figura 6.2. Dispositivo experimental utilizado para el estudio experimental del reflujo.

Este dispositivo cuenta con dos bombas de velocidad variable, dos rotámetros, dos vacuómetros, sensores de temperatura en el fondo y domo del absorbedor y una válvula para el mezclado de las soluciones.

### **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Se opera este dispositivo como parte de un TTA y una vez que se logra alcanzar un estado permanente se procede a variar la velocidad de la bomba que circula la solución del fondo del absorbedor hacia el intercambiador de calor inicialmente y posteriormente ingresa al generador. Esta variación promueve un estado transitorio para concluir en una nueva condición de estado permanente.

Estos experimentos se han llevado a cabo procurando evitar las variaciones de otros parámetros para hacer representativo el efecto de la recirculación sobre la temperatura y la concentración.

## RESULTADOS

Después de variar las concentraciones de la mezcla Carrol - agua en el generador y absorbedor se ha observado una variación repetitiva en las temperaturas del fondo y domo del absorbedor. Estas variaciones indican que se promueve o se inhibe la absorción en el absorbedor bajo la influencia del flujo de solución que entra al domo del absorbedor.

Las tablas 6.1 a 6.3 muestran las condiciones a las cuales se operó el transformador térmico por absorción de una etapa para determinar el efecto del reflujo en el absorbedor del TTA. En estas condiciones se muestra la variación del valor RC (potencia de recirculación parametrizada) definido anteriormente como la fracción de solución presente en el absorbedor.

$M_{AB}$ , (g/min)	$X_{GE}$ , (%w)	$Q_{EV}$ , (W)	$Q_{GE}$ , (W)	$T_{AB}$ , (°C)	RC (adim)
400 a 600	60.79	400	320	76	0 a 0.9

Tabla 6.1 Condiciones de operación para el estudio del reflujo en un TTA.

$M_{AB}$ , (g/min)	$X_{GE}$ , (%w)	$Q_{EV}$ , (W)	$Q_{GE}$ , (W)	$T_{AB}$ , (°C)	RC(adim)
400 a 600	61.8	400	320	76	0.5 a 0.9

Tabla 6.2 Condiciones de operación para el estudio del reflujo en un TTA.

$M_{AB}$ , (g/min)	$X_{GE}$ , (%w)	$Q_{EV}$ , (W)	$Q_{GE}$ , (W)	$T_{AB}$ , (°C)	RC(adim)
400 a 600	62.1	400	320	76	0.3 a 0.9

Tabla 6.3 Condiciones de operación para el estudio del reflujo en un TTA.

Estos experimentos se han llevado a cabo con iguales potencias en generador y evaporador, en ellos se ha variado solo la concentración inicial en el generador de Carrol - agua. El sistema de recuperación de calor operó en las mismas condiciones permanentemente evitando así un efecto secundario de variación de la presión en el equipo. Los resultados se muestran en las figuras 6.3 a 6.8.

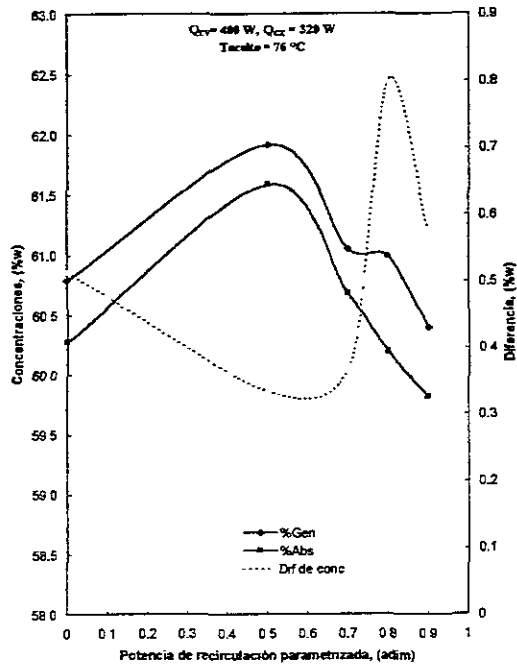


Figura 6.3. Efecto del reflujo sobre las concentraciones en un TTA para las condiciones de la tabla 6.1.

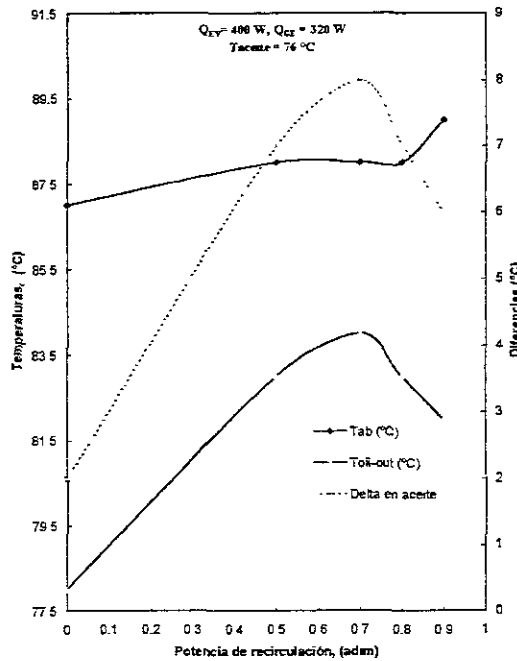


Figura 6.4. Efecto del reflujo sobre las temperaturas en un TTA para las condiciones de operación de la tabla 6.1.

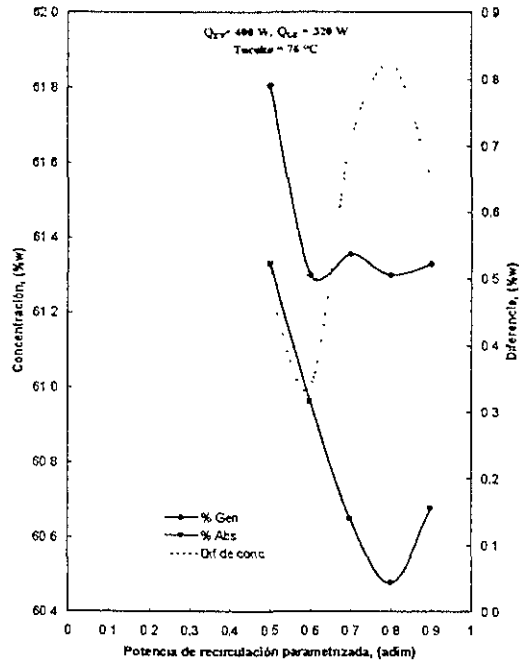


Figura 6.5. Efecto del reflujo sobre las concentraciones en un TTA para las condiciones de la tabla 6.2.

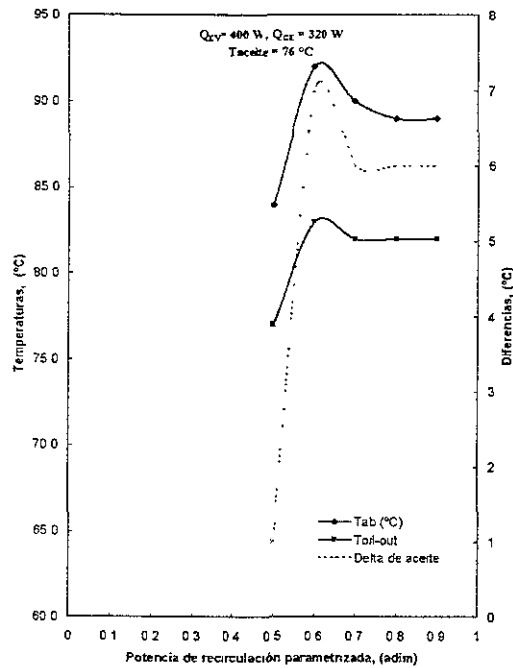


Figura 6.6. Efecto del reflujo sobre las temperaturas en un TTA para las condiciones de operación de la tabla 6.2.

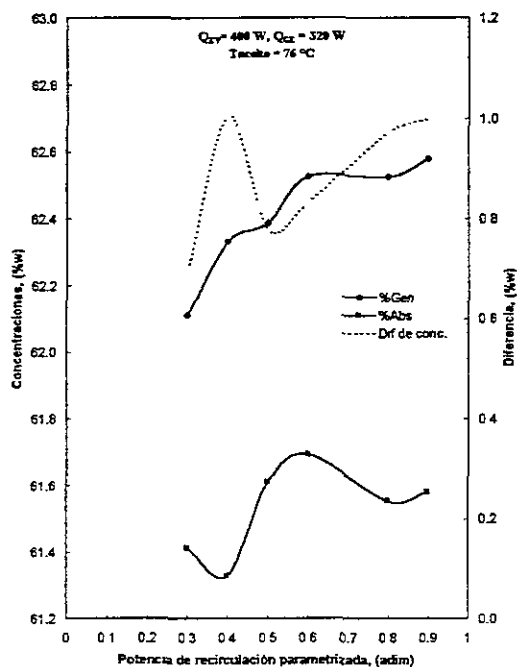


Figura 6.7. Efecto del reflujo sobre las concentraciones en un TTA para las condiciones de la tabla 6.3.

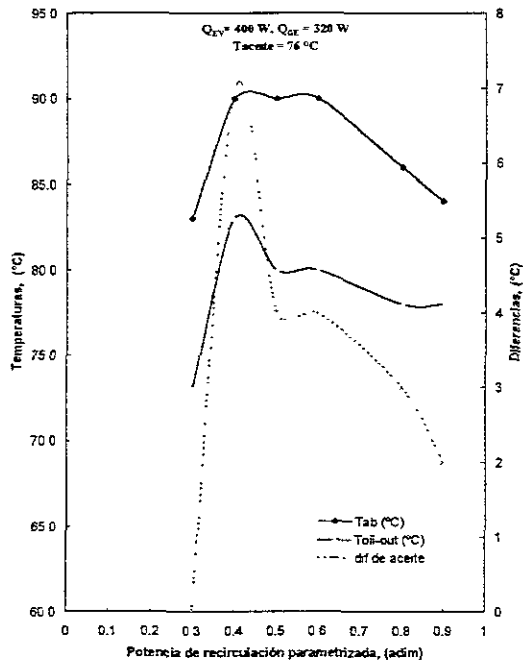


Figura 6.8. Efecto del reflujo sobre las temperaturas en un TTA para las condiciones de operación de la tabla 6.3.

Las figuras anteriores muestran que a medida que aumenta la concentración en el generador la potencia óptima de recirculación disminuye. Esta disminución se puede atribuir al hecho de que se requiere menos solución diluida del fondo del absorbedor para formar la solución final a la concentración de equilibrio P – T – X con una mayor concentración.

Esta tendencia se muestra en la figura 6.9. En esta figura se puede ver que a medida que aumenta la concentración del absorbente inicial ( $X_{GE}$ ), se requerirá de menos solución diluida con refrigerante para obtener la misma concentración de equilibrio en el absorbedor.

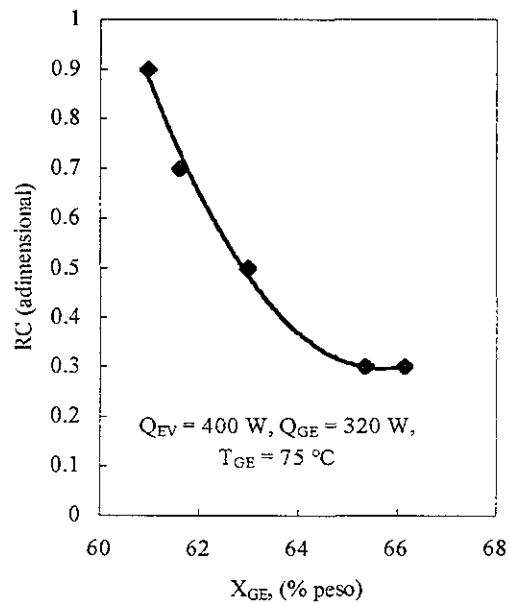


Figura 6.9. Dependencia del reflujo en función de la concentración inicial de Carrol en el sistema para valores máximos de  $\Delta T$ .

La figura 6.9 muestra los valores de reflujo en los cuales se obtuvo el valor máximo del incremento de temperatura. El valor máximo de incremento de temperatura en el sistema de recuperación de calor fue el mismo en las tres series de experimentos, por lo cual se puede considerar que la potencia de absorción recuperada fue la misma, ya que la temperatura de ingreso de aceite en el sistema de recuperación se mantuvo constante.

La figura 6.10 se muestra que en estas series de experimentos, la diferencia de concentraciones es mayor para el valor de reflujo (RC) de 0.4 que en los valores superiores.

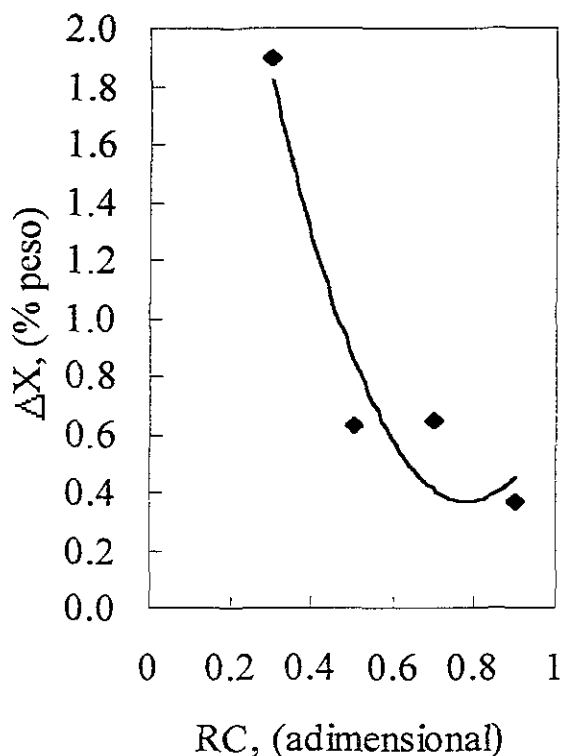


Figura 6.10. Variación de la diferencia de concentración de Carroll entre generador y absorbedor para diferentes valores de reflujo (RC).

Con la figura 6.10 se puede concluir que un reflujo bajo (0.4) y por lo tanto un menor mezclado, genera una diferencia mayor en concentración de las soluciones iniciales y finales; comparado con un mejor mezclado (RC = 0.6) en el que la diferencia de concentraciones de absorbente disminuye. Esto último indica que existe un valor de reflujo en los que se puede obtener la mayor diferencia de concentraciones o la menor diferencia de las mismas, según se desee.

En el caso de un TTA industrial, en función de las condiciones que se deseen obtener se puede maximizar el incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) como consecuencia de lograr una diferencia entre concentraciones de 1.0 haciendo RC = 0.4. Contrariamente, para lograr maximizar la potencia extraída del



absorbedor, con la consecuente disminución en el  $\Delta T$ ,  $RC = 0.6$ . El equilibrio entre máximo  $\Delta T$  y COP ocurre (según el capítulo 5) cuando la diferencia de concentraciones es cercana a 1, por lo cual se recomienda que RC tenga un valor de 0.4 a fin de operar en condiciones óptimas.

## **CONCLUSIONES**

El presente estudio experimental muestra que existe un efecto de la recirculación de solución diluida (reflujo) del fondo del absorbedor al flujo de solución concentrada proveniente del generador.

Existe un valor óptimo para la recirculación de solución desde el fondo del absorbedor hacia la parte superior del mismo para mezclarse con la solución proveniente del generador en un TTA operando con la mezcla Carrol - agua, para maximizar el incremento de temperatura ( $\Delta T$ ).

Este estudio experimental muestra también que existe una dependencia de la diferencia de concentración con respecto a este reflujo. Sin embargo, para cada reflujo la diferencia de concentraciones entre el generador y el absorbedor no permanece constante.

Este estudio se ha llevado a cabo con potencias constantes en generador y evaporador, por lo cual la diferencia de concentraciones se ha limitado a valores menores de 2 puntos porcentuales, por lo que no se puede extrapolar para variaciones mayores de concentración entre las soluciones presentes en el generador y el absorbedor.

Un punto muy interesante de este estudio y de las conclusiones del capítulo 5 (evaluación del equipo experimental) conducen a un valor de la **diferencia de concentraciones de 1.24** como valor óptimo para maximizar el coeficiente de operación del transformador térmico por absorción de una etapa.

Todo lo anterior sugiere que el valor óptimo de reflujo es de 0.4 para las condiciones llevadas a cabo en este estudio experimental. Ya que este valor de reflujo optimiza la diferencia de temperaturas en el aceite del sistema de recuperación de calor y promueve la diferencia de concentraciones con valor cercano a 1, por lo cual se verá favorecido tanto el incremento de temperatura

( $\Delta T$ ) como el coeficiente de operación (COP) del transformador térmico por absorción de una etapa, operando con la mezcla Carrol - agua.

### **Referencias**

**Best R**, Rivera W, Cardoso MJ, Romero RJ and Holland FA, Modelling of single-stage and advanced absorption heat transformers operating with the water / Carrol mixture, Applied Thermal Engineering, Vol 17, No 11, pp 1111 – 1122, 1997

**Eisa M A R**, Diggory PJ & Holland FA, Experimental studies to determine the effect of absorber reflux on the performance of a water - lithium - bromide absorption cooler, Energy Research, Vol 10, pp 333 - 341, 1986.

**Romero R**, Estudio de las mezclas bromuro de litio auga y Carrol - agua en transformadores térmicos por absorción de una etapa, Tesis de maestría en energía solar, UNAM, 1996

## Capítulo 7.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN ABSORBEDOR CON ABSORCIÓN EN LA PARTE INTERIOR DE UN TUBO VERTICAL

### INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestra el resultado de la determinación de el coeficiente global de transferencia de calor determinado en un absorbedor de película descendente.

En este artículo se muestra el equipo utilizado en la experimentación, que consta de un evaporador, un absorbedor vertical y tres tanques de almacenamiento. El absorbedor está construido con dos tubos concéntricos, el interior está fabricado en vidrio de borosilicato y el tubo exterior forma una coraza seccionada en partes de acrílico. De esta forma se permite la visualización del fluido descendiendo en la pared interior del tubo interior.

Para la determinación del coeficiente global de transferencia de calor se utilizó amoniaco y agua, para formar una solución con concentraciones de 13.22 y 14.52 % de amoniaco en la mezcla.

Para la determinación de la concentración de amoniaco en la solución formada se propuso un método indirecto *in situ*. Por medio de la determinación de la conductividad eléctrica a una temperatura dada con presión constante.

La visualización de la película descendente permitió determinar el área total de transferencia para los cálculos del coeficiente global de transferencia de calor, así como de la distribución de temperaturas en diferentes alturas del absorbedor a presiones menores a 2 MPa.

Los resultados obtenidos en estos experimentos son los perfiles de temperatura mostradas en las figuras 7 y 8 y valores del coeficiente global de transferencia de calor, el coeficiente de transferencia de calor de película mostrados en la tabla 4 y las condiciones de operación en este absorbedor para lograr una película descendente con área controlada.

Este trabajo fue presentado en la conferencia internacional de absorción, en Múnich, Alemania y publicada en las memorias de la misma conferencia. El artículo publicado se presenta a continuación.

## THERMODYNAMIC DATA IN A FALLING FILM ABSORBER OPERATING ON AMMONIA / WATER SOLUTIONS

R.J. Romero<sup>1</sup>, R. Best<sup>1</sup>, J. Hernández<sup>1</sup>, O. Ramírez<sup>1</sup> & J. Aguilón<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Energía – UNAM. A.P. 34, C.P. 62580, Mor., México

<sup>2</sup>Instituto de Ingeniería - UNAM, Ciudad Universitaria, C.P. 06410, D.F., México

### ABSTRACT

The paper presents the description of an experimental device used for the study of the global heat and mass transfer coefficients of falling films on the wall of a vertical tube absorber. The experimental data obtained for the calculation of the global heat transfer coefficients using ammonia/water solutions is shown. The experimental data were obtained in the device that allows the visualisation of the film on the wall and therefore to determine the total area for the transfer properties in the absorber. For concentration measurements of ammonia in water, an indirect method was used. For calculation of the concentration values, these were associated with the electrical conductivity and then calculated by related properties. Experimental data are shown for close concentration differences at close to ambient temperature and atmospheric pressure due to the material used (borosilicate - glass) for the absorber device.

### KEYWORDS

Falling films, global heat transfer coefficient, ammonia/water pair, electrical conductivity.

### NOMENCLATURE

A	Total transfer area (m <sup>2</sup> )
Cp	Specific heat of coolant (kJ/kg K)
Di	Inside diameter of the glass absorber (m)
Do	Outside diameter of the glass absorber (m)
$\Delta T_{ml}$	Logarithmic mean temperature (K)
hi	Falling film heat transfer coefficient (W / m <sup>2</sup> K)
ho	Heat transfer coefficient of coolant (W / m <sup>2</sup> K)
Km	Thermal conductivity of the glass (W / m K)
ma	Flow rate of coolant (kg/s)
maa	Ammonia vapour flow rate (kg/s)
mws	Flow rate of ammonia / water weak solution (kg/s)
mss	Flow rate of ammonia / water strong solution (kg/s)
Pa	Absorber pressure (MPa)
Paa	Ammonia vapour pressure (MPa)
Pss	Ammonia - water strong solution pressure (MPa)
Pws	Ammonia - water weak solution pressure (MPa)
Q	Transferred power in the falling film (W)
Taf	Actual final coolant temperature (°C)
T'af	Theoretical final coolant temperature (°C)
Tai	Actual initial coolant temperature (°C)
Tev	Evaporator temperature (°C)
Tss	Actual strong ammonia/water solution temperature (°C)
Tws	Actual weak ammonia/water solution temperature (°C)
Uo	Overall coefficient of heat transfer (W/m <sup>2</sup> K)

Greek symbols

$\Delta$	Lift
$\xi$	Concentration of solution (kg ammonia / kg solution)
rjrd@mazatl.cie.unam.mx	

### INTRODUCTION

The absorption of a gas by a liquid falling film is a heat and mass transfer process dependent on the diffusion mechanisms where liquid and gas hydrodynamics play an important role. The mass transferred at the gas phase is the result of the diffusion mechanisms acting from the bulk of this phase to the condition reached at the gas / liquid film interface. Similar situation exists from the interface to the bulk of the liquid film, and finally from the bulk of film to wall which the liquid film slides down.

Three different zones have been identified in a turbulent falling film [1]. The first corresponds to the inlet zone where the flow is developed, the second is the calm zone in which the flow is laminar and the third one corresponds to the wavy zone where different types of ripples develop.

The different mechanisms proposed for the gas/liquid diffusion have been applied in the gas absorption by a falling film in theoretical or experimental studies.

Many possibilities of improving mass transfer rates have been considered and they can be grouped into two main types. The first one includes diffusion mechanisms and the other considers hydrodynamics aspects.

A thermodynamic state of a binary mixture is determined by any three independent properties [2]. The pressure, the temperature and the concentration are the easiest properties to be experimentally determined. In a system involving mass and energy balances, these properties must be known for the inlet and outlet flows.

The experimental unit was designed to determine the steady state overall heat and mass transfer coefficients, for the absorption of ammonia vapour by an ammonia/water falling film in a vertical absorber. The flow visualisation as well as the study of defined zones along the falling film for different lengths was considered.

## LITERATURE REVIEW

Guerreri and King [3] developed a modelling technique for designing falling film absorbers. They employed empirical and semi-empirical correlations and applied their technique to design an ammonia/water absorber. They also found that for Re values of about 300,000 flooding appeared.

Grossman [4] studied theoretically the simultaneous heat and mass transfer of a gas absorption in a laminar falling film, for isothermal and adiabatic walls. He developed an analytical solution and for those cases in which the analytical solution was not precise, a numerical solution was complemented. His solution describes the development of the thermal and concentration boundary layers, the temperature and concentration variations and the mass and heat fluxes.

Patnaik and Pérez-Blanco [5] developed a simple design methodology for falling film absorbers, treating it as a one-dimensional countercurrent heat exchanger. They found the effectiveness for heat and mass transfer is a function of the NTU's.

The Centro de Investigación en Energía (CIE) has designed and tested ammonia/water absorption cooling systems that included a falling film absorber and generator [6]. The design was based in the minimal specialised information available with the result of a tendency to over-design.

Following a literature review that includes the aforementioned papers, it was decided that an experimental rig should be built in order to obtain the transport coefficients for falling film absorbers in the inner side of a vertical tube, as used in the CIE equipment.

## EXPERIMENTAL UNIT DESCRIPTION

The working pressure in the falling film absorber was limited by the strength of the tube materials resistance. A glass tube was chosen with a maximum working pressure of two atmospheres, in order to visualise the flow. The outlet strong ammonia/water solution temperature was considered to be 30 °C, because the ambient water temperature is between 20 and 25 °C. It was also experimentally determined, that a water volume flow rate of about 2 l/min wetted all the inner wall of the experimental tube. With these data and considering that the outlet saturation condition is reached, it was found that the outlet mass concentration was about 13 %.

## The falling film absorption rig

The experimental unit consists of the absorber (main test section), the ammonia system, the weak ammonia/water solution system, the strong ammonia/water solution system and the water system, shown in figure 1.

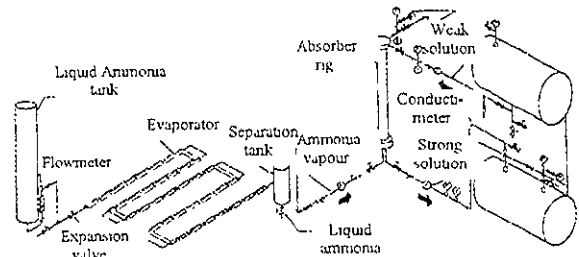


Figure 1. Experimental unit diagram.

The absorber, shown in figure 2 is the main part of the unit, it consists of two transparent concentric tubes. The inner one is the glass tube, whose extremes are introduced into the top and bottom heads. The outer tube is the acrylic jacket. The glass tube has an outer diameter of 6 cm, a length of 1.5 m and a thickness of 4 mm. The acrylic jacket has eight independent sections, each one 15 cm long with an outer diameter of 7.9 cm and a thickness of 3.5 mm. The stainless steel top head contains the weak ammonia/water distributor and it supports the first 5 cm of the glass tube. It receives the pipe lines from the weak solution and other line at leftover ammonia and in its upper part, there is a glass window to observe how the falling film is started. The weak ammonia/water solution distributor is a nylon vertical tube with a horizontal flange. The stainless steel bottom head supports the last 2 cm of the glass tube. The pipes at strong solution line and from the ammonia vapour are attached to head. Both are stainless steel. The ammonia vapour distributor is fitted to pipe from ammonia evaporator. It is a vertical tubing with a plastic helicoidal hose and a conical cap, both attached to its lower entrance and upper exit respectively. There is a 4 mm gap between the conical cap and the glass tube inner wall, through which solution can flow downwards while vapour flows upwards through five holes on the conical cap, 12 mm in diameter. The ammonia distributor can be moved along the inner part of the glass tube, due to the plastic helicoidal hose and three support wires, which pressed against the wall. Considering that there is a concentration profile at the end of the falling film and a mean concentration value is required, a static mixer is employed in the first part of the outlet absorber pipe to the strong solution line.

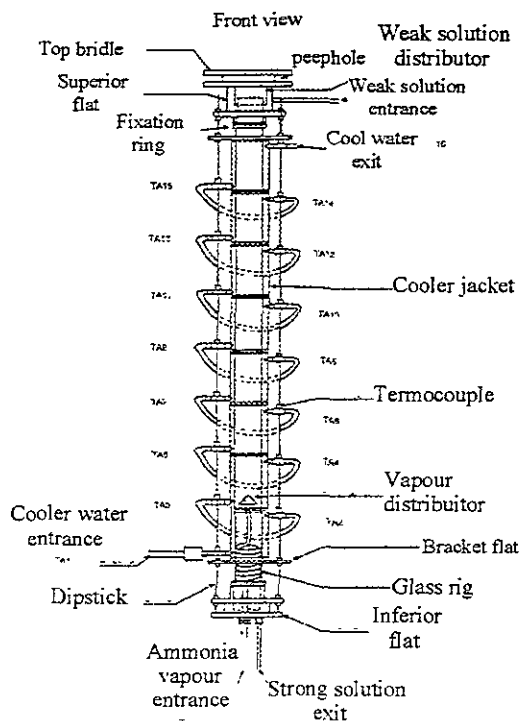


Figure 2. Falling film absorber diagram.

The weak ammonia/water system is made up of the solution reservoir tank. The tank is carbon steel made, covered with an internal plastic coat. It is of 150 l capacity and contains an immersion U electric heater. The pipe and the electric heater are made of stainless steel. The weak solution is stored in this tank and the necessary heat flow rate to increase the solution temperature from the ambient to the saturation condition; this heat is given by the electric heater, fitted horizontally in the centre of the tank. In order to homogenise the solution in the tank; a little jet pump was installed in the tank near one of its extremes, at the middle of the maximum liquid level. Once the desired weak solution temperature is reached, the pressure of the solution is increased with nitrogen gas and it is kept constant with a mechanical regulator. The system is isolated.

The strong ammonia/water zone consists of the solution collector tank and its pipeline. The tank is also made of carbon steel and has an internal plastic coat. The pipe is made of stainless steel. This system is not isolated and it is used to accumulate the strong solution produced in the absorber.

The ammonia system consists of the ammonia depository liquid tank, the evaporator, the pipe in between and the pipeline to the absorber. The ammonia liquid tank is made of carbon steel with a 150 l

capacity. The ammonia evaporator is a carbon steel concentric pipe countercurrent heat exchanger. The tank separator is made of carbon steel with a capacity of 8.5 l. The entire pipe in between these elements is made of carbon steel, while pipe line to the absorber is made of stainless steel. The ammonia vapour to be absorbed comes from a saturated liquid tank at ambient temperature. When the liquid is expanded to the working pressure only, a small amount is evaporated and the remaining liquid will need heat to be evaporated. This heating is given by water with inlet and outlet temperatures of 27 and 15 °C respectively. Table 1 shows the coolant heat flow rates needed for the two experimental cases.

Power	$\xi = 13.22\%$	$\xi = 14.52\%$
$Q = ma C_p (T_{af} - T_{ai})$	0.438 kW	0.516 kW

Table 1. Recovered power from the absorber operation.

The water system consists of a controlled level tank and a pump, which supplies the cooling water flow to the absorber, and the heating water to the evaporator. The remaining water flow is returned to the tank. The cooling water has inlet and outlet temperatures of 10 °C below the weak and strong solution temperatures. Table 2 shows the working conditions for the cooling water.

Level temperature	$\xi = 13.22\%$	$\xi = 14.52\%$
$T_{ai}$	30.65 °C	28.13 °C
$T_{af}$	36.93 °C	35.53 °C
$T_{af}$	38.89 °C	36.38 °C

Table 2. Temperature level of the recovered power in the experimental system.

In order to make easier the ammonia concentration measurement into the solution, an indirect method was proposed. The indirect method consisted in the measurement of the electrical conductivity associated with the ammonia concentration in water with a commercial sensor.

The electrical conductivity sensor is a K type from the Fox-Boro conductimeter Company. It was factory calibrated for sodium hydroxide and others solutions. However, it appeared like a good way for checking the concentration in a component, like a generator or absorber. It is easy to install, requires a recirculation line from the bottom of the component and a return. This electrical conductimeter was installed in the line from the bottom of the absorber to the strong ammonia/water solution tank as shown in figure 3, and used to calculate the concentration in this tank and in the weak ammonia/water solution tank too. For calculating the concentration in the strong solution tank, a recirculation line was necessary from the bottom of this tank and connected with a Tee to the line from bottom of the absorber.

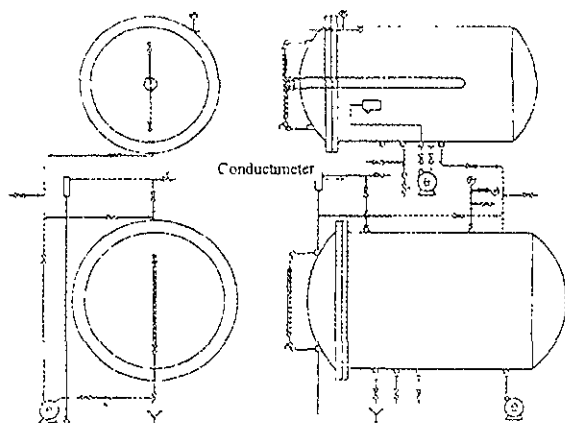


Figure 3. Electrical conductimetry localisation in the experimental unit.

To calibrate the electrical conductimeter ammonia/water solutions of known concentrations were prepared and then heated with an electrical heater inside a tank. This tank had a gauge and a valve for pressurising with nitrogen to reach the desired condition. The electrical conductivity did not show a significant difference in the values for different pressures, but a high variation for different temperatures and concentrations. Then a relationship was calculated for these, in order to measure the concentration in the test runs, as show in figure 4.

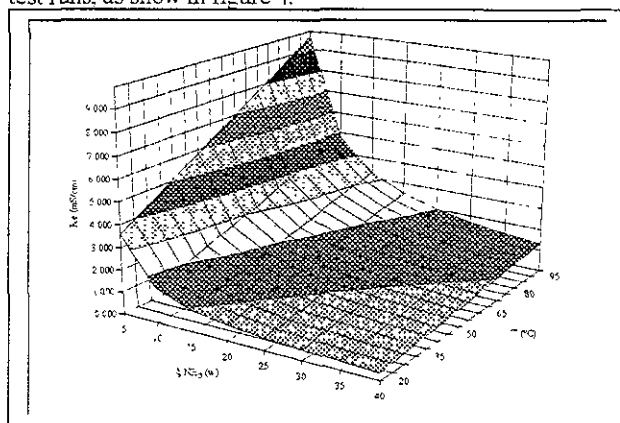


Figure 4. Relationship between electrical conductivity against temperature and concentration of ammonia - water solution.

### Test section description

The general performance of the absorber unit is as follows. Weak ammonia/water solution goes from the first tank to the top head vertical tube absorber by pipeline. Their pressure, temperature and volume flow rates are measured before the inlet to the absorber. Once in, it drops in the annular space made by the outer

distributor wall and the inner head wall. Then the solution goes down and flows up between the inner distributor and outer glass tube walls, reaching the upper part of the glass tube, falling inside and wetting the entire inner pipe wall. The ammonia goes from the depository liquid tank to the bottom head of absorber through the evaporator, (the separator tank and the pipe line before this assure the ammonia vapour) In this pipe the pressure, temperature and volume flow rate are measured. When ammonia vapour reaches the bottom, it goes through the gas distributor and leaves it flowing upward inside the inner wall of the absorber. There it is absorbed by the falling film, resulting in a strong ammonia/water solution at the bottom of the tube. The strong ammonia/water solution is taken out from the head to the second tank by pipeline, where again its pressure, temperature and volume flow rates are measured. If there is any residual ammonia vapour not absorbed and accumulated at the upper part of the absorber, it will be taken out by pipe line to a water tank, before its pressure and temperature are measured. During all this process, cooling water flows upward between the glass tube of the absorber and the acrylic jacket. In every jacket section, the inlet and outlet temperatures are measured.

### EXPERIMENTAL PROCEDURE

Before any experiment the weak and strong ammonia/water temperatures, pressures, mass flow rates and concentrations are defined, as well as the ammonia temperature, pressure and mass flow rate.

With this information, the weak ammonia/water solution is warmed to the desired temperature. If the pressure increase due to heating is not enough, the nitrogen gas will provide this pressure complement. Afterwards a low water cooling mass flow rate is fed to the absorber jacket and weak ammonia/water solution is fed to the absorber, to recalibrate the solution flow sensor. Once the weak ammonia/water system is ready, a falling film with the desired mass flow rate is fixed, wetting the entire inner absorber wall. Later, ammonia vapour is produced at the established condition. The heating and cooling water and the weak ammonia/water solution mass flows are adjusted as necessary.

The experimental data and the concentrations are then used to calculate the heat and mass balance equations and the corresponding mass and energy coefficients.

### Instrumentation

In order to determine the overall heat transfer coefficients in a falling film for the water/ammonia solution, the process parameters such as temperature, pressure, mass flow rate and concentration were measured with the instrumentation described as follows.

The temperature was measured by means of sixteen type T thermocouples (copper/constantan) insulated with fibber glass. Each one of the thermocouples was calibrated separately by means of a constant temperature source. The thermocouples were calibrated in a range between 40 and 140 °C. Using the least squares method, polynomial equations were obtained for the thermocouples and subsequently incorporated to a computer program previously written.

Four Bourdon gauges were utilised in the equipment in order to have qualitative pressure readings during the experimental process. One of those was connected to the weak ammonia/water solution tank, other to the separation tank, other to the strong solution ammonia/water tank and the last one in the top of the absorber.

In addition to the gauges, three pressure transducers (Omega, model PX 105) were utilised to measure the pressure difference between the weak solution tank and the rig, other to the ammonia vapour and the rig and the last one for measuring the difference between the rig and the strong ammonia/water solution tank. The output signal of the transducers was sent to the data logging system, which was connected to the personal computer.

In order to determine the mass flow rates of the water/ammonia at different solution concentrations, a flowmeter was placed in the unit. The flowmeter was previously calibrated by means of a device constructed at CIE for different concentration and mass flow rates for the water/ammonia solutions. Polynomial equations were also introduced to the computer program.

The solution concentrations for the water/ammonia solutions were determined by relationship between the electrical conductivity and the temperature with the concentrations previously measured at different strong ammonia/water solutions. The electrical conductimeter was calibrated at different temperatures, pressure and ammonia concentration values.

The experimental data were collected by a data logging system Hewlett Packcard model 3427A. Twenty channels were used to measure directly the temperatures in the test section and other channels for measuring pressure and flow rates in the main pipelines. The data logging system was programmed to read the channels every three seconds.

A personal computer was connected to the data logging system. A computer program was developed based on HPVEE software developed by the Hewlett Packard Company.

#### Accuracy of instruments

Temperatures were recorded to an accuracy of 0.5°C. Readings of voltages to determine the flows rate and

pressures were measured to an accuracy of 3%. Atmospheric pressure was measured with a barometer to an accuracy of 1 mmHg. The flowmeters were readable up to 2% of full scale. The conductimeter was readable to 0.001 mS/cm and the correlation line presented a maximum error of 3%.

## DATA COLLECTION

The experimental tests were made taking into account the thermodynamic properties for ammonia/water solutions and the security margins established by the experimental unit design characteristics.

All measurements were taken by the data logger and the personal computer after the system had reached steady state for the given conditions. It was considered that steady state conditions were reached when the parameter readings remained almost constant for a period of at least ten minutes. Steady state was observed on the computer screen by plots of temperatures, pressures and flows against time. The data logger system scanned and stored all inputs every three seconds.

The selected operation conditions for the heat and mass fluxes, the temperatures and the pressures were not typical of those that might be employed in an absorption cooling systems because the borosilicate glass can not operate at these conditions. However, the absorber rig makes it possible to see a complete falling film and to know all the heat transfer area for the absorption process.

For each one of the test runs, an energy balance was performed for the test section. Fourteen test runs were conducted. However, only those in which the absorption takes place and a lift exists between the strong and weak ammonia/water solutions were considered.

The energy gained by the working mixtures across the entire test section was calculated by the enthalpy difference (between the inlet and outlet) and the solution mass flow rates. The enthalpies and vapour qualities were determined from the thermodynamic property data equations for ammonia/water solutions using the temperatures and pressures at the inlet and outlet of the test section.

Thermodynamic and physical properties of ammonia/water solutions were obtained from the Institute of Gas Technology [7] and Linde Industries [8].

For the data analysis the following assumptions were made:

The jacket section temperature is the same as the inner section of the absorber temperature.



The ammonia vapour is superheated at the bottom of the absorber.  
 Total area of the absorber section is covered by the falling film.  
 The thickness of the film is the same in all the wall of the absorber.

Using the above assumptions at the beginning and end of the test section, the temperatures, pressures, enthalpies and concentrations for ammonia/water solutions were known.

In order to determine the overall heat transfer coefficients from the gathered data (figure 5), the following equations was employed:

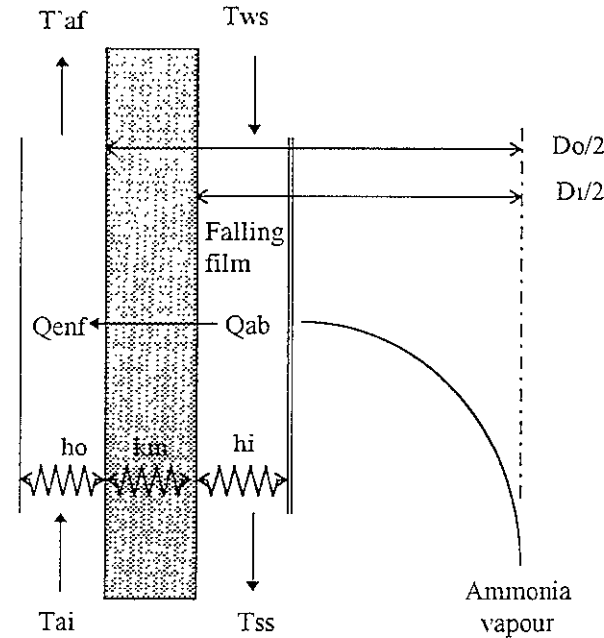


Figure 5. Schematical heat transfer process.

$$Q = U_o A \Delta T_{ml}$$

[eq1]

then  $U_o = Q / (A \Delta T_{ml})$

[eq2]

where  $1 / (A U_o) = 1 / (A_i h_i) + \ln(D_o/D_i) / (2 \pi L K_m) + 1 / (A_o h_o)$

[eq3]

and  $\Delta T_{ml} = (\Delta T_1 - \Delta T_2) / \ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)$

[eq4]

where  $\Delta T_1 = T_{ws} - T'_{af}$

[eq5]

and  $\Delta T_2 = T_{ss} - T_{ai}$

[eq6]

where  $T'_{af}$  is the theoretical final temperature in accordance with an energy balance.

**THERMODYNAMIC DATA**

The thermodynamic data for the falling film absorber operating on ammonia/water solutions was collected. Table 3 shows the values for temperature, pressure and concentrations for two representative test runs.

		$\xi = 13.22 \%$	$\xi = 14.52$
Cooling system	Tai (°C)	30.65	28.13
	Taf (°C)	36.93	35.53
	Ma (kg/s)	0.016	0.016
Weak solution system	Pws (MPa)	0.200	0.200
	Mws (kg/s)	0.009	0.005
	Tws (°C)	29.07	53.31
Strong solution system	Pss (MPa)	0.096	0.102
	Mss (kg/s)	0.008	0.023
	Tss (°C)	48.28	55.74
Ammonia vapour system	Paa (MPa)	0.165	0.102
	Maa (kg/s)	0.001	0.006
	Taa (°C)	25.56	27.53

Table 3. Thermodynamic data for two representative test runs.

Table 4 shows the total heat transfer area, the theoretical final temperature from the heat balance for the absorber operating with the conditions showed in Table 3. In addition, the calculated overall heat transfer coefficients for the same mentioned conditions are shown.

	$\xi = 13.22 \%$	$\xi = 14.52$
A (m <sup>2</sup> )	0.202	0.202
T'af (°C)	38.89	36.38
ho (W/m <sup>2</sup> K)	336	339
hi (W/m <sup>2</sup> K)	5806	5191
Uo (W/m <sup>2</sup> °C)	303	331

Table 4. Global heat transfer coefficients for two representative test runs.

**EXPERIMENTAL RESULTS**

The next figures show the experimental data of the ammonia/water absorption heat process reached in the experimental unit.

Figure 6 shows the temperature values against time for determining the steady state for each experimental test run. This figure shows

temperature constant values for the ammonia vapour (TEM3), ammonia/water weak solution temperature (TEM1), ammonia/water strong solution temperature (TEM2) and the leftover ammonia vapour temperature (VSN).

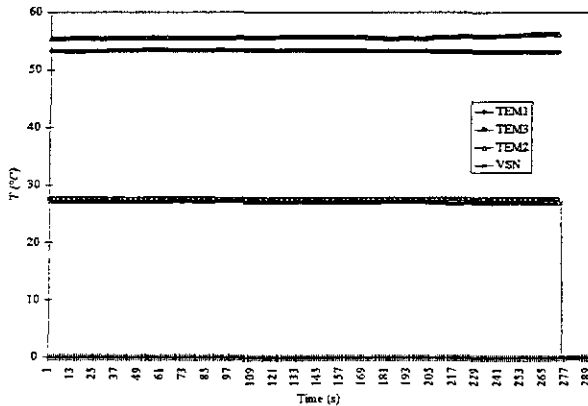


Figure 6. Temperature values for determining the steady state in the experimental unit.

Figures 7 and 8 show the temperature profile in the absorber rig in steady state for an ammonia concentration values in the strong solution of 14.52 and 13.22 % wt respectively. These profiles were range from 28.13 to 35.53 and 30.65 to 36.93 °C respectively.

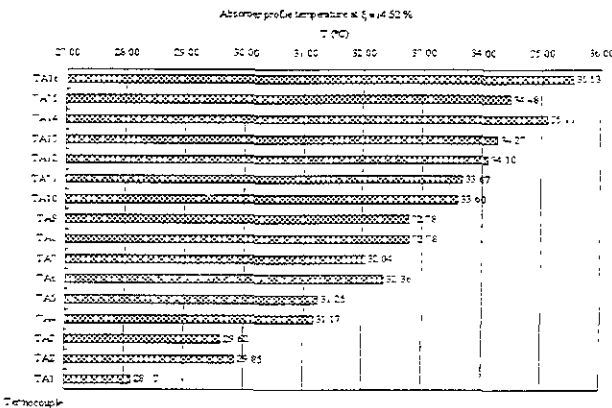


Figure 7. Experimental temperature profile for a test run.

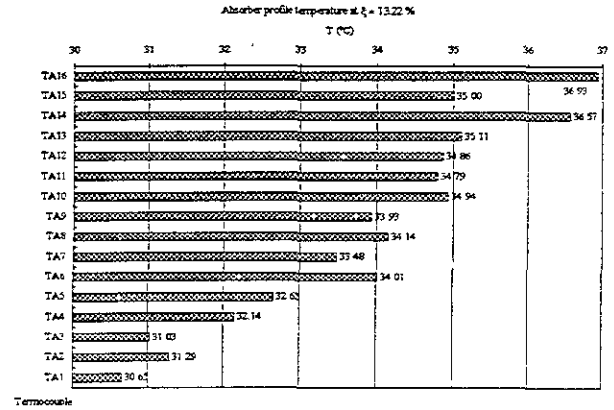


Figure 8. Experimental temperature profile for a test run.

Figure 9 shows the beginning of the absorption process in the experimental unit. Before this state, the readings were the same and after the absorption begun, these showed a lift between them.

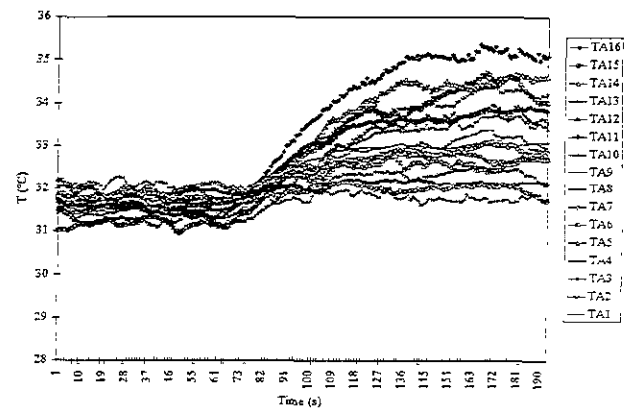


Figure 9. Graphical absorption process beginning.

In order to evaluate the accuracy of the temperature values, the standard deviation was computed and the exact value for each temperature was calculated. Figure 10 shows the standard deviation for each thermocouple in the absorber test

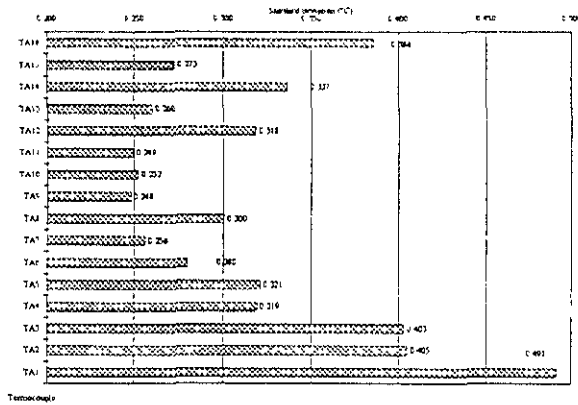


Figure 10. Standard deviation of each thermocouple.

Figure 11 shows the pressure and flows voltages in a steady state. Also, it shows the evaporator temperature with an expansion process (TEV1), and the flows represented as voltage values for the ammonia/water weak solution (S1=mws), ammonia/water strong solution (S2=mss) and ammonia vapour (S3=maa). In addition, it shows the pressures in the same form represented as T1 for Pws, T2 for Pss and T3 for Paa.

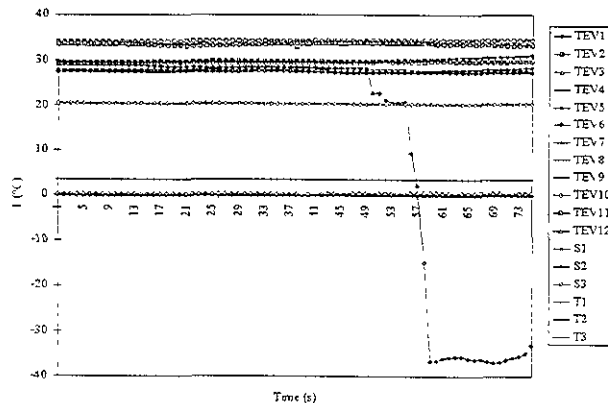


Figure 11. Evaporator temperatures and voltages for the test section.

**CONCLUSIONS**

Experimental results were presented for the calculation of overall heat transfer coefficients for ammonia/water flowing in a falling film inside a glass vertical absorber. The concentration range for the ammonia/water strong solutions was from 13 to 14 wt. %, with a pressure range from 1.5 to 2 MPa. The experimental results

presented are average values for a large number of test runs.

The overall heat transfer coefficients obtained in this work were in the range of 315 W/m<sup>2</sup> K, for a final solution concentration of around 13.8 wt %. From these values the calculated film heat transfer coefficients for the ammonia/water mixture were in the range of 5 500 W/m<sup>2</sup> K. Infante [9] calculated the overall heat transfer coefficient for a vertical tube as 780 W/m<sup>2</sup> K, for an inner tube absorption process of ammonia/water. The values calculated in this work considering that conductivity of steel instead of that of borosilicate glass would be in the same range.

The experimental rig showed that wet area and mass flow rate were controllable. In the future it is proposed to change the vertical glass tube for a metal tube with special internal surfaces to increase heat transfer.

**ACKNOWLEDGEMENTS**

The authors acknowledge that this work was partially funded by CONACYT project No. 25453-A, PAPIIT-DGAPA project No. IN-108397 and FIES-96-33-II project. Also, special thanks go to Rafael Reyces for his collaboration in the experimental work.

**REFERENCES**

1. Grossman, G. (1984) Heat and mass transfer in film absorption, The Handbook for Heat and Mass Transfer Operations, Ed. N. P. Cheremisinoff. Gulf.
2. Hall, R. and Ibele, W. A. (1960) Engineering Thermodynamics. Prentice Hall, U. S. A.
3. Guerrerri G. and King C. J., (1974) Design falling film absorbers Hydrocarbon Processing, 131-136.
4. Grossman G. (1983) Simultaneous heat and mass transfer in film absorption under laminar flow International Journal of Heat and Mass Transfer 26(3), 357-371.
5. Patnaik, V. and Pérez-Blanco, H. (1994) A counterflow heat exchanger analysis for the design of falling film absorbers. Advanced Energy Systems 31 (ASME), 31, 209-216.
6. Best R. and Hernandez J. (1991) Trans IChemE, Vol. 69, part A, 153-160.
7. Institute of Gas Technology (1964) Research Bulletin No. 34, Chicago, Illinois, USA. September.
8. Linde Industries (1974) Internal Report No 059.5239, Germany.
9. Infante Ferreira, C. A. (1985), Ph. D. Thesis, Delft University Technology, The Netherlands.

## **Capítulo 8.- ESTUDIO EXPERIMENTAL DE UN ABSORBEDOR CON ABSORCIÓN EN LA PARTE EXTERIOR DE UN TUBO HORIZONTAL**

### ***INTRODUCCIÓN***

En el presente capítulo se muestra el diseño de un simulador de absorbedores de película descendente, así como la descripción de las superficies utilizadas en la experimentación llevada a cabo con este equipo y las conclusiones obtenidas.

### ***BASES DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA***

Al término de la evaluación del transformador térmico por absorción de una etapa (TTA) con la mezcla Carrol - agua, se han podido determinar las condiciones de operación adecuadas para varios procesos dados con parámetros dentro del intervalo de operación del TTA. Sin embargo, ha surgido la necesidad de estudiar termodinámicamente el efecto de absorción de la mezcla Carrol - agua en la superficie de absorción para determinar el diseño óptimo de un absorbedor de película descendente para un TTA.

Para tal fin se ha diseñado y construido un simulador experimental de absorbedores que permitirá determinar la configuración óptima del absorbedor de un TTA.

Para lograr diseñar este simulador de absorbedores de película descendente se han realizado las siguientes consideraciones:

- El absorbedor tiene dos principales fenómenos de transferencia: calor y masa,
- El absorbedor se opera en condiciones de equilibrio termodinámico,
- Solo el vapor se difunde en la solución, y
- El estado estacionario se encuentra cuando no existen variaciones significativas de temperatura en un mismo punto.

Con base en estas suposiciones se ha construido un dispositivo que simulará el comportamiento de un absorbedor en el cual se lleva a cabo la absorción del

vapor de agua en una solución Carrol - agua, en la parte exterior de un tubo horizontal.

Este dispositivo permite observar la formación de película descendente sobre los tubos horizontales por que la coraza está hecha en vidrio de borosilicato transparente. Y se han conectados sensores de temperatura y presión para poder determinar cuando se ha alcanzado el estado de equilibrio.

El funcionamiento básico de este equipo, denominado TAS (Simulador de Absorbedores en Transformadores Térmicos), es el siguiente:

Todo el equipo se mantiene a una presión constante,

$$P = P_{TAS} \quad (8.1)$$

Todo el equipo se encuentra inicialmente a una temperatura constante e igual a la temperatura del ambiente

$$T_0 = T_{amb} \quad (8.2)$$

Se conduce un flujo conocido de la mezcla Carrol - agua, hasta la parte superior del equipo por medio de una bomba,

$$M_0 = k_1 \quad (8.3)$$

En la parte superior del equipo se iniciará la caída de la mezcla sobre una superficie tubular horizontal a una temperatura inicial conocida,

$$T_{Ab1} = T_{Ab1,i} \quad (8.4)$$

Subsecuentemente caerá esta misma mezcla sobre una segunda superficie tubular horizontal, inicialmente a una temperatura igual que la temperatura del tubo superior inmediato.

$$T_{Ab2,i} = T_{Ab1} \quad (8.5)$$

Toda la mezcla desciende con un flujo constante ( $M_0$ ), hasta llegar al fondo del equipo (TAS) en dónde ingresa a un intercambiador de calor. Este ingreso se

realiza a una temperatura inicial inferior a la temperatura del último tubo horizontal ( $T_{Ab 7}$ ),

$$T_{HX,i} < T_{Ab 7} \quad (8.6)$$

Al paso del intercambiador de calor, la mezcla cede calor ( $Q_{HX}$ ), al medio ambiente solo cuando la temperatura  $T_{Ab 7}$  es mayor a la del ambiente y que es un valor pequeño

$$Q_{HX} = M_0 C_p (T_{Ab 7} - T_{HX}) \quad (8.7)$$

$$\Leftrightarrow T_{HX} > T_{amb} \quad (8.8)$$

El flujo resultante a temperatura  $T_{HX}$ , se ingresa a un generador, en dónde se le aplica energía a una potencia conocida y constante,

$$Q_{GE} = K_3 \quad (8.9)$$

Esta potencia, hace que se evapore el refrigerante de la mezcla Carrol - agua presente, aumentando (ligeramente) el valor de la concentración de Carrol en la solución.

$$X_0 = X_{GE} \quad (8.10)$$

La solución proveniente del fondo del generador, es bombeada a la parte superior del equipo, que entra en contacto con el refrigerante y produce un efecto de absorción diferente en cada uno de los tubos, por lo que las concentraciones que mantienen el equilibrio termodinámico se presentarán en función de la temperatura instantánea presente en cada tubo horizontal, ya que

$$X_i = f(P_{TAS}, T_{Ab i}) \quad (8.11)$$

Con la cual se puede obtener la entalpía de los flujos a partir:

$$h = f(T, X_i) \quad (8.12)$$

por lo que se puede determinar con las ecuaciones 8.3, 8.11 y 8.12 la energía de absorción como:

$$Q_{AB} = Mo (h_{Ab1} - h_{Ab7}) \quad (8.13)$$

De esta forma, se puede conocer el valor de la temperatura dentro del equipo en varios puntos, a lo largo del equipo, de una manera representativa, sin necesidad de utilizar un modelo complicado.

El equipo cuenta con siete tubos horizontales por razones del espacio que debe de existir entre ellos (el mismo que su diámetro externo) como en los intercambiadores de arreglo cuadrado, utilizados en intercambiadores de calor comerciales de coraza y tubos, como los mostrados en la figura 8.1.

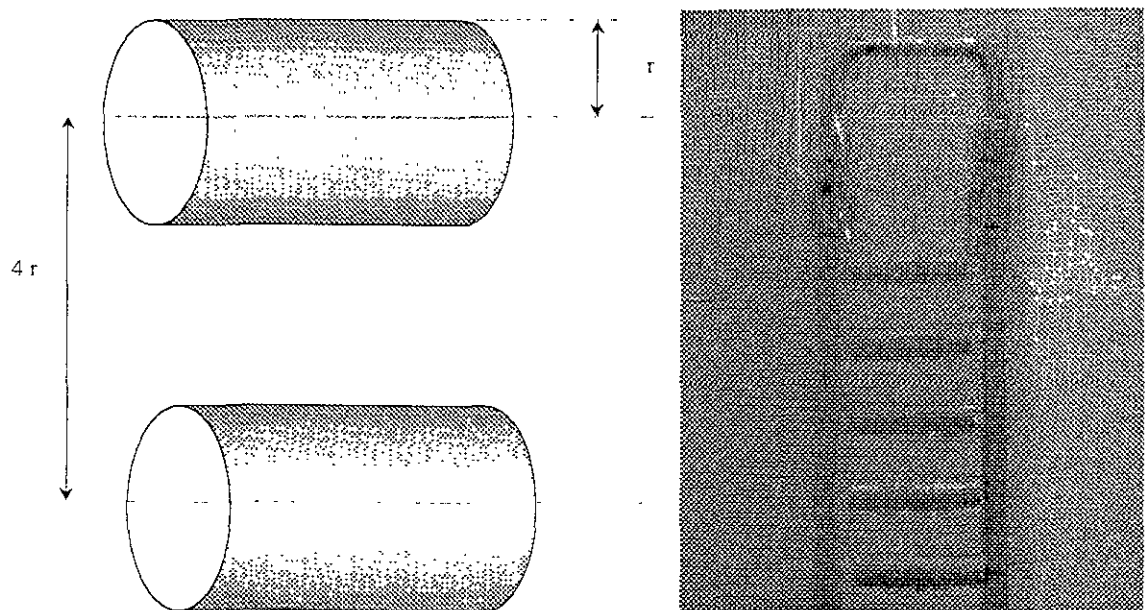


Figura 8.1. Diagrama esquemático y fotografía de la distancia entre tubos en un intercambiador de coraza y tubo con arreglo cuadrado.

### **DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA**

En la figura 8.2 se muestra esquemáticamente los principales componentes del TAS. En esta figura se puede apreciar al componente principal que es la columna - absorbedor, en dónde se han colocado tubos horizontales en diferentes alturas. Cada uno de los siete tubos horizontales tiene colocado un sensor de temperatura en la pared interior, en su sección más alta. Los tubos se han rellenado con material aislante a fin de evitar el paso de solución Carrol - agua hacia los termopares.

En la parte inferior de la columna - absorbedor, se encuentra un generador - evaporador, por el cual ingresa un volumen conocido de vapor en la parte inferior de la columna, una vez adentro, con ayuda de un codo se hace incidir el vapor en la parte inferior del tubo horizontal con menor altura con respecto a todos los demás.

También está conectada una bomba con un medidor de flujo (rotámetro calibrado según el capítulo 4) para determinar la cantidad de flujo adecuada para la absorción del vapor del refrigerante producido.

El calor producido por la absorción se retira por medio de convección natural en un intercambiador de calor, colocado del tubo de la parte inferior central de la columna y la parte media del evaporador - generador.

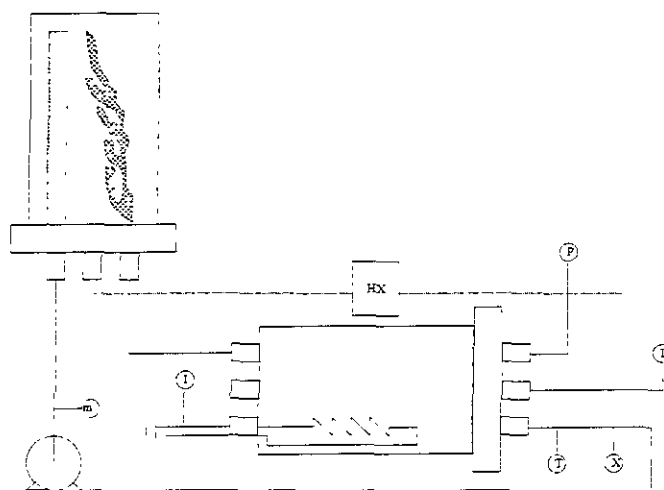


Figura 8.2. Diagrama esquemático del simulador de absorbentes de transformadores térmicos (TAS)

### Instrumentación

El equipo cuenta con la siguiente instrumentación, localizada en la figura 8.2:

Resistencia tipo cartucho de 1 kW (similares a las descritas en el Capítulo 4)

Termopares, tipo T y tipo J (especificaciones idénticas a los descritos en el Capítulo 4)

Vacu-Manómetro (similar al descrito en el Capítulo 4)



Mirilla acoplable a conexiones de 1/2 " NPT (construida en acero inoxidable y claro de 2.0 cm)

Bomba de engranes para microflujos (especificaciones idénticas a la bomba de circulación de solución concentrada, descrito en el Capítulo 4)

Conector 1/2" x 1/8" para tubing, Swagelock con sello septa cromatográfico para el monitoréo de concentración.

### ***METODOLOGÍA DE LLENADO, OPERACIÓN Y PARO DEL EQUIPO***

Para operar adecuadamente el equipo denominado simulador de absorbedores de transformadores térmicos (TAS) y obtener la información necesaria para conocer la distribución de temperaturas y concentraciones, se ha seguido la siguiente metodología de operación:

#### **Llenado del evaporador - generador**

Este componente se llena con la misma metodología de llenado del generador del transformador térmico por absorción de una etapa, descrita en el Capítulo 4.

### ***OPERACIÓN DEL EQUIPO***

El TAS ha sido diseñado y construido para determinar los perfiles de concentración y temperatura dentro de un absorbedor de película descendente de transformadores térmicos, particularmente operados con la mezcla Carrol - agua.

La operación adecuada del equipo (TAS) es la siguiente, (ver figura 8.3):

- Se fija con ayuda de una bomba de vacío, la presión interna de todo el equipo (que permanecerá constante a lo largo del experimento)
- Se inicia la adquisición de datos con ayuda de termopares, un adquisitor de datos, una tarjeta HP-IB, una interfase de comunicación RS-232, una computadora personal y un programa de escritura-lectura adecuado al adquisitor
- Se inicia el calentamiento de la solución a una potencia moderada (100 - 200 W)

- Se inicia la circulación de solución a razón de 3 g/min de solución concentrada de Carrol - agua hacia la parte superior de la columna
- Se incrementa gradualmente la potencia de evaporación - generación
- Se fija la potencia hasta el valor deseado
- Se observan continuamente en la pantalla de la computadora personal los valores de las temperaturas hasta observar valores prácticamente constantes en cada uno de los termopares
- Cuando se presenta una variación considerable en el valor de la lectura registrada por el termopar colocado en el tubo horizontal más cercano al fondo de la columna (0.5 °C, considerando la precisión descrita de la instrumentación en el Capítulo 4) se considera el inicio de la absorción del refrigerante en la solución descendente en los tubos horizontales
- Registrar los valores de flujo, potencia y presión presentes en el equipo, para complementar los datos de temperatura adquiridos en el sistema.
- Cuando no se tiene variación significativa (menos de 0.1 °C) de los valores adquiridos y mostrados en la pantalla de la computadora personal, verificar si es posible que dicha condición se mantenga por 10 minutos. En caso afirmativo, considerar la condición dada como un estado estable.
- Proceder al paro del equipo.

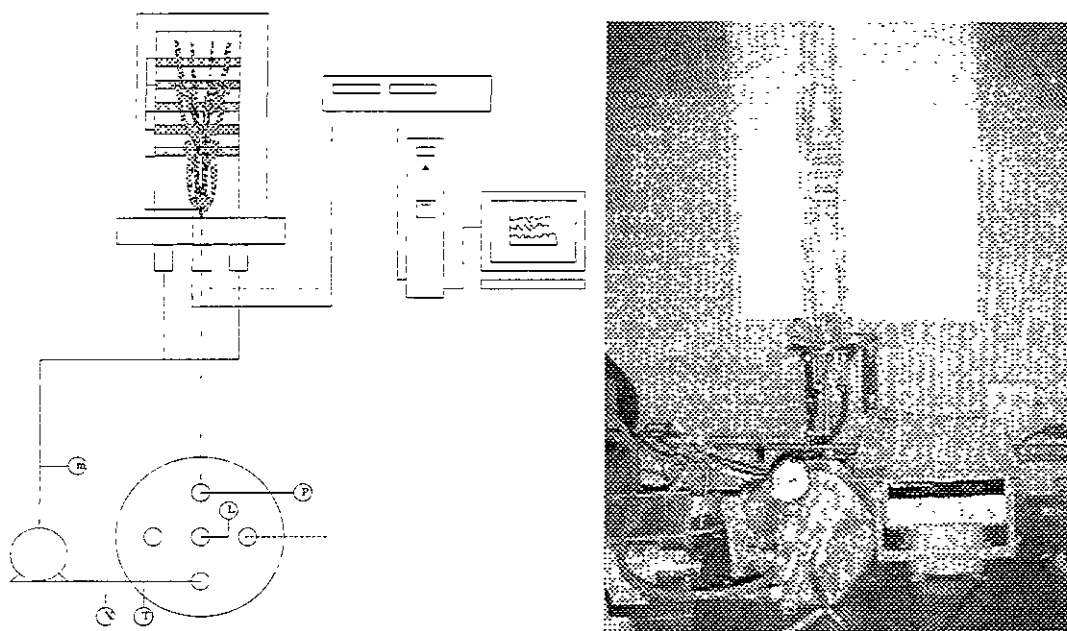


Figura 8.3. Diagrama esquemático y fotografía de la adquisición de datos de temperatura en el interior del TAS.

## ***PARO DEL EQUIPO***

Este equipo, tiene dos principales reguladores: un Variac para controlar la potencia suministrada a la resistencia inmersa del evaporador - generador y el variador de potencia de la microbomba que envía solución concentrada a la parte superior de la columna.

El paro de este equipo en los casos de que la temperatura de la solución exceda 150 °C (temperatura límite de la resistencia térmica de la columna de vidrio de boro - silicato) o en el caso de que exista una variación significativa de presión (2 kg/cm<sup>2</sup> es el límite de resistencia mecánica de la columna) se procederá a parar la operación del equipo.

El paro se realiza con la interrupción simultánea de la corriente hacia la microbomba y hacia el Variac. Con esta acción, se interrumpe toda la actividad dentro del equipo de forma segura e inmediata.

## ***SUPERFICIES UTILIZADAS***

Entre los diferentes tipos de intercambiadores de calor existentes comercialmente se encuentran los intercambiadores de coraza y tubos, muy útiles en los casos de intercambio de calor entre líquido - líquido. Por lo cual, presentan especial interés en el caso del proceso de absorción si se considera que cada tubo de intercambio de calor retira calor cuando está inundado su interior por un fluido a menor temperatura que el líquido que se encuentra rodeando la pared exterior.

Con esta suposición (en la cual se encuentra el tubo horizontal rodeado de líquido) es muy útil el conocer la distribución de temperaturas que existen en el interior de un absorbedor. Ya que, por la naturaleza del contacto entre refrigerante y solución Carrol - agua, no se puede considerar (ver las Bases de funcionamiento del sistema) que la temperatura a lo largo del absorbedor es la misma cuando ocurre el proceso de absorción.

La distribución de temperaturas y retiro de calor en diferentes alturas del absorbedor dependen de las características de la superficie en dónde se lleva a cabo el proceso, por lo cual, se han estudiado algunas superficies aletadas comerciales disponibles en México.

## Superficie LISA

Usualmente se utilizan los tubos lisos de cédulas pequeñas (20,40) en los intercambiadores de calor de tubo y coraza, por la simplicidad de los diseños y el bajo costo de estos tubos, comparados con tubos de superficies extendidas.

En el caso del estudio experimental del TAS, se utilizaron tubos lisos fabricados en acero inoxidable, con diámetro nominal de 1/2" y cédula 40 (espesor de 2.4 mm), en tramos de 5 cm, en los cuales se fijaron termopares e identificaron como se muestra en la figura 8.4 y con la distancia  $r = 1.08$  cm referida a la figura 8.1.

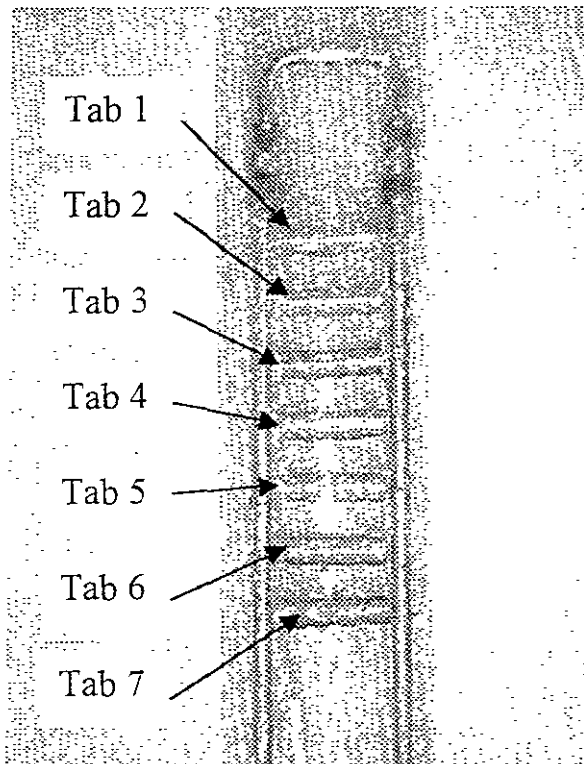


Figura 8.4. Identificación de termopares en los tubos horizontales del TAS

Se realizaron experimentos sobre tubos lisos de 21.7 mm de diámetro (1/2" nominal) con espesos de pared de 2.4 mm. Todos los tubos fueron segmentados a una longitud de 5 cm, a fin de que pudieran ser colocados dentro del TAS.

En el caso de los tubos lisos, se realizó el goteo de solución concentrada de Carrol al 57 % en peso con los siguientes datos termodinámicos.

Fecha (ddmmaa)	Flujo (g/min)	Q <sub>ge</sub> (W)	P (inHg)	D <sub>goteo</sub> (in)
120700	7.0	18.2	25	0.125
120700	7.0	34.2	24	0.125
120700	7.0	34.2	21	0.125
120700	7.0	81.1	17	0.125
120700	23.5	81.1	18	0.125
120700	46.6	81.1	18	0.125
130700	7.0	81.1	21	0.125
140700	23.5	81.1	22	0.0625
140700	46.6	81.1	22	0.0625
140700	10.5	81.1	19	0.0625
160700	23.5	81.1	25	0.125
160700	14.4	81.1	23	0.125
160700	23.5	81.1	22	0.125
170700	23.5	81.1	23	0.1875
170700	23.5	81.1	22	0.1875

Tabla 8.1. Condiciones de operación en el TAS para el estudio de tubos lisos.

La tabla anterior, muestra las condiciones en las que se puede reproducir el efecto de absorción en la parte exterior de un tubo liso. Estas distribuciones de temperatura se representan en la figura 8.5.

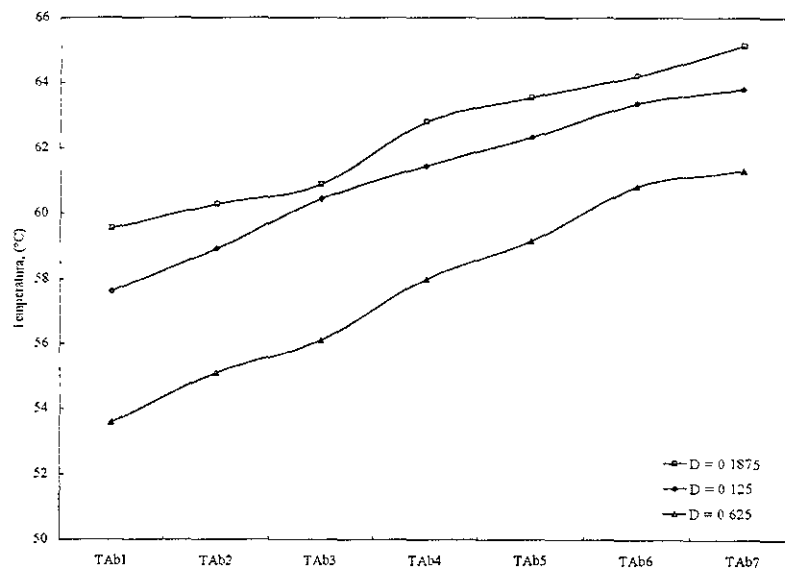


Figura 8.5. Perfiles de temperatura en el TAS para tubos lisos

En la figura 8.5 se puede apreciar que la parte superior del TAS es la parte que presenta los menores valores de temperatura, para diferentes diámetros de goteo (D). También se puede apreciar que los valores mayores de temperatura se encuentran en la parte inferior del TAS y el aumento no es constante, a pesar de encontrarse separados la misma distancia. La diferencia máxima de temperaturas entre el tubo TAb1 y el TAb7 es de 7.8 °C.

En la figura 8.6 se muestran los incrementos obtenidos en estos tubos.

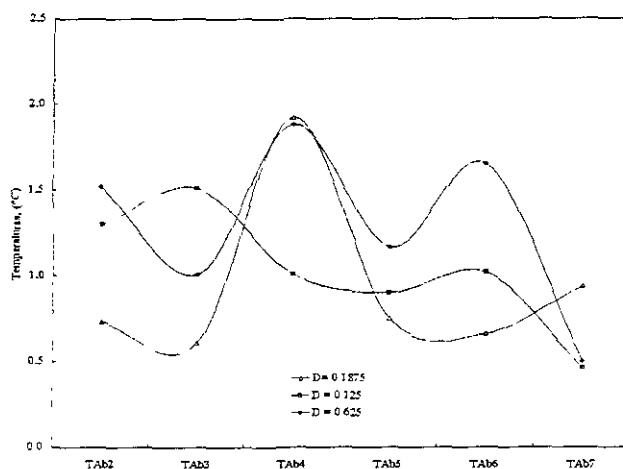


Figura 8.6. Incrementos de temperatura entre tubos lisos en el TAS.

En esta figura se muestran que los incrementos de temperatura mayores se presentan entre el tubo 3 y el tubo 4 (TAb 4), en dos diámetros (0.1875 y 0.625 pulgadas) alcanzando un incremento máximo de 1.9 °C, mientras que el incremento mínimo obtenido fue de 0.5 °C, en la parte inferior del TAS.

En la literatura [Kirby, 1994] se muestra que la temperatura de la solución de bromuro de litio fluyendo en forma de película descendente sobre tubos lisos horizontales absorbiendo vapor de agua varía hasta 14 °C entre el primer y último tubo. También en dicho estudio se muestra que la concentración másica de bromuro de litio en la solución varía de 62 a 60.4.

### Superficie CORRUGADA

Se han propuesto dos superficies para implementarse en la construcción de intercambiadores de calor, estas superficies las puede fabricar LAJ INTERNACIONAL, en México, para sustituir a los tubos lisos. Estos tubos pueden ser corrugados o aletados. En el caso de los tubos corrugados (como se

muestran en la figura 8.7, son tubos que tienen un canal sobre la parte exterior del tubo y lo recorre en forma de espiral 3.2 veces por pulgada.

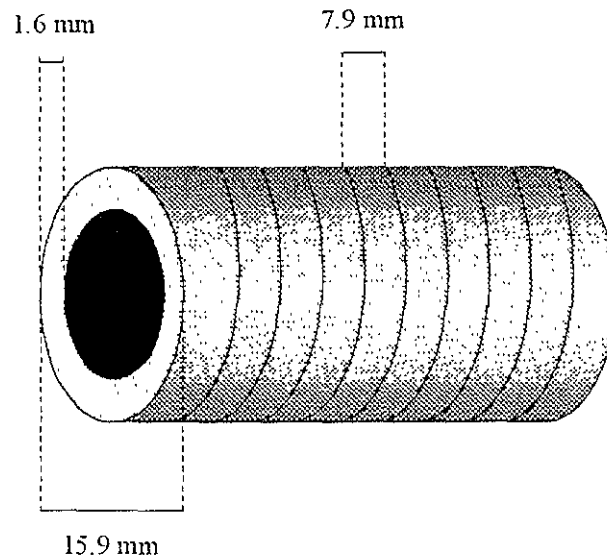


Figura 8.7. Dimensiones del tubo corrugado utilizado en el TAS.

Las condiciones que se utilizaron para determinar los perfiles de temperatura en este tipo de tubería con goteo de Carrol al 57 % en peso, se muestran en la tabla 8.2.

Fecha (ddmmaa)	flujo (g min)	Q <sub>ge</sub> (W)	P (inHg)	D <sub>goteo</sub> (m)
180700	7.0	81.1	19	0.1875
180700	23.5	81.1	19	0.1875
190700	23.5	81.1	22	0.125
190700	7.0	81.1	21	0.125
190700	23.5	81.1	22	0.125
200700	14.4	81.1	20	0.0625
200700	23.5	81.1	20	0.0625
200700	7.0	81.1	18	0.0625
200700	7.0	81.1	18	0.0625
200700	14.4	81.1	18	0.0625
200700	23.5	81.1	18	0.0625
200700	23.5	81.1	18	0.0625

Tabla 8.2. Condiciones de operación en el TAS para tubos corrugados.

Considerando las condiciones en que se presenta el fenómeno de absorción mostradas en la tabla 8.2, se muestra la distribución de temperatura en la figura 8.8.

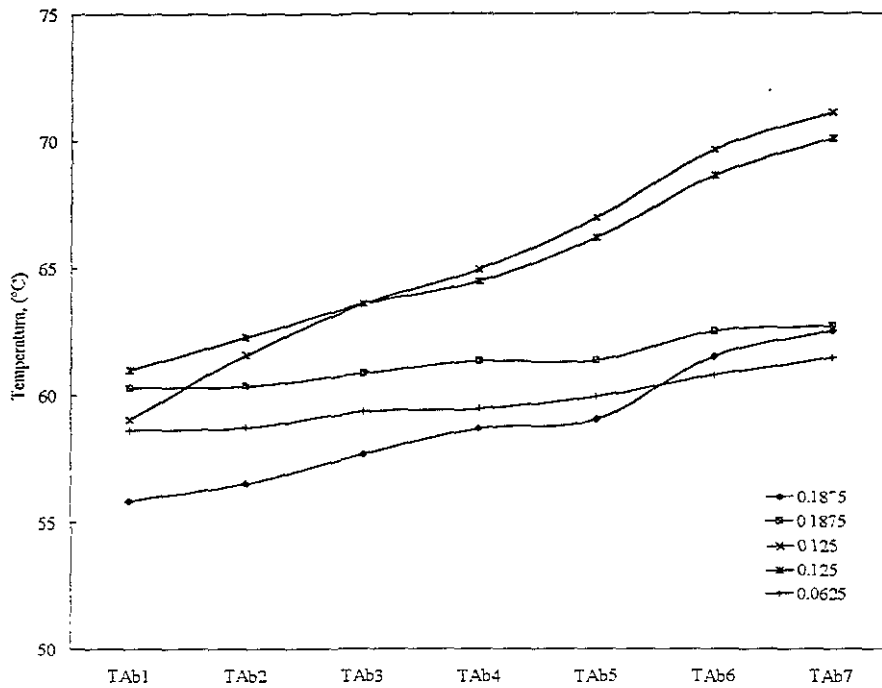


Figura 8.8. Perfil de temperaturas en el TAS para tubos corrugados.

En esta figura, se puede apreciar de forma similar a los tubos lisos, que el mayor valor de temperatura se encuentra en la parte inferior del TAS para todos las condiciones. Sin embargo, el máximo valor de temperatura varió en función del diámetro de goteo, siendo el mayor en el caso de 0.125 (1/8) pulgadas.

El efecto de absorción, no se presenta homogéneamente en las superficies de los tubos, provocando varios incrementos de temperaturas entre los tubos. En estos tubos se obtuvo una diferencia máxima de temperatura entre T<sub>Ab 1</sub> y T<sub>Ab 7</sub> de 12 °C. Sin embargo, este incremento se distribuye en seis incrementos de temperatura. Estos incrementos se muestran en la figura 8.9.



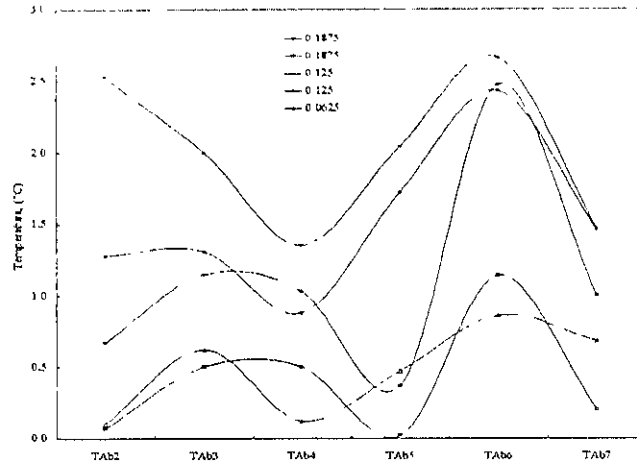


Figura 8.9. Incrementos de temperatura entre tubos corrugados en el TAS.

En esta figura, se muestran los incrementos de temperatura alcanzados en el TAS, se observa que el mayor incremento de temperatura en tubos corrugados se presenta entre el tubo 5 y el tubo 6 ( $T_{Ab\ 6}$ ). En estos incrementos el máximo valor obtenido fue de 2.5 °C, sin embargo, existe una segunda zona de absorción con gran incremento de temperatura pero relativamente menor al  $T_{Ab\ 6}$ , éste se localiza entre el tubo 2 y el tubo 3 ( $T_{Ab\ 3}$ ), en dónde el valor máximo obtenido es de 2.0 °C. Esta localización de dos zonas de incrementos de temperatura conducen a que en las demás zonas de absorción, los incrementos de temperatura entre un tubo y el siguiente, sean bajas, algunas, prácticamente no presentan incremento.

### Superficie ALETADA

De las dos superficies que se han propuesto para implementarse en la construcción de intercambiadores de calor, en el caso de los tubos aletados como se muestran en la figura 8.10, son tubos que tienen una aleta de 4.2 mm en forma de espiral sobre la parte exterior del tubo y forma 11 aletas (vueltas) por pulgada de tubería.

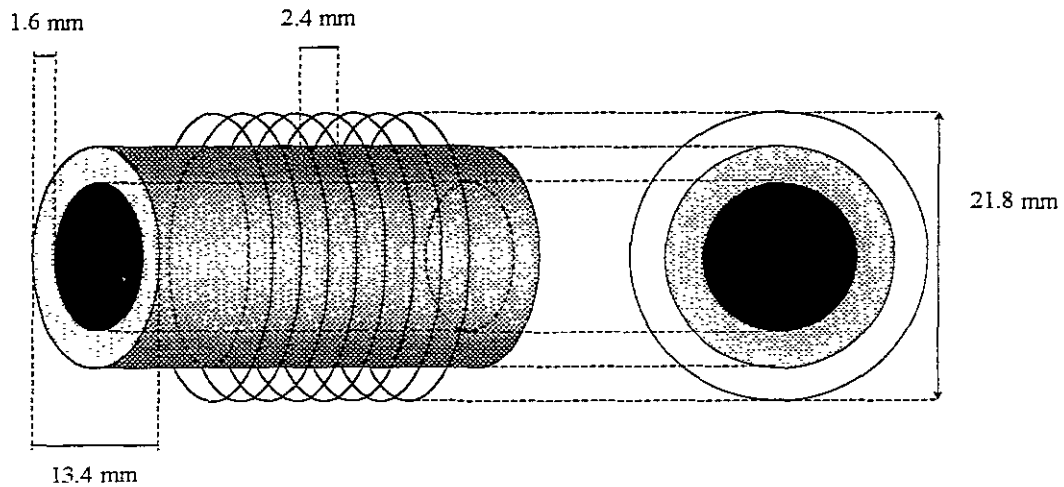


Figura 8.10. Dimensiones de los tubos aletados utilizados en el TAS.

Las condiciones que se utilizaron para determinar los perfiles de temperatura en este tipo de tubería con goteo de Carroll al 57 % en peso, se muestran en la tabla 8.3.

Fecha (ddmmaa)	Flujo (g/min)	Q <sub>ge</sub> (W)	P (inHg)	D <sub>goteo</sub> (in)
40700	23.5	81.1	22	0.0625
40700	23.5	81.1	22	0.0625
40700	23.5	81.1	22	0.0625
40700	7.0	81.1	22	0.0625
40700	23.5	81.1	21	0.0625
300600	7.0	81.1	15	0.0625
50700	23.5	81.1	21	0.125
50700	23.5	81.1	21	0.125
60700	76.3	81.1	22	0.125
60700	60.6	81.1	22	0.125
60700	46.6	81.1	22	0.125
60700	34.3	81.1	21	0.125
60700	23.5	81.1	19	0.125
60700	14.4	81.1	19	0.125
60700	7.0	81.1	18	0.125

Tabla 8.3. Condiciones de operación en el TAS para tubos aletados.

Las condiciones de operación en las cuales se presenta el fenómeno de la absorción se muestran en la figura 8.11.

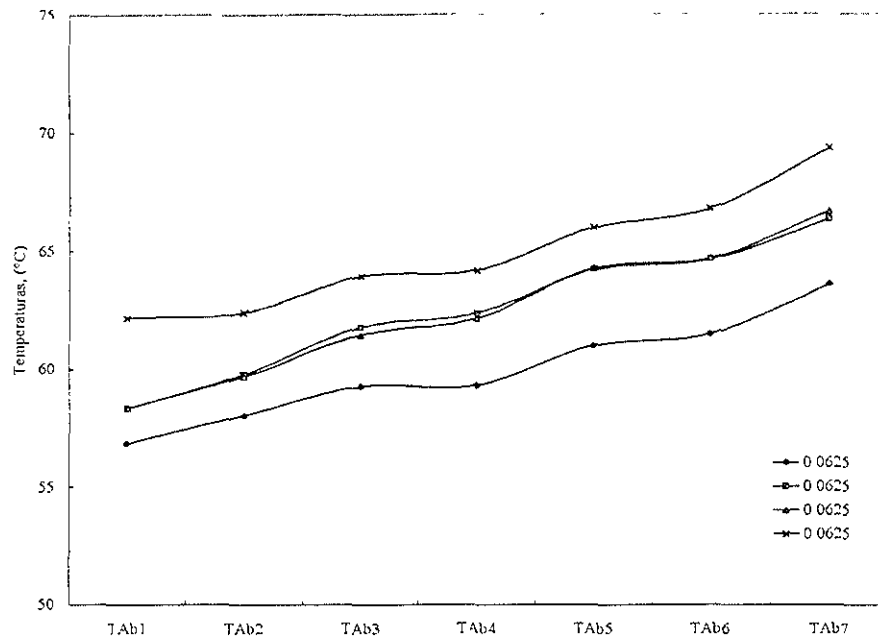


Figura 8.11. Perfil de temperaturas en el TAS para tubos aletados.

En esta figura se muestra que el mayor valor de temperatura se localiza en la parte inferior del TAS. Y presenta una diferencia máxima de 8.3 °C entre el valor del  $T_{Ab 1}$  y el valor del  $T_{Ab 7}$ . El incremento de temperaturas se lleva a cabo a través de varios pequeños incrementos, estos incrementos se muestran en la figura 8.12.

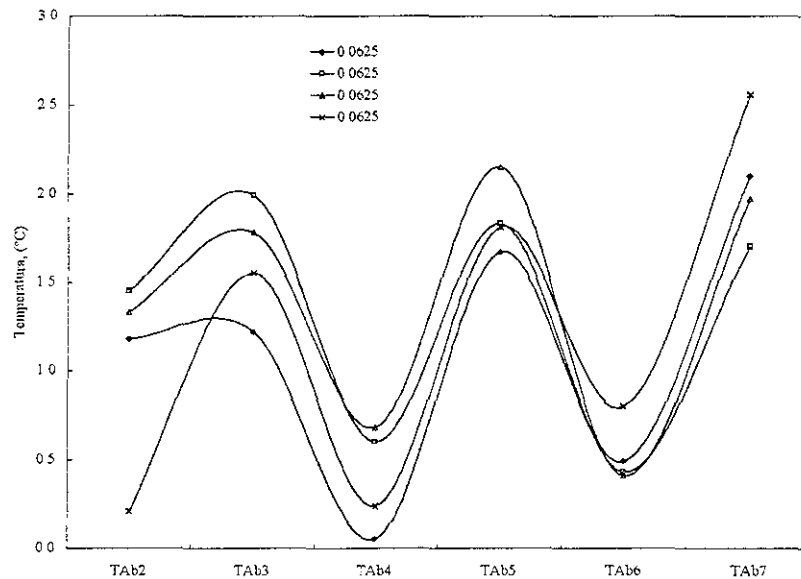


Figura 8.12. Incrementos de temperatura entre tubos aletados en el TAS.

En la figura 8.12 se muestran los incrementos de temperatura obtenidos entre los tubos aletados en el TAS. Se puede apreciar una repetición del comportamiento de la variación de la temperatura dentro del TAS. Esta distribución de temperaturas muestra que existen tres zonas preferentes en donde se alcanza una mayor elevación de la temperatura. Estas zonas son entre el tubo 2 y el tubo 3 ( $T_{Ab3}$ ), entre el tubo 4 y el tubo 5 ( $T_{Ab5}$ ) y entre el tubo 6 y tubo 7 ( $T_{Ab7}$ ). En los tubos 2, 4 y 6 no se obtienen elevaciones mayores a  $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , por lo que este comportamiento puede aprovecharse en el retiro de calor en los tubos 3, 5 y 7 preferentemente.

Este comportamiento térmico se asemeja más al calculado numéricamente [Kirby, 1994] para tubos lisos. Los valores de temperatura obtenidos en la experimentación presentan el comportamiento calculado en la literatura debido a que en este tipo de superficie se puede definir el área mojada en donde se llevará a cabo la absorción. Al conocer el valor de esta área se pueden correlacionar más confiablemente las propiedades de transporte asociadas a el proceso de absorción y según un modelo semi – empírico [Lu, 1996] bajo condiciones controladas el área efectiva de absorción mejora y el comportamiento termodinámico de una película descendente sobre la parte exterior de tubos horizontales tenderá a los comportamientos ideales para la transferencia de calor en películas descendentes.

### **Superficie MICRO – ALETADA**

Una variación de los tubos aletados que se pueden fabricar en México son los tubos micro – aletados, que puede manufacturar LAJ Internacional. Las características de estos tubos se muestra en la figura 8.13. Son tubos de acero inoxidable y se les ha formado una espiral con el propio material del tubo en forma de espira en la parte exterior, por lo que presenta una aleta continua en forma espiral de 20 vueltas por pulgada, con una longitud de aleta de  $0.7\text{ mm}$ .

Esta tubería tiene una distancia pequeña entre aletas y menor al diámetro de las gotas de solución concentrada al 56 % de Carrol, que es de aproximadamente  $3 - 4\text{ mm}$  de ancho.

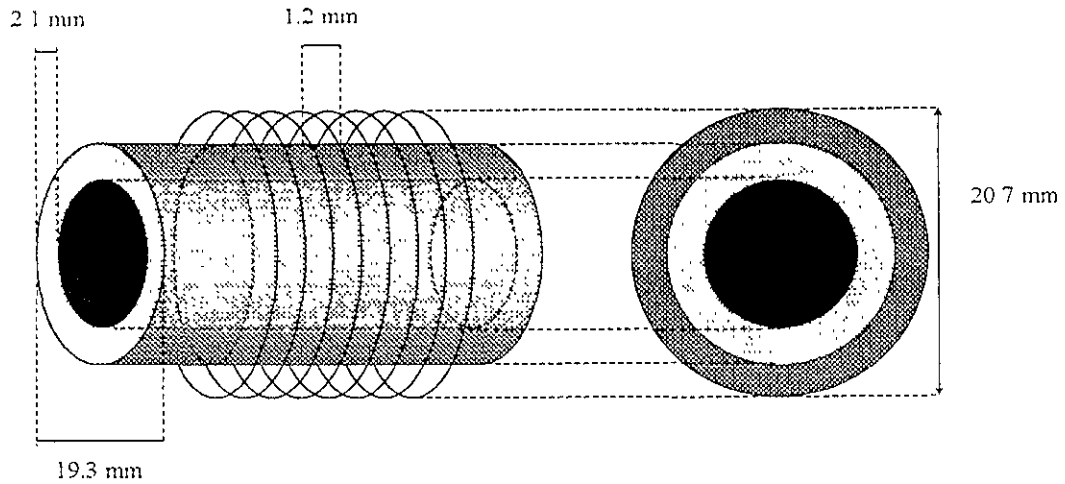


Figura 8.13. Dimensiones de los tubos micro – aletados utilizados en el TAS.

Las condiciones que se utilizaron para determinar los perfiles de temperatura en este tipo de tubería con goteo de Carrol al 57 % en peso, se muestran en la tabla 8.4.

Fecha (ddmmaa)	flujo (%)	Qge (%)	P (inHg)	D <sub>goteo</sub> (in)
210700	23.5	81.1	21	0.0625
220700	23.5	81.1	22	0.125
220700	23.5	81.1	22	0.125
240700	23.5	81.1	21	0.0625
240700	23.5	81.1	20	0.0625
260700	7.0	81.1	16	0.125
270700	7.0	81.1	14	0.1875

Tabla 8.4. Condiciones de operación en el TAS para tubos micro-aletados.

Las condiciones de operación en las cuales se presenta el fenómeno de la absorción se muestran en la figura 8.14. En esta figura se muestra que el fenómeno de absorción se presenta con un pequeño incremento de temperatura, máximo de 3.7 °C, menor incluso que el incremento de temperaturas presente en tubos lisos.

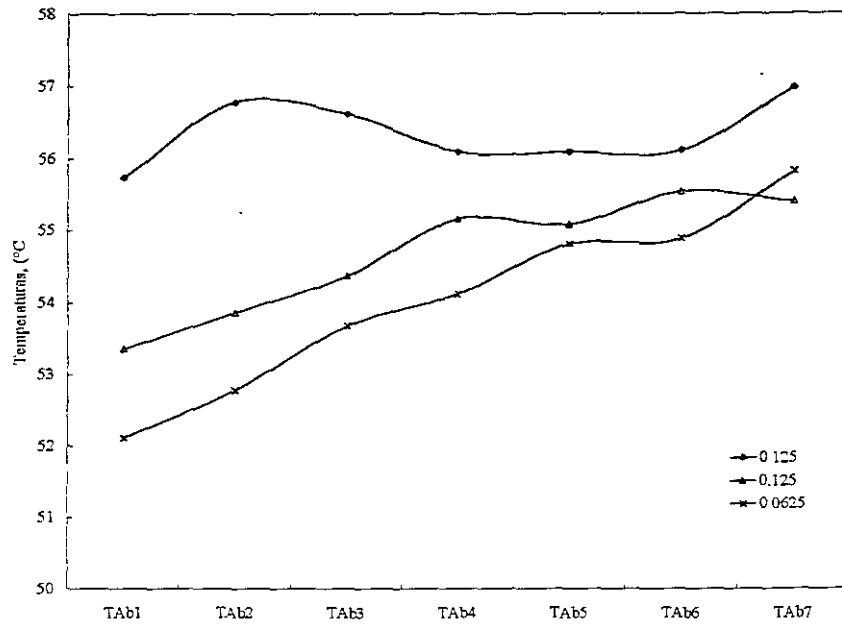


Figura 8.14. Perfil de temperaturas en el TAS para tubos micro-aletados.

El incremento de temperaturas se distribuye en forma irregular entre los tubos microaletados, estas variaciones se muestran en la figura 8.15.

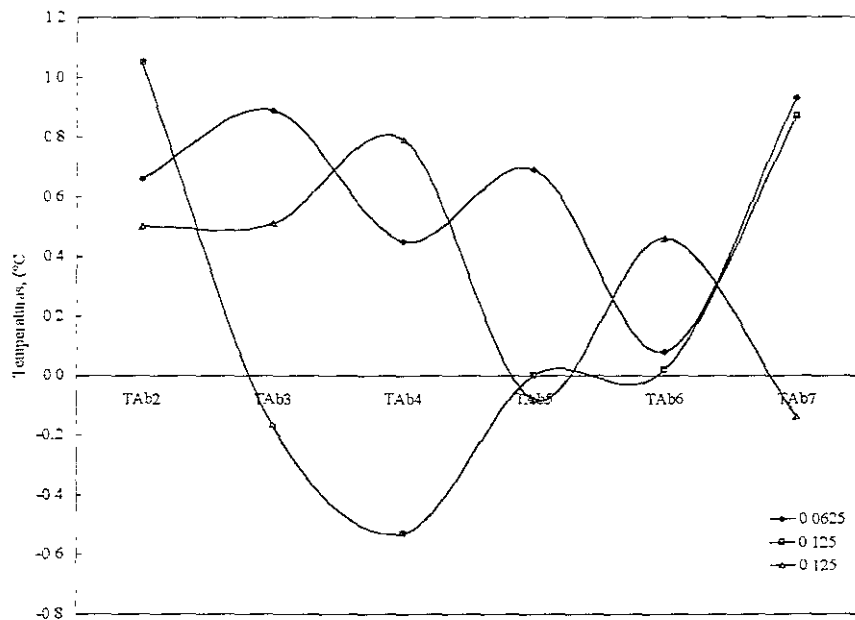


Figura 8.15. Variaciones de temperatura entre tubos micro-aletados en el TAS.

Esta figura muestra las variaciones de temperatura entre los tubos, sin embargo, no existe una tendencia definida e incluso se muestran diferencias menores a cero, indicando esto que las micro-aletas en estos tubos no permiten la formación de una película sobre los tubos y se forma un comportamiento descendente errático y disminuyendo así el área de transferencia de calor.

## RESULTADOS

La comparación de los incrementos de temperatura obtenidos entre los tubos comerciales muestra que se pueden obtener diferentes distribuciones de temperatura a lo largo de un absorbedor con haces de tubos horizontales.

Estos comportamientos se muestran en la siguientes tablas 8.5 – 8.8.

Fecha	flujo	Qge	P	D <sub>goteo</sub>	TA <sub>b1</sub>	TA <sub>b2</sub>	TA <sub>b3</sub>	TA <sub>b4</sub>	TA <sub>b5</sub>	TA <sub>b6</sub>	TA <sub>b7</sub>	Th <sub>x1</sub>	Th <sub>x2</sub>	ΔTh <sub>x</sub>	m Cp	TGe1	ΔT
(ddmm)	(g/min)	(W)	(inHg)	(in)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(W)	(°C)	(°C)
1407	23.5	81.1	22	0.0625	53.5	55.0	56.1	57.9	59.1	60.8	61.3	41.9	43.6	1.7	1.3	72.3	7.8
						1.5	1.1	1.8	1.2	1.7	0.5						
1607	23.5	81.1	22	0.125	57.6	58.9	60.4	61.4	62.3	63.3	63.8	43.6	47.2	3.6	2.8	75.1	6.2
						1.3	1.5	1.0	0.9	1.0	0.5						
1707	23.5	81.1	22	0.1875	59.5	60.2	60.8	62.7	63.5	64.2	65.1	44.0	45.7	1.7	1.2	74.5	5.6
						0.7	0.6	1.9	0.8	0.7	0.9						

Tabla 8.5. Parámetros de los tubos lisos en el TAS durante la absorción.

Fecha	flujo	Qge	P	D <sub>goteo</sub>	TA <sub>b1</sub>	TA <sub>b2</sub>	TA <sub>b3</sub>	TA <sub>b4</sub>	TA <sub>b5</sub>	TA <sub>b6</sub>	TA <sub>b7</sub>	Th <sub>x1</sub>	Th <sub>x2</sub>	ΔTh <sub>x</sub>	m Cp	TGe1	ΔT
(ddmm)	(g/min)	(W)	(inHg)	(in)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(W)	(°C)	(°C)
1807	7.0	81.1	19	0.1875	55.8	56.5	57.7	58.7	59.1	61.5	62.5	43.4	45.5	2.1	0.5	86.9	6.7
						0.7	1.2	1.0	0.4	2.4	1.0						
1807	23.5	81.1	19	0.1875	60.2	60.4	60.9	61.4	61.4	62.5	62.7	44.6	47.6	3.0	2.4	86.7	2.4
						0.2	0.5	0.5	0.0	1.1	0.2						
1907	7.0	81.1	21	0.125	59.0	61.6	63.6	64.9	67.0	69.6	71.1	46.6	47.3	0.7	0.2	79.4	12.1
						2.6	2.0	1.3	2.1	2.6	1.5						
1907	23.5	81.1	22	0.125	61.0	62.3	63.6	64.5	66.2	68.6	70.1	47.4	48.6	1.2	1.0	80.0	9.1
						1.3	1.3	0.9	1.7	2.4	1.5						
2007	14.4	81.1	18	0.0625	58.6	58.7	59.3	59.5	59.9	60.8	61.5	44.3	45.6	1.3	0.7	88.25	2.9
						0.1	0.6	0.2	0.4	0.9	0.7						

Tabla 8.6. Parámetros de los tubos corrugados en el TAS durante la absorción.

Fecha	flujo	Qge	P	D <sub>goteo</sub>	TAb1	TAb2	TAb3	TAb4	TAb5	TAb6	TAb7	Thx1	Thx2	ΔThx	m Cp	TGe1	ΔT	
(dm)	(g/min)	(W)	(inHg)	(in)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	ΔThx	(W)	(°C)	(°C)
0407	23.5	81.1	22	0.0625	56.8	58.0	59.2	59.3	61.0	61.5	63.6	43.4	43.7	0.3	0.2	74.0	6.8	
						1.2	1.2	0.1	1.7	0.5	2.1							
0407	23.5	81.1	22	0.0625	58.3	59.8	61.8	62.4	64.2	64.6	66.3	44.3	45.2	0.9	0.7	76.6	8.0	
						1.5	2.0	0.6	1.8	0.4	1.7							
0407	23.5	81.1	22	0.0625	58.3	59.7	61.4	62.1	64.3	64.7	66.6	45.5	47.1	1.6	1.2	77.9	8.3	
						1.4	1.7	0.7	2.2	0.4	1.9							
0407	7.0	81.1	22	0.0625	62.2	62.4	63.9	64.2	66.0	66.8	69.3	44.4	45.2	0.8	0.2	78.9	7.1	
						0.2	1.5	0.3	1.8	0.8	2.5							
0407	23.5	81.1	21	0.0625	60.4	60.9	61.8	61.7	62.7	63.1	64.5	46.3	47.6	1.3	1.0	81.4	4.1	
						0.5	0.9	-0.1	1.0	0.4	1.4							

Tabla 8.7. Parámetros de los tubos aletados en el TAS durante la absorción.

Fecha	flujo	Qge	P	D <sub>goteo</sub>	TAb1	TAb2	TAb3	TAb4	TAb5	TAb6	TAb7	Thx1	Thx2	ΔThx	m Cp	TGe1	ΔT	
(ddmm)	(g/min)	(W)	(inHg)	(in)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	ΔThx	(W)	(°C)	(°C)
2107	23.5	81.1	21	0.0625	52.1	52.8	53.7	54.1	54.8	54.9	55.8	39.6	41.9	2.3	1.8	73.9	3.7	
						0.7	0.9	0.4	0.7	0.1	0.9							
2207	23.5	81.1	22	0.125	55.7	56.8	56.6	56.1	56.1	57.0	57.0	40.7	43.9	3.2	2.5	72.1	1.3	
						1.1	-0.2	-0.5	0.0	0.0	0.9							
2207	23.5	81.1	22	0.125	57.1	57.0	57.2	56.4	56.6	56.7	57.2	41.9	44.7	2.8	2.2	73.4	0.1	
						-0.1	0.2	-0.8	0.2	0.1	0.5							
2407	23.5	81.1	21	0.0625	61.5	61.1	61.2	61.3	60.7	60.2	61.8	45.3	48.7	3.4	2.7	79.0	0.3	
						-0.4	0.1	0.1	-0.6	-0.5	1.6							
2607	7.0	81.1	16	0.125	53.4	53.9	54.4	55.2	55.1	55.5	55.4	42.0	43.4	1.4	0.3	91.0	2.0	
						0.5	0.5	0.8	-0.1	0.4	-0.1							
2707	7.0	81.1	14	0.1875	50.9	51.2	51.7	52.5	52.3	52.3	52.6	41.9	44.0	2.1	0.5	91.9	1.7	
						0.3	0.5	0.8	-0.2	0.0	0.3							

Tabla 8.8. Parámetros de los tubos micro aletados en el TAS durante la absorción.

La figura 8.16 muestra los perfiles de temperatura para los tubos bajo condiciones similares de goteo. En esta figura se muestra que en general, la temperatura mayor se obtiene en el fondo del absorbedor, sin embargo, parece uniforme en el caso de los tubos corrugados y para los tubos aletados se obtiene la mayor diferencia de temperaturas entre el primer y último tubo. En el caso de la variación del diámetro de goteo solamente se muestra un incremento global de todo el sistema, manteniéndose este comportamiento.



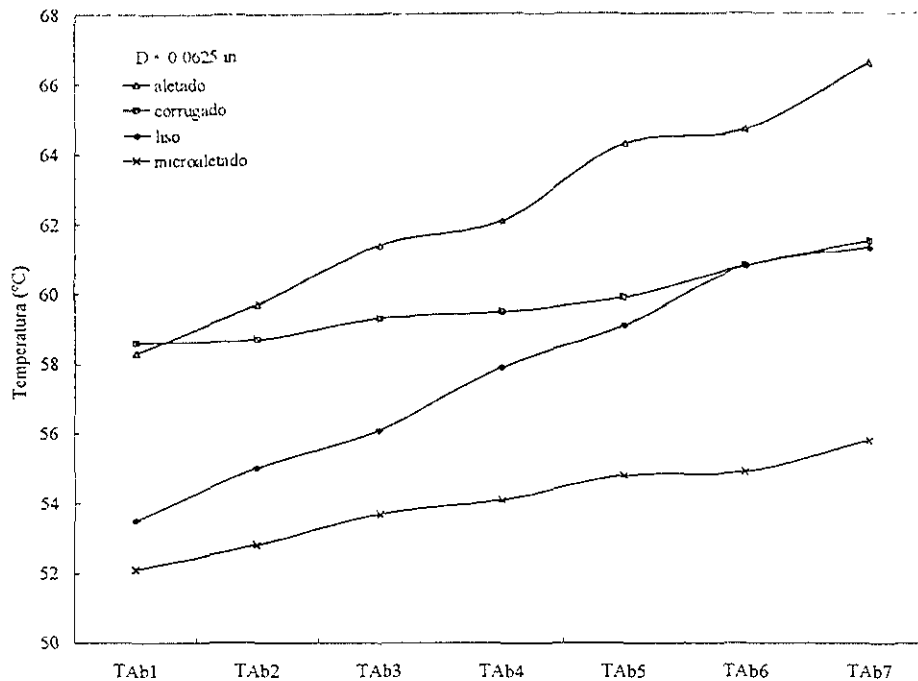


Figura 8.16. Perfiles de temperatura para los diferentes tipos de tubería con diámetro de goteo de 0.0625 in.

## CONCLUSIONES

Las superficies utilizadas en los diferentes experimentos mostraron diferentes comportamientos y temperaturas. En el caso de los tubos lisos, y que son los más utilizados en los intercambiadores de calor, se encontró que para las condiciones de absorción de Carroll al 57 %, se puede obtener hasta un incremento de 7.8 °C en varios pequeños incrementos, el mayor de ellos localizado en el 4° de los 7 tubos (prácticamente a la mitad del absorbedor). Es decir: en el caso de los tubos lisos, la mayor extracción de calor se realizaría en la parte media del haz de tubos lisos. Este comportamiento, que muestra que no es uniforme la absorción en cada tubo fue reportada en tubos lisos en la literatura [Nomura, 1993] por la no uniformidad del área mojada en cada tubo.

En el caso de los tubos micro – aletados se encontraron valores pequeños del incremento de temperatura, se muestra también que no existe una repetibilidad en los comportamientos y que no existe una zona definida de absorción. Las variaciones de temperatura entre los tubos del TAS sugieren incluso que existen

tubos en los que no se lleva a cabo la absorción. Este fenómeno puede deberse al poco tiempo de residencia que tiene la gota de solución de Carrol sobre la superficie. Por lo anterior, no se podría predecir en que zona de un absorbedor con tubos micro – aletados se retiraría la mayor cantidad de calor. A menos de que se extendieran más las aletas para controlar el área mojada.

En el caso de los tubos corrugados (canal de 3 espiras y  $\frac{1}{4}$  por pulgada) se encontró que el se pueden obtener mayores incrementos de temperatura que en el tubo liso, llegando hasta 12.1 °C de incremento, alcanzado preferentemente en dos zonas: en el 3° tubo de 7 y en el 6° tubo mayormente. Esto sugiere que la mayor cantidad de calor que se retiraría de un absorbedor con haz de tubos horizontales corrugados (de el tipo mencionado) se llevaría en la parte superior y la mayor parte de la extracción en la parte inferior del absorbedor. Este comportamiento sugiere el mecanismo [Nomura, 1993] de absorción de vapor no solamente sobre la superficie de los tubos, también entre el espacio que existe entre éstos, por lo que puede ser mayor el incremento de la temperatura de un tubo a otro.

Finalmente, en el caso de los tubos aletados (en 11 espiras por pulgada), se han obtenido incrementos de temperatura máximos de 8.3 °C, distribuidos en tres incrementos bien definidos y con valores máximos cercanos a 2 °C. Esta repetibilidad en la distribución de temperaturas puede ser aprovechada para el diseño de los absorbedores, ya que se puede conocer la zona preferente en dónde se extraerá la mayor parte de calor producida por la absorción. Estos incrementos aumentan su valor conforme descende la solución de Carrol sobre los tubos aletados y se presentan en los tubos 3°, 5° y 7° de 7. Este tipo de tubería podría ser utilizado en el diseño de absorbedores de haces horizontales de película descendente.

A partir de los datos recopilados y calculados para las diferentes condiciones de operación del TAS, se puede ver que la superficie horizontal que muestra el comportamiento más repetitivo es el tubo aletado de 11 espiras por pulgada, en el cual se puede observar que existen zonas preferentes y bien definidas para extraer el calor producto de la absorción del vapor de agua en la solución concentrada de Carrol .

## *REFERENCIAS*

**Kirby M J & Perez – Blanco H**, A design model for horizontal tube water / lithium bromide absorbers, AES – Vol 32, Heat pump and refrigeration systems design, analysis and applications, pp 1 –10, ASME, 1994

**Lu Z, Li D Q, Li S X & Yu – Chi B**, A semi – empirical model of the falling film absorption outside horizontal tubes, Procc. of Int. Ab-Sorption heat pump conference '96, Montreal Canada, pp 473 – 480, 1996

**Nomura T, Nishimura N, Wei S, Yamaguchi S & Kawakami R**, Heat and mass transfer mechanism in the absorber of water / LiBr conventional absorption refrigerator: Experimental examination by visualized model, AES – Vol 31, International Absorption Heat Pump Conference, pp 203 – 208, ASME, 1993

**Peavy H S, Rowe D R, Tchobanoglous G**; Environmental Engineering, McGraw-Hill, Singapore, 1985

## **Capítulo 9.- DISEÑO OPTIMADO DE ABSORBEDORES DE PELÍCULA DESCENDENTE**

### **INTRODUCCIÓN**

Teniendo como referencia los capítulos anteriores que muestran dos estudios de absorción en película descendente, se muestra en este capítulo, la metodología utilizada para el diseño de un absorbedor que operará en un transformador térmico por absorción de una etapa (TTA) para obtener el coeficiente de operación (COP) máximo en las condiciones de operación dadas.

### **ABSORBEDORES**

Existen varios tipos de absorbedores y diversos mecanismos de contacto entre fases [Westerlund, 1994, Perry, 1997; Lee, 1999], cada absorbedor presenta ventajas y desventajas para llevar a cabo el contacto entre líquido y gas. Así como también cada absorbedor tiene diferentes intervalos de valores de los parámetros de diseño: coeficientes de transferencia, volumen, disipación, etc. [Lee, 1999].

En la mayoría de los equipos comerciales de refrigeración que utilizan la mezcla bromuro de litio – agua, se utilizan intercambiadores de película descendente como absorbedores [Lu, 1996; Hoffmann, 1996], lo cual motiva el diseño de un absorbedor de vapor de agua en soluciones de bromuro de litio en película descendente para operar un TTA con el mayor valor del COP para las condiciones de operación que requiera un proceso.

Inicialmente se diseñó y construyó un absorbedor de película descendente (ver capítulo de diseño y construcción de un TTA) el cual mostró que puede operar en las condiciones termodinámicas calculadas (presión, concentración y temperatura) con el modelo matemático presentado (en el capítulo de modelado de un TTA), sin embargo, la cantidad de calor recuperada en el absorbedor es inferior a la calculada con este. Por lo cual se diseñará un nuevo absorbedor que opere en diferentes condiciones de operación recuperando la máxima cantidad de energía y por lo tanto el COP óptimo.

## **ESTUDIOS PREVIOS CON BROMURO DE LITIO**

Se han realizado estudios teóricos [Grossman, 1983 y 1984] para determinar el mecanismo de absorción de vapor de agua en películas descendentes. En estos estudios se calcularon valores para los coeficientes de transferencia de calor y masa. También se realizaron análisis sobre los efectos del contra – flujo, en los absorbedores de película descendente [Patnaik, 1993], llegando estos a la conclusión de que es posible reducir los problemas de diseño de un absorbedor a las especificaciones de los coeficientes de masa y calor en función de las condiciones de operación y del punto de rocío.

También se han realizado estudios experimentales [Nomura, 1993; Miller, 1993; Greiter, 1993; Matsuda, 1994; Hoffman, 1996] en los que se determinaron los comportamientos de películas descendentes en tubos lisos y con superficies extendidas. Mostrando que la absorción de vapor en bromuro de litio no es uniforme a lo largo del absorbedor y depende de la fracción de tubo mojado. Y que coincide con un modelo semi – empírico [Lu, 1996] presentado en la literatura.

También se han propuesto modelos (como es mostrado en el capítulo de modelado de TTA) que determinan valores de concentración específicamente para películas descendentes [Jernqvist, 1996; Yigit, 1999] que establecen relaciones para el cálculo de valores adimensionales en función de las distancias recorridas por las películas descendentes de bromuro de litio.

La información anterior permiten tener información para el diseño de un absorbedor de película descendente en función de las condiciones de operación que se requieran. Sin embargo, el diseño de un absorbedor para condiciones específicas (dadas por un proceso térmico), basado en un coeficiente global de transferencia de calor, puede conducir a un diseño no adecuado o no optimado.

## **DISEÑO OPTIMADO DE ABSORBEDORES**

Para diseñar un absorbedor de un TTA en el que se intercambia calor con dos fluidos conocidos, se requieren los siguientes datos:

- Potencia, que para un TTA será la energía útil revalorizada y
- Temperaturas de operación:

- Entrada de solución concentrada
- Salida de solución diluida
- Entrada de fluido de recuperación de calor
- Salida de fluido de recuperación de calor

Ya que a partir de estos datos, se pueden calcular los demás parámetros de diseño de un absorbedor. Por lo tanto, para optimar un absorbedor, se debe de utilizar un criterio de optimación.

### CRITERIO DE OPTIMACIÓN

Para optimar un componente, se debe de considerar que éste no opera independiente de los demás componentes a los que está interconectado en el ciclo de un TTA. Por lo cual, se debe de diseñar al absorbedor en las condiciones de operación más convenientes para todo el ciclo. Será más práctico diseñar un componente que cumpla una función adecuada a todo el ciclo antes que pensar en sobrediseñar. Ya que un sobrediseño en el caso de una película descendente puede promover áreas no mojadas, que reducirán la cantidad de energía recuperada.

Para optimar el absorbedor se considerará lo siguiente:

Existen dos principales parámetros en un TTA:

el COP, y

el incremento de temperatura ( $\Delta T$ ).

Por lo cual el correlacionar estos parámetros: uno (COP) en función del otro ( $\Delta T$ ), conducen a obtener una relación con la cual se pueden determinar condiciones de operación adecuadas a un proceso dado.

Partiendo de un balance de energía (ver modelado de TTA y sus condiciones)

$$Q_{GE} + Q_{EV} = Q_{AB} + Q_{CO} \quad (9.1)$$

Y considerando que  $T_{GE} = T_{EV}$ , que es razonable al considerar que la energía que se ingresa al generador y al evaporador provienen de la misma fuente de calor de desecho, se obtendrá un COP reversible

$$COP = \left( \frac{T_{AB}}{T_{AB} - T_{CO}} \right) \left( \frac{T_{EV} - T_{CO}}{T_{EV}} \right) = COP_C \quad (9.2)$$

y un COP externo

$$COP = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE} + Q_{EV}} = COP_E \quad (9.3)$$

se puede definir a la eficiencia termodinámica ( $E_T$ ) como la relación de estos COP irreversible y reversible [Abrahamson, 1993], como:

$$E_T = \frac{COP_E}{COP_C} \quad (9.4)$$

Siendo este parámetro un buen índice de **optimación termodinámica** específica cuando:

$$\frac{dE_T}{d\Delta T} = 0 \quad (9.5)$$

obteniéndose  $E_T^*$  que es el valor en que se opera con la máxima relación entre el COP y el incremento de temperatura ( $\Delta T$ ).

## CÁLCULO DE DIMENSIONES

A partir del valor máximo de  $E_T$  ( $E_T^*$ ) se puede obtener el  $COP_E$  y por lo tanto conocer el valor de la potencia revalorizada ( $Q_{AB}$ ) a la temperatura del absorbedor ( $T_{AB}$ ) que se obtiene de su relación con el incremento de temperatura y la temperatura de la fuente de calor a revalorizar ( $T_{EV}$ ):

$$T_{AB} = T_{EV} + \Delta T \quad (9.6)$$

A partir de las condiciones de operación del TTA, ( $T_{EV}=T_{GE}$ ,  $T_{CO}$ ,  $T_{AB}$ ), se sigue el modelo mostrado (en un capítulo anterior) y se pueden calcular la potencia de operación.

Por otro lado, para retirar la energía (en forma de calor) del absorbedor con un intercambiador de calor, se debe de cumplir [Cervantes, 1999]:

$$Q_{AB} = U_o A (\Delta TML) \quad (9.7)$$

dónde  $\Delta TML$  es la diferencia media logarítmica de temperaturas a las que opera el intercambiador de calor y  $(U_o A)$  se puede considerar para una película descendente (ver capítulo anterior y [Kirby, 1994]), como:

$$AU_o = \frac{1}{\frac{1}{A_o h_o} + \frac{\ln \frac{D_o}{D_i}}{2\pi L K_m} + \frac{1}{A_i h_i}} \quad (9.8)$$

y que puede simplificarse [Hoffmann, 1996; Cervantes, 1999] como:

$$AU_o = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i h_i} + \frac{r_e \ln \frac{r_o}{r_i}}{K_m} + \frac{1}{h_o}} \quad (9.9)$$

En este producto, el valor dominante del producto  $AU_o$  es el valor  $h_o$  que depende de las propiedades fisicoquímicas a las temperaturas del fluido que retira el calor (fluido frío) [Yigit, 1999] y el de menor influencia (en algunas condiciones despreciable) es la resistencia ocasionada por la pared si es de un material con una alta conductividad [Serpente, 1993; Greiter, 1993] pudiéndose reducir a:

$$AU_o = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i h_i} + \frac{1}{h_o}} \quad (9.10)$$

que depende de las características propias (diámetros, temperaturas y presiones) en las que se coloca al absorbedor, ya que estas variables afectan a las propiedades de transporte que a su vez afectan al coeficiente de transferencia de calor.

Para el caso de bromuro de litio se ha calculado experimentalmente [Hoffman, 1996] el valor del coeficiente de transferencia de calor cuando se lleva a cabo la absorción de vapor en una solución acuosa y estos se han correlacionado



con la viscosidad cinemática, mostrando estos valores una correlación aceptable. Esta correlación se muestra en la figura 9.1.

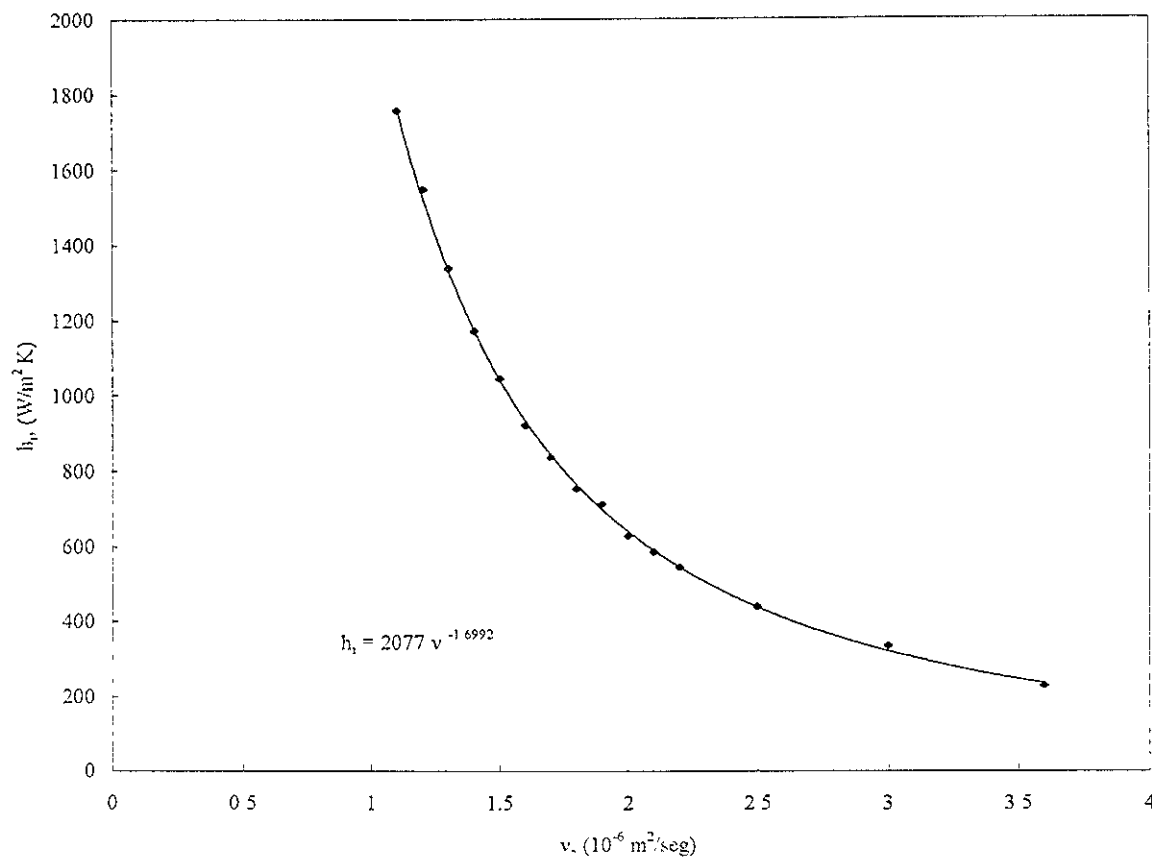


Figura 9.1. Correlación de  $h_i$  en función de la viscosidad cinemática para películas descendentes de bromuro de litio sobre tubos lisos horizontales.

En esta figura se muestra una correlación potencial de la forma:

$$h_i = K_1 \nu^{-K_2} \quad (9.11)$$

dónde  $K_1 = 2077$  y  $K_2 = -1.699$ , con  $\nu$  expresada como  $10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg}$  y  $h_i$  expresada en  $\text{W/m}^2\text{K}$ .

Similarmente se relaciona  $h_i$  con la tensión superficial [Hoffman, 1996]:

$$h_i = K_3 \sigma^{-K_4} \quad (9.12)$$

dónde  $K_3 = 4\text{E}+17$  y  $K_4 = 16$ , con  $\sigma$  expresada como  $10^{-2} \text{ Nm}^{-1}$  y  $h_i$  expresada en  $\text{W/m}^2\text{K}$ .

Quedando de esta forma solo el cálculo de  $h_o$  para conocer el valor  $U_o$ :

$$U_o^* = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o}} \quad (9.13)$$

Dónde  $h_o$  depende de las temperaturas del fluido que retira el calor revalorizado y las características propias de la tubería, dónde se lleva a cabo este proceso.

Una vez calculado el valor  $U_o^*$ , se sabe el área de transferencia de calor que se requerirá para retirar al calor revalorizado, a partir de la ecuación 9.7:

$$(A U_o) = Q_{AB} / (\Delta TML) \quad (9.14)$$

dónde

$$Q_{AB} = E_T^* \text{ COP}_C (Q_{GE} + Q_{EV}) \quad (9.15)$$

y por lo tanto:

$$A = (E_T^*) \left( \frac{T_{AB}}{T_{AB} - T_{CO}} \right) \left( \frac{T_{EV} - T_{CO}}{T_{EV}} \right) (Q_{GE} + Q_{EV}) / (\Delta TML) / (U_o^*) \quad (9.16)$$

con

$$\Delta TML = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (9.17)$$

$$\text{con } \Delta T_1 = T_{GE} - T_{\text{proceso, inicial}} \quad (9.18)$$

$$\Delta T_2 = T_{AB} - T_{\text{proceso, requerida}} \quad (9.19)$$

Optimación específica

En el caso del TTA del CIE – UNAM, se realizó un diseño en base a un requerimiento fijo (ver tabla de datos de diseño termodinámico para el TTA),

en el que se supuso una fuente disponible que puede proporcionar energía a los componentes (generador y evaporador) 4 kW a 90 °C de operación. Por otro lado, se supuso una revaloración de 60 °C en el absorbedor. Estos datos se muestran en la tabla 9.1.

Parámetro	Valor	Unidad
$T_{AB}$	150	°C
$Q_{EV} + Q_{GE}$	4000	W
$\Delta T$	60	°C
(valores calculados)		
$Q_{AB}$	1800	W
$COP_E$	0.442	Adimensional
$COP_C$	0.573	Adimensional
(valores para el diseño térmico)		
$\Delta T_{ML_{AB}}$	21.6	K
$U_{\text{tubo liso, aceite}}$	210	W/m <sup>2</sup> K
A	0.39	m <sup>2</sup>

Tabla 9.1. Datos de diseño termodinámico del TTA construido en el CIE.

Esta tabla muestra los resultados de la simulación hecha con el modelo para calcular la potencia revalorizada en el absorbedor y los coeficientes de operación y los valores utilizados para el cálculo del área de transferencia en el absorbedor.

A partir de estos datos, se realizó otra simulación para determinar el diseño optimado del absorbedor de película descendente. Estos resultados se resumen en la tabla 9.2.

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$\Delta T$ (°C)	$Q_{GE}$ (kW)	$Q_{EV}$ (kW)	$Q_{CO}$ (kW)	$Q_{AB}$ (kW)	$COP_E$ (dim)	$COP_C$ (dim)	$\eta_{HX}$ (dim)	$V_T$ (dim)	$m_{EV}$ ( $10^3$ kg/s)	$m_{AB}$ ( $10^4$ kg/s)	$m_{GE}$ ( $10^4$ kg/s)
90	32	90	123	33.0	2.108	2.200	2.205	2.104	0.488	0.695	0.7	0.702	8.71	3.92	3.05
90	32	90	124	34.0	2.106	2.200	2.205	2.102	0.488	0.689	0.7	0.708	8.71	4.04	3.17
90	32	90	125	35.0	2.104	2.200	2.205	2.099	0.488	0.684	0.7	0.713	8.71	4.18	3.31
90	32	90	126	36.0	2.101	2.200	2.205	2.096	0.487	0.678	0.7	0.719	8.71	4.32	3.45
90	32	90	127	37.0	2.098	2.200	2.205	2.093	0.487	0.673	0.7	0.724	8.71	4.47	3.60
90	32	90	128	38.0	2.094	2.200	2.205	2.089	0.487	0.667	0.7	0.729	8.71	4.63	3.76
90	32	90	129	39.0	2.090	2.200	2.205	2.085	0.486	0.662	0.7	0.734	8.71	4.80	3.93
90	32	90	130	40.0	2.085	2.200	2.205	2.081	0.486	0.657	0.7	0.739	8.71	4.97	4.10
90	32	90	131	41.0	2.080	2.200	2.205	2.076	0.485	0.652	0.7	0.744	8.71	5.16	4.29
90	32	90	132	42.0	2.074	2.200	2.205	2.070	0.484	0.647	0.7	0.748	8.71	5.36	4.49
90	32	90	133	43.0	2.068	2.200	2.205	2.064	0.484	0.642	0.7	0.753	8.71	5.56	4.69
90	32	90	134	44.0	2.061	2.200	2.205	2.057	0.483	0.638	0.7	0.757	8.71	5.79	4.92
90	32	90	135	45.0	2.053	2.200	2.205	2.049	0.482	0.633	0.7	0.761	8.71	6.03	5.16
90	32	90	136	46.0	2.045	2.200	2.205	2.041	0.481	0.628	0.7	0.765	8.71	6.29	5.42
90	32	90	137	47.0	2.036	2.200	2.205	2.031	0.480	0.624	0.7	0.769	8.71	6.58	5.71
90	32	90	138	48.0	2.025	2.200	2.205	2.021	0.478	0.620	0.7	0.772	8.71	6.87	6.00
90	32	90	139	49.0	2.014	2.200	2.205	2.010	0.477	0.615	0.7	0.775	8.71	7.19	6.32
90	32	90	140	50.0	2.002	2.200	2.205	1.997	0.475	0.611	0.7	0.778	8.71	7.55	6.68
90	32	90	141	51.0	1.988	2.200	2.205	1.983	0.474	0.607	0.7	0.780	8.71	7.94	7.07
90	32	90	142	52.0	1.973	2.200	2.205	1.968	0.472	0.603	0.7	0.783	8.71	8.35	7.48
90	32	90	143	53.0	1.955	2.200	2.205	1.951	0.470	0.599	0.7	0.784	8.71	8.83	7.96
90	32	90	144	54.0	1.936	2.200	2.205	1.932	0.467	0.595	0.7	0.785	8.71	9.35	8.48
90	32	90	145	55.0	1.915	2.200	2.205	1.910	0.464	0.591	0.7	0.786	8.71	9.93	9.05
90	32	90	146	56.0	1.890	2.200	2.205	1.886	0.461	0.587	0.7	0.785	8.71	10.58	9.71
90	32	90	147	57.0	1.863	2.200	2.205	1.859	0.458	0.584	0.7	0.784	8.71	11.28	10.41
90	32	90	148	58.0	1.831	2.200	2.205	1.827	0.453	0.580	0.7	0.782	8.71	12.14	11.26
90	32	90	149	59.0	1.795	2.200	2.205	1.791	0.448	0.576	0.7	0.778	8.71	13.07	12.20
90	32	90	150	60.0	1.753	2.200	2.205	1.749	0.442	0.573	0.7	0.773	8.71	14.17	13.30
90	32	90	151	61.0	1.703	2.200	2.205	1.699	0.435	0.569	0.7	0.765	8.71	15.46	14.59
90	32	90	152	62.0	1.644	2.200	2.205	1.640	0.427	0.566	0.7	0.754	8.71	17.02	16.14
90	32	90	153	63.0	1.570	2.200	2.205	1.566	0.415	0.563	0.7	0.739	8.71	18.92	18.05
90	32	90	154	64.0	1.483	2.200	2.205	1.479	0.402	0.559	0.7	0.718	8.71	21.16	20.29
90	32	90	155	65.0	1.366	2.200	2.205	1.362	0.382	0.556	0.7	0.687	8.71	24.18	23.31
90	32	90	156	66.0	1.218	2.200	2.205	1.215	0.355	0.553	0.7	0.643	8.71	27.96	27.09
90	32	90	157	67.0	1.016	2.200	2.205	1.013	0.315	0.550	0.7	0.573	8.71	33.15	32.28
90	32	90	158	68.0	0.721	2.200	2.205	0.718	0.246	0.547	0.7	0.450	8.71	40.71	39.84
90	32	90	159	69.0	0.253	2.200	2.205	0.250	0.102	0.544	0.7	0.188	8.71	52.72	51.85

Tabla 9.2. Datos de diseño termodinámico del TTA construido en el CIE.

En esta tabla se muestran los valores de los COP y de  $E_T$ . También en esta tabla se han identificado las condiciones del diseño original del TTA y las condiciones para el diseño optimado del absorbedor.

El valor de  $E_T$  se muestra en función de  $T_{AB} - T_{EV}$  ( $\Delta T$ ) en la figura 9.2 para las condiciones propuestas en la tabla 9.1.

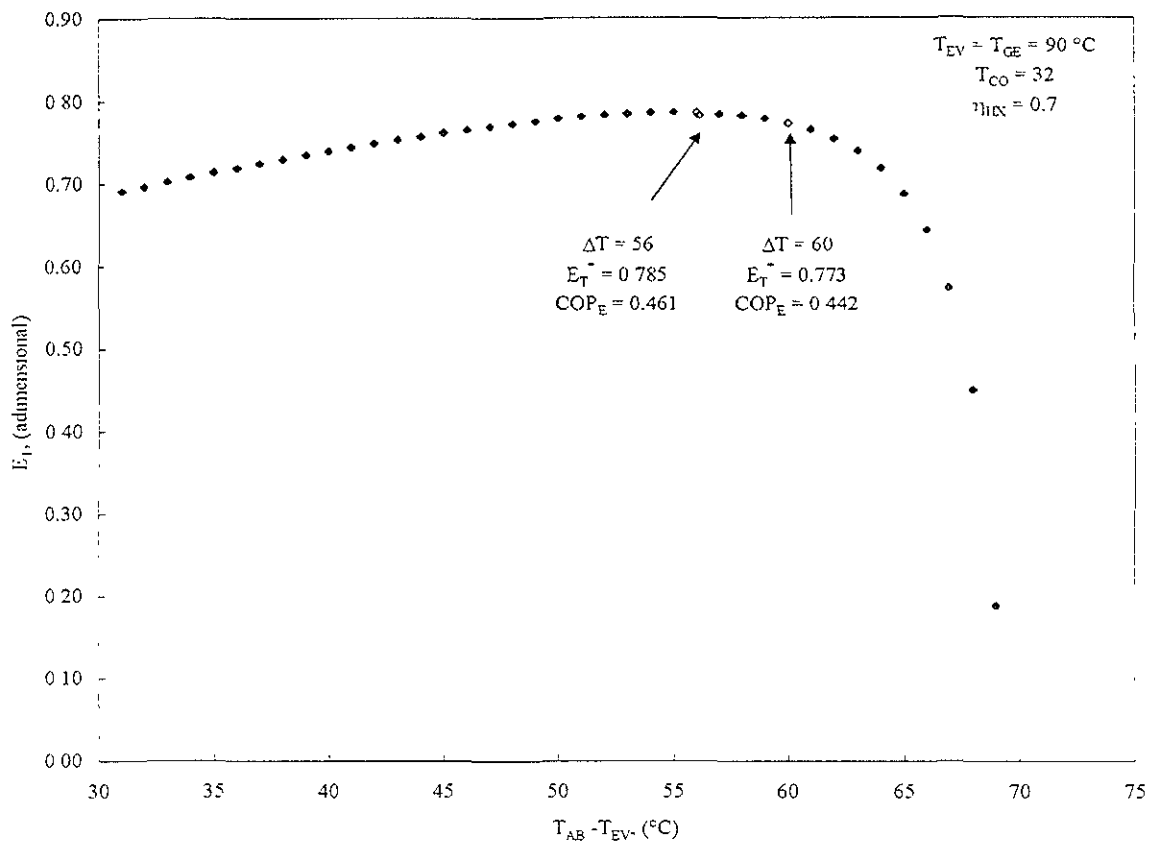


Figura 9.2. Eficiencia termodinámica en función del incremento de temperatura en un TTA.

En esta gráfica se puede observar que la diferencia entre los valores de  $E_T$  para las condiciones de diseño original y optimada se encuentran a una diferencia de  $4^{\circ}\text{C}$  en el incremento de temperatura y de 0.019 entre los  $COP_E$  (4%). En el caso que no se contara con el intercambiador de calor, la diferencia de incrementos de temperatura sería de  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  y de 0.034 entre los  $COP_E$  (7.5%).

A partir de estos datos se conoce  $E_T^*$ ,  $COP_E$ ,  $COP_C$ ,  $Q_{AB}$  y  $T_{AB}$  para el diseño optimado del absorbedor, de la siguiente forma:

De la ecuación 9.5, se obtiene que

$$E_T^* = 0.79 \quad (9.20)$$

para  $\Delta T = 56 \text{ }^\circ\text{C}$

a las condiciones de la tabla 9.1 ( $T_{EV} = 90^\circ\text{C}$ )

por lo que usando la ecuación 9.6 se tiene que  $T_{AB} = 146 \text{ }^\circ\text{C}$ ,

con estas temperaturas, usando la ecuación 9.2 se calcula:  $\text{COP}_C = 0.59$ .

Ahora, en base a la tabla 9.1: la potencia disponible  $Q_{EV} + Q_{GE} = 4000 \text{ W}$

Con las ecuaciones 9.3 y 9.20 se calcula que la potencia revalorizada es:

$$Q_{AB} = 1886 \text{ W}$$

que es 5 % mayor que la potencia calculada en el diseño original.

Con esta potencia y considerando (para ejemplo solamente) la corriente que recupera el calor en el diseño original (tabla 9.1), se tiene:

$$\Delta T_{ML} = 19.7 \text{ K}$$

este valor es 8.8 % menor que la mostrada en la tabla 9.1.

Finalmente, considerando que las propiedades de transporte para la mezcla no varía considerablemente de  $146 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , se podría considerar el uso del mismo  $U_o$ , quedando así dimensionada el área de intercambio del absorbedor optimado, usando la ecuación 9.16:

$$A = (1886 \text{ W}) / (U_o) / (19.7 \text{ K}) \quad (9.21)$$

$$A = 0.45 \text{ m}^2$$

que es mayor 13 % a la propuesta inicialmente en la tabla 9.1.

## DISEÑO OPTIMADO DE ABSORBEDOR DE PELÍCULA DESCENDENTE

A partir de la potencia calculada de absorción y las condiciones de presión, temperatura y concentración a las que se lleva a cabo, se pueden calcular el área de transferencia de calor necesaria para que este proceso se lleve a cabo. Mediante el cálculo del  $U_o$ .

En el caso que se conozca el valor del  $U_o$ , las dimensiones del absorbedor se pueden determinar en función de la longitud y dimensiones de la tubería empleada.

Para el caso específico de las tuberías estudiadas en el capítulo previo, se conocen los valores de  $U_o$  para ellas [Parduvicki, 2001], por lo cual se puede calcular la longitud usando el concepto de área efectiva específica, que se define como:

$$A_f = \text{area de contacto} / \text{longitud de tubería} = A / L \quad (9.21)$$

Para las tuberías aletadas se calcularon las áreas particulares para el intercambio de calor en el proceso de absorción de vapor en una película descendente de Carrol – agua, en la parte exterior de haces de tubos horizontales, estas características se muestran en la tabla 9.3.

Tubería Tipo	$U_o$ W/m <sup>2</sup> K	$A_f$ m <sup>2</sup> /m de tubería
Aletada	647	4.62E-2
Microaletada	483	6.06E-2

Tabla 9.3. Características particulares para transferencia de calor en tuberías aletadas (ver especificaciones y dimensiones en el capítulo anterior)

En el caso mostrado, utilizando la ecuación 9.21, se tiene, para tubería aletada

$$A = (1886 \text{ W}) / (647 \text{ W/m}^2\text{K}) / (19.7 \text{ K})$$

$$A_{\text{aletada}} = 0.15 \text{ m}^2$$

Utilizando la ecuación 9.21, la longitud de tubería es:

$$L_{\text{aletada}} = (0.15 \text{ m}^2) / (4.62\text{E-}2 \text{ m}^2/\text{m de tubería})$$

$L_{\text{aletada}} = 3.24$  m de tubería.

Similarmente para tubería microaletada (se sugiere aumentar la longitud de aleta):

$$A = (1886 \text{ W}) / (483 \text{ W/m}^2\text{K}) / (19.7 \text{ K})$$

$$A_{\text{microaletada}} = 0.20 \text{ m}^2$$

$$L_{\text{microaletada}} = (0.20 \text{ m}^2) / (6.06\text{E-}2 \text{ m}^2/\text{m de tubería})$$

$L_{\text{microaletada}} = 3.3$  m de tubería.

Con estos resultados y de acuerdo a los comportamientos térmicos mostrados en el capítulo anterior, la distribución de los gradientes de temperatura a lo largo del absorbedor muestran que es conveniente retornar en un paso inmediato superior al fluido que retira el calor. Este comportamiento también se mostró en la solución de un modelo numérico presentado [Kirby, 1994].

A partir de estos datos, sugiriendo tubería de acero inoxidable en un arreglo cuadrado (para reproducir los efectos mostrados en la experimentación del capítulo anterior) se tendrían 3 u – es, distribuidas en una coraza cilíndrica de 60 cm de largo. En una coraza horizontal con diámetro interior de 16.3 cm (especificaciones similares a las corazas descritas en el capítulo 3).

Las figuras 9.3 y 9.4 muestran dos posibles configuraciones para el diseño optimado de absorbedores de película descendente con absorción en la parte exterior de la tubería (con superficie extendida). La película, según el estudio del capítulo anterior se forma cuando la distribución inicial de gotas permite que una gota moje más de una aleta, por lo cual un tubo perforado en su parte inferior puede formar dicho goteo y por lo tanto una película en el siguiente tubo y el mismo proceso se llevará a cabo en los siguientes tubos inferiores.

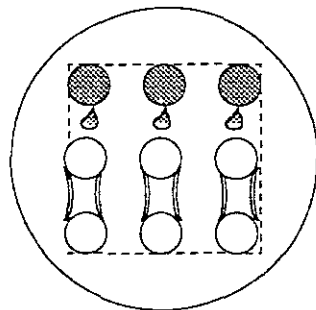




Figura 9.3. Distribución de tubería en un absorbedor horizontal optimado.

La figura 9.3 muestra una configuración con pocos tubos y longitud relativamente grande. Esta distribución puede ser repetida en otras configuraciones (con un retorno) con un distribuidor inicial de goteo en superficie micro – aletada.

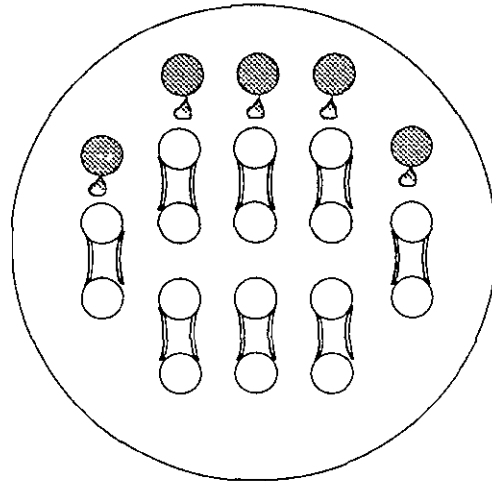


Figura 9.4. Distribución de tubería en absorbedor horizontal optimado robusto.

En la figura 9.4 se muestra una configuración en arreglo cuadrado con mayor número de tubos manteniendo la configuración de tubería con retorno con la ventaja de tener tres diferencias de temperaturas en las tres columnas centrales en lugar de dos. En esta configuración (16 tubos con retorno) se tendrá una coraza de 20 cm de longitud con un diámetro interno de 23 cm.

Para comparar estas dos configuraciones se han obtenido las dimensiones de coraza y se muestran en la tabla 9.4.

Número de tubos	diámetro de tapas (m)	longitud de coraza (m)	área exterior (m <sup>2</sup> )	volumen interno (m <sup>3</sup> )
6	0.16	0.6	0.342	0.012
16	0.23	0.2	0.228	0.008

Tabla 9.4. Dimensiones de dos configuraciones de un absorbedor optimado.

En la tabla 9.4 se presentan las dimensiones de dos absorbedores optimados con los estudios realizados. En esta tabla se muestra que con 6 tubos se obtiene un volumen mayor que con una configuración de 16 tubos, así como un área expuesta mayor.

Con lo anterior se concluye que para disminuir las pérdidas por radiación, se puede reducir el área exterior de la coraza aumentando el número de tubos y reduciendo simultáneamente la longitud de la coraza.

## **CONCLUSIONES**

En este capítulo se presenta un criterio de optimación termodinámica para el diseño de absorbedores de película descendente. El cual está basado en la eficiencia termodinámica calculada a partir de simulaciones asistidas por computadora para condiciones de operación de transformadores térmicos por absorción de una etapa.

Para el diseño optimado se consideraron los estudios experimentales de películas descendentes, poniendo especial atención en la distribución de temperaturas, conduciendo esto a la propuesta de un retorno del fluido que circula dentro de los tubos.

Cabe aclarar que el fluido que obtendrá el calor producto de la absorción circulará inicialmente por la parte superior de la coraza y finalizará su recorrido en la parte inferior, en un número de pasos pares.

Finalmente, se presenta el diseño optimado de un absorbedor con formación controlada de película descendente en la superficie exterior de haces de tubos horizontales con superficies extendidas (comerciales), a fin de obtener la mayor cantidad de energía revalorizada a un valor máximo de temperatura.

## **REFERENCIAS**

**Abrahamsson K**, Jernqvist A & Aly G, Thermodynamic analysis of absorption Heat Cycles, International Absorption Heat Pump Conference, AES-Vol. 31, edited by ASME, pp 375 –383, 1993

**Greiter I**, Wagner A, Weiss V & Alefeld G, Experimental investigation of heat and mass transfer in a horizontal – tube falling – film absorber with aqueous solutions, AES – 31, International Absorption Heat Pump Conference, pp 225 – 232, ASME 1993

**Grossman G** & Childs K W, Computer simulation of a lithium bromide – water absorption heat pump for temperature boosting, ASHRAE Transaction, Vol. 89, pp 240 – 248, 1983

- Grossman G**, Simultaneous heat and mass transfer in film absorption under laminar flow, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol 26, No3, pp 357 – 371, 1983
- Grossman G**, Heath M T, Simultaneous heat and mass transfer in absorption of gases in turbulent liquid film, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 27, No. 12, pp 2365 – 2376, 1987
- Hoffmann L**, Greiter I, Wagner A, Weiss V & Alefeld G, Experimental investigation of heat transfer in a horizontal tube falling film absorber with aqueous solutions of LiBr with and without surfactants, *Int. J. Refrig.*, Vol. 19, No. 5, pp 331 – 341, 1996
- Jernqvist A** & Kockum H, Simulation of falling film absorbers and generators, *Procc. of Int. Ab-Sorption heat pump conference '96*, Montreal Canada, pp 311 – 318, 1996
- Kirby M J** & Perez – Blanco H, A Design model for horizontal tube water / lithium bromide absorbers, AES – 32, Heat Pump and Refrigeration Systems Design, Analysis and Applications, pp 1 – 10, ASME 1994
- Lee S** & Tsui Y P, Succeed at Gas/Liquid Contacting, *Chemical Engineering Progress*, Vol 95, No. 7, AIChE – July 1999.
- Lu Z**, Li D, Li S, Yu-Chi B, A semi-empirical model of the falling film absorption outside horizontal tubes, *Procc. of Int. Ab-Sorption heat pump conference '96*, Montreal Canada, pp 473 – 480, 1996
- Matsuda A**, Choi K H, Hada K & Kawamura T, Effect of pressure and concentration on performance of a vertical falling – film type of absorber and generator using lithium bromide aqueous solutions, *Int. J. Refrig.*, Vol. 17, No. 8, pp 538 – 542, 1994
- Miller W A** & Perez – Blanco H, Vertical – tube aqueous LiBr falling film absorption using advanced surfaces, AES – 31, International Absorption Heat Pump Conference, pp 185 – 202, ASME 1993
- Nomura T**, Nishimura N, Wei S, Yamaguchi S & Kawakami R, Heat and mass transfer mechanism in the absorber of water / LiBr conventional absorption refrigerator: experimental examination by visualized model, AES – 31, International Absorption Heat Pump Conference, pp 203 – 208, ASME 1993
- Pardubicki J**, Gerente General de LAJ Internacional, Comunicación personal, México, DF., marzo de 2001
- Patnaik V** & Perez – Blanco H, A counterflow heat exchanger analysis for the design of falling – film absorbers, AES – 31, International Absorption Heat Pump Conference, pp 209 – 216, ASME 1993
- Perry R H** & Green D W, *Chemical Engineering Handbook*, 7<sup>th</sup> ed., Mc Graw Hill, N. Y., U.S.A., 1997

**Serpente C P**, Kernen M, Seewald J S & Perez – Blanco H, A 2 kW lithium bromide absorption machine with heat recovery and recirculation for novel fluid testing, AES – 31, International Absorption Heat Pump Conference, pp 65 – 71, ASME 1993

**Westerlund L & Dahl J**, Absorbers in the open absorption system, Applied Energy, Vol 48, pp 33 – 49, 1994

**Yigit A**, A numerical study of heat and mass transfer in falling film absorber, Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol 26, No “, pp 269 – 278, 1999

## Capítulo 10.- ESTUDIO TEÓRICO DEL ACOPLAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA A UN ESTANQUE SOLAR

### *INTRODUCCIÓN*

En este capítulo se muestra el resultado del acoplamiento teórico de un estanque solar con un transformador térmico por absorción de una etapa utilizando la mezcla Carrol – agua.

En el siguiente artículo se muestra esquemáticamente a un transformador térmico de una etapa operando con calor a temperaturas menores a 80 °C, simulando calor proveniente de un estanque solar.

Se describe el ciclo termodinámico de un transformador térmico así como las consideraciones para definir el incremento de temperatura ( $\Delta T$ ), la energía útil ( $Q_U$ ) y el coeficiente de operación (COP).

Los resultados se muestran en forma de gráficos de las siguientes relaciones:  $\Delta T$  en función de la concentración en el absorbedor ( $X_{AB}$ ), COP y  $Q_U$  en función de la temperatura en el generador ( $T_{GE}$ ) y del absorbedor ( $T_{AB}$ ).

Este artículo demuestra en forma teórica que se puede acoplar un transformador térmico por absorción de una etapa con un estanque solar con temperaturas superiores a 80 °C y obtener incrementos máximos de 52.5°C, por lo que el calor útil se dispondría a 128 °C con un COP entre 0.08 y 0.33.

Este artículo fue enviado para su presentación en la XXV Semana Nacional de Energía Solar, a celebrarse en San Luis Potosí, del 1 al 5 de octubre de 2001.

# Evaluación experimental de un transformador térmico operando con la mezcla Carrol - agua acoplado a un estanque solar

R. J. Romero & W. Rivera

Centro de Investigación Energía - UNAM, apartado postal 34, 62580  
Temixco, Mor., México.

## Resumen

Se operó un transformador térmico de una etapa (TTA) con la mezcla Carrol - agua para demostrar la viabilidad del uso de estos sistemas para aumentar la temperatura del calor obtenida de los estanques solares. Se utilizaron resistencias eléctricas para simular el calor de un estanque solar a temperaturas no mayores de 80°C. Se muestran resultados en forma gráfica del incremento de temperatura y el coeficientes de operación para el TTA en función de las temperaturas y concentraciones de la solución. El máximo incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) que se obtuvo fue de 52.5 °C y la temperatura máxima del calor útil ( $Q_U$ ) producido por el TTA fue de 128°C. El máximo coeficiente del operación del TTA fue de 0.33.

## Introducción

Los estanques solares son medios baratos de coleccion y almacenamiento de energía solar a temperaturas menores de 90°C. Estos estanques constituyen una fuente de calor de temperatura baja con un gran potencial para múltiples aplicaciones. Tabor informó el estado del arte de estanques solares e incluyó conceptos básicos, discusión de problemas técnicos y sus soluciones, historia y experiencias, aplicaciones y costos, así como una perspectiva para el futuro [1]. Desde entonces, se han publicado muchos artículos sobre el estudio teórico y experimental de estanques solares. Debido a que por sus propias características, los estanques solares no pueden alcanzar temperaturas, mayores a 90°C, se les han limitado sus posibles aplicaciones. A la fecha, la aplicación más común de estanques solares ha estado en la generación de electricidad por medio de un ciclo de Rankine que opera entre las temperaturas altas y bajas del estanque. Gommed y Grossman propusieron el uso de TTA para aumentar el nivel de temperatura de estanques solares a un

niveles más altos [2]. Ellos analizaron la viabilidad teórica para usar el calor de los estanques solares y generar vapor con una eficiencia relativamente alta por el uso de TTA.

Recientemente Rivera hizo una simulación del acoplamiento de un TTA a un estanque solar operando con la mezcla bromuro de litio – agua [4] obteniéndose incrementos hasta de 40 °C con coeficientes de operación de hasta 0.17. Sin embargo, dicho estudio se realizó en un equipo de vidrio de borosilicato, por lo cual existieron limitantes en su operación, así como en la mezcla utilizada, que es bromuro de litio y presenta cristalización.

Los TTA son dispositivos que pueden utilizarse para aumentar la temperatura de calor de mediana temperatura a un nivel útil. Típicamente, la mitad del calor aumenta su temperatura, aunque el resto se descarga a una temperatura más baja. Estos sistemas se han usado en los últimos años para recuperar energía de procesos industriales [3]. Sin embargo, los TTA pueden usarse para aumentar el nivel de temperatura de energías como la geotérmica y la solar.

La figura 10.1 muestra un diagrama esquemático del acoplamiento de un TTA a un estanque solar.

Para demostrar la viabilidad de los TTA para aumentar la temperatura del calor producido por los estanques solares, se construyó un TTA en acero inoxidable 316. Este TTA fue operado en las instalaciones del Cnetro de Investigación en Energía de la UNAM en Cuernavaca, Mor. México. El sistema operó con la mezcla Carrol - agua. Se usaron resistencias eléctricas para simular una fuente de calor a temperaturas menores a 80°C como energía principal del TTA. En este artículo se presenta la evaluación experimental de un TTA operando con esta mezcla. Se trazan gráficas del incremento de temperatura, el calor útil y el coeficiente de operación para el TTA en función de las temperaturas y concentraciones de la solución.

### **Ciclo termodinámico**

Un TTA consiste de un evaporador, un condensador, un generador, un absorbedor y un economizador. La figura 10.2 muestra a un TTA en un eje de temperatura contra presión. Una cantidad de calor tomada del estanque solar  $Q_{GE}$  se agrega a una temperatura  $T_{GE}$ . El generador vaporiza al fluido del trabajo de la solución que contiene una concentración alta de absorbente. El fluido de trabajo vaporizado pasa al condensador entregando una cantidad de

calor  $Q_{CO}$  a una temperatura  $T_{CO}$ . El líquido que sale del condensador se bombea al evaporador donde se evapora usando una cantidad de calor tomada del estanque solar  $Q_{EV}$  a una temperatura  $T_{EV}$ . Luego, el fluido de trabajo vaporizado pasa al absorbedor donde se absorbe por la solución de concentrada que viene del generador y entregando calor  $Q_{AB}$  a una temperatura alta  $T_{AB}$ . Finalmente, la solución diluida se regresa al generador precalentando la solución concentrada en el economizador antes de repetir el ciclo de nuevo.

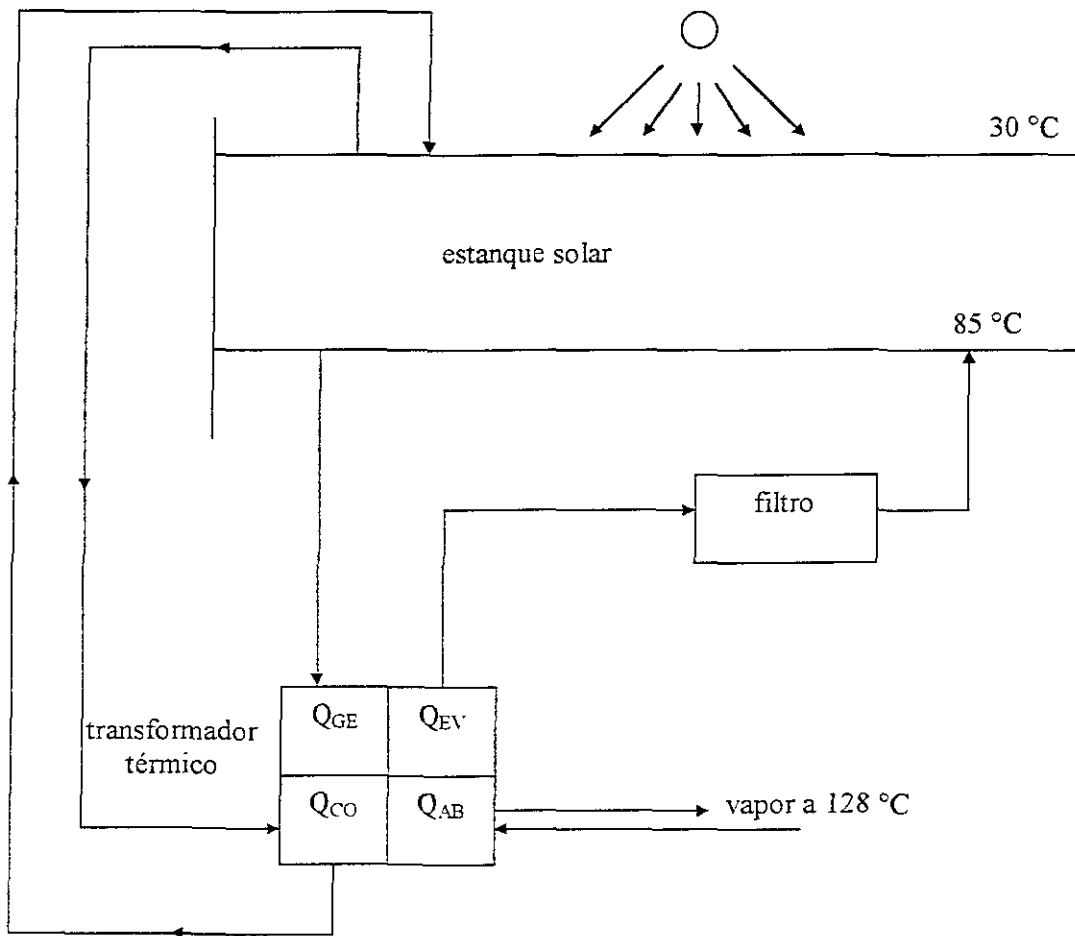


Figura 10.1. Diagrama esquemático del acoplamiento de un TTA a un estanque solar.



## Descripción del equipo

A fin de resolver los problemas presentados en el estudio realizado por Rivera [4] se propone el uso de la mezcla Carrol – agua para resolver el problema de la cristalización [5] y se diseñó y construyó un TTA metálico en la UNAM [6-7] para resolver los problemas de la operación del equipo utilizado y que fue fabricado en vidrio. Los componentes del TTA propuesto fueron contruidos totalmente en acero inoxidable 316 e interconectados con mangueras para bajas presiones y altas temperaturas. Este equipo se esquematiza en la figura 10.3.

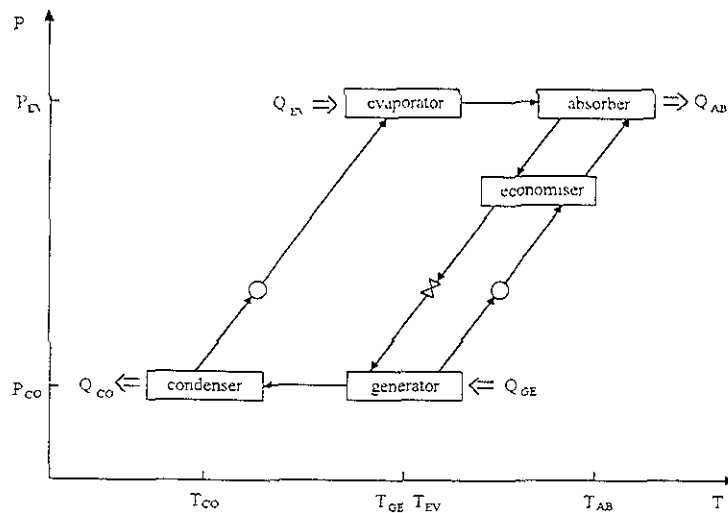


Figura 10.2. Diagrama esquemático de un TTA en ejes presión-temperatura.

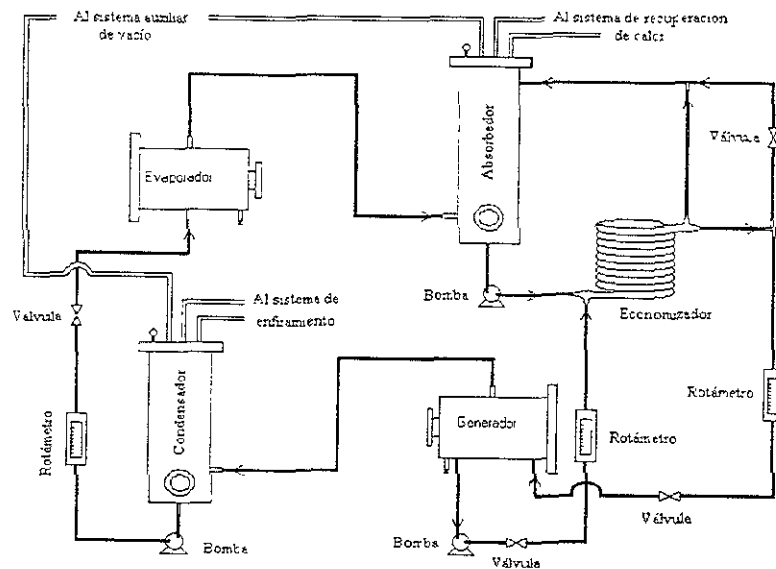


Figura 10.3. Diagrama esquemático del TTA acoplado.

El generador y evaporador tienen resistencias eléctricas que pueden simular el calor de un estanque solar hasta de 2 kW en cada componente. El condensador tiene un serpentín interno por donde circula agua de enfriamiento, con una capacidad de 2.2 kW.

El absorbedor tiene un serpentín acoplado a un sistema de recuperación de calor con capacidad de 1.8 kW. Todos los componentes fueron aislados térmicamente e instrumentados para obtener mediciones instantáneas de presión y temperatura.

Se conectaron tres sistemas auxiliares al TTA:

- (i) sistema de enfriamiento,
- (ii) sistema de vacío, y
- (iii) sistema de recuperación de calor.

Estos sistemas sirvieron para condensar y vaporizar el fluido del trabajo, para recuperar calor entregado por el absorbedor y para generar vacío en los componentes a fin de poder operar a las temperaturas presentes en un estanque solar.

Se usaron bombas con variadores de velocidad de 75 W para bombear el fluido de trabajo en el sistema. El calor del estanque solar fue simulado y controlado a través de dos variadores de voltaje, cada uno con un poder del máximo de 1250 W. Las tuberías para el sistema de vacío están fabricadas en cobre y se unen a los componentes por medio de manguera rígida. Los sistemas auxiliares de enfriamiento y de recuperación de calor están conectados al equipo por medio de mangueras para baja y alta presión y temperatura respectivamente.

### **Instrumentación**

La evaluación experimental del TTA se basa en datos derivados de las pruebas. Las temperaturas, presiones, flujos, concentraciones y potencias operadas fueron moderadas. Se usaron termopares tipo T con un error del máximo de 0.4 % para temperaturas mayor que 0°C. Se inundaron los termopozos con aceite para facilitar la transferencia de calor y tener confiabilidad en las lecturas. Los termopares se ubicaron en el fondo y domo de cada componente a fin de determinar las temperaturas de líquido y vapor

dentro de los componentes. Se utilizaron dos vacuomanómetros para determinar la presión en los componentes, con alta precisión y divisiones de 1 inHg. Se instalaron cinco rotámetros en el sistema para medir los flujos de solución, agua y aceite, cada uno de ellos adecuados a los flujos que circulan. Las ecuaciones polinómicas para los rotámetros tienen coeficientes de las correlaciones mayor que 0.996. Los ajustes en temperaturas y concentraciones se hicieron para las condiciones de operación estudiadas a fin de ser representativas. Se derivaron las concentraciones de las soluciones en función de las lecturas del índice de refracción en un refractómetro de tipo Abbe para obtener una curva de calibración de concentración – índice de refracción adecuada.

### Consideraciones termodinámicas

En función del proceso mostrado en la figura 10.2 y de balances de materia y energía para los componentes principales, se obtuvieron las ecuaciones siguientes para los cálculos del incremento de temperatura, calor útil y coeficiente de operación para un TTA.

El incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) para el sistema es

$$\Delta T = T_{OIL,LE} - T_{EV,TO} \quad (1)$$

El calor útil entregado del absorbente es,

$$Q_U = M_{OIL} C_{P_{OIL}} (T_{OIL,LE} - T_{OIL,EV}) \quad (2)$$

Entonces, el coeficiente de operación externo puede estimarse como,

$$COP = Q_U / (Q_{GE} + Q_{EV} + WP_{WF} + WP_{GE}) \quad (3)$$

donde  $Q_{GE}$  y  $Q_{EV}$  son la potencia proporcionado por el estanque solar al generador y al evaporador respectivamente. El trabajo de las bombas podría despreciarse porque es prácticamente dos órdenes de magnitud más pequeño que el calor proporcionado o entregado por los componentes.

### Resultados experimentales

Las figuras 10.4 y 10.5 muestran la variaciones del coeficiente de operación en función de las concentraciones de la solución diluida y concentrada respectivamente para un TTA operando con la mezcla Carrol – agua. Se nota que los coeficientes de operación aumentan con un incremento en la concentración de la solución. También, puede verse que el valor máximo del incremento de coeficiente de operación fue de 0.35 y se obtuvo a la concentración más alta de la solución diluida.

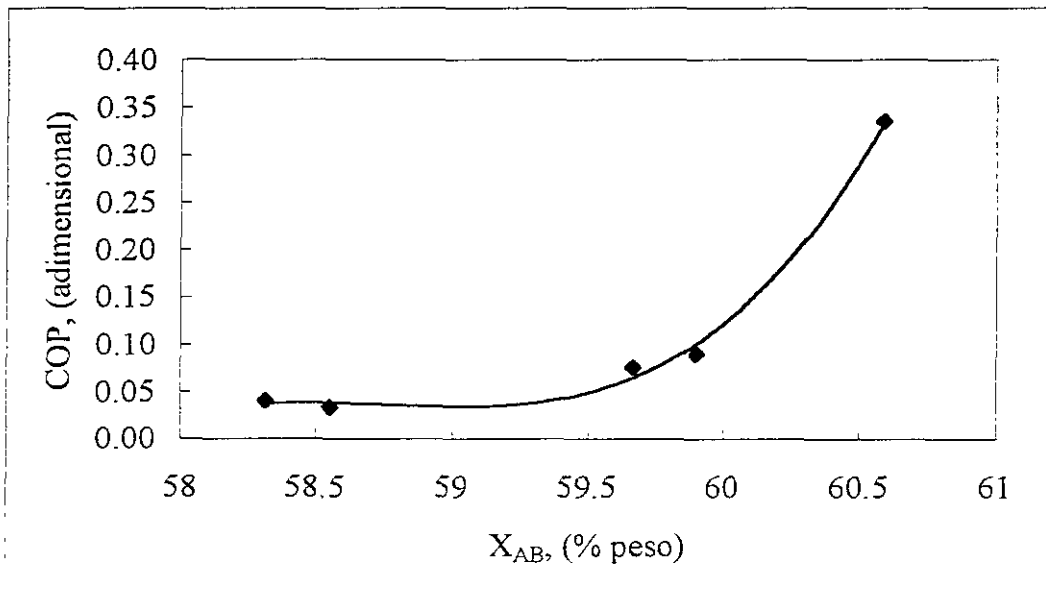


Figura 10.4. Incremento de temperatura en función de la concentración de solución diluida para un TTA operando con la mezcla Carrol – agua.

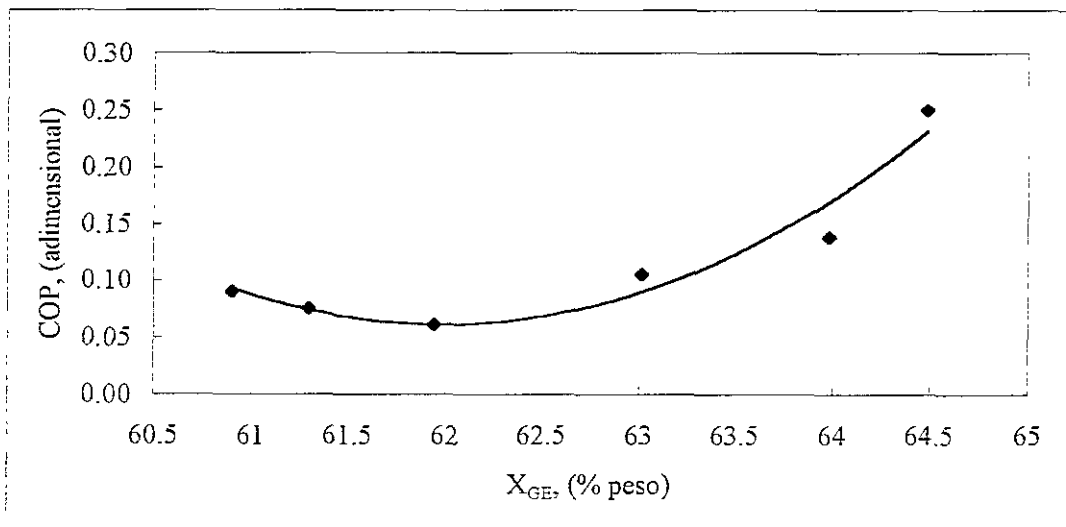


Figura 10.5. Incremento de temperatura en función de la concentración de solución concentrada para un TTA operando con la mezcla Carrol – agua.

En la figura 10.6 se muestra al coeficiente de operación en función de la temperatura del generador del TTA. En esta gráfica se muestra que el coeficiente de operación aumenta conforme aumenta la temperatura del generador del TTA, puede operar hasta con un COP = 0.33 a una temperatura de 77 °C.

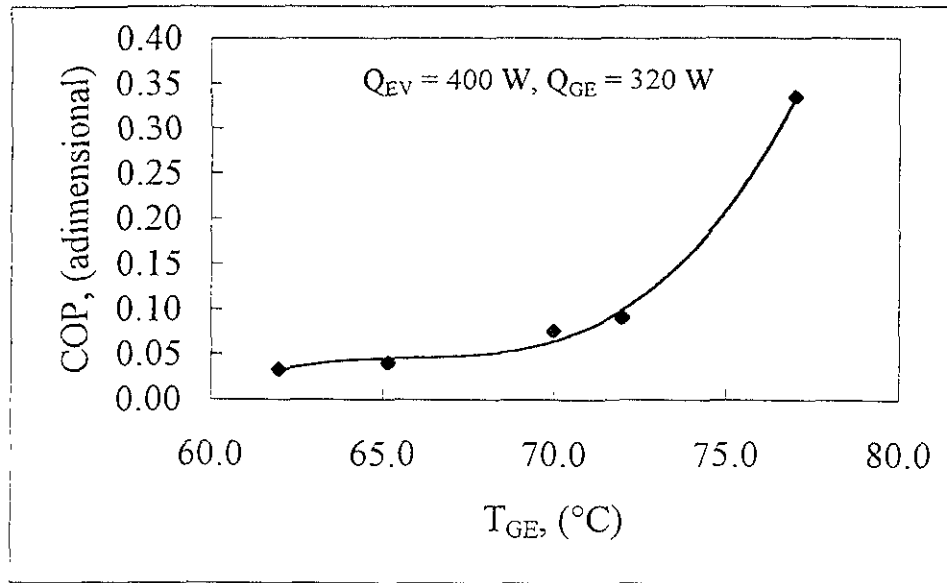


Figura 10.6. Coeficiente de operación en función de la temperatura del generador del TTA.

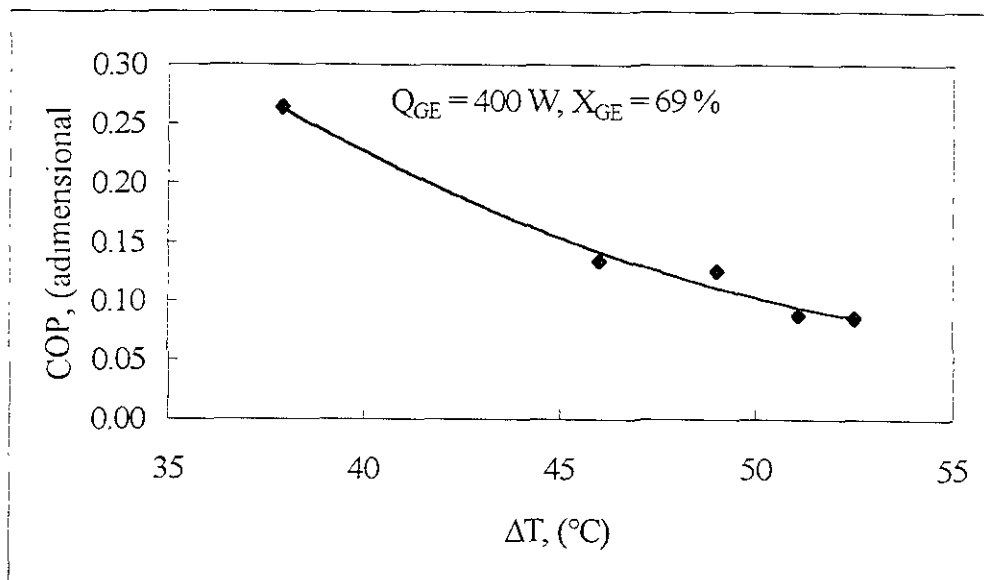


Figura 10.7. Coeficiente de operación en función del incremento de temperatura obtenido en un TTA acoplado a un estanque solar.

La figura 10.7 muestra el coeficiente de operación en función del incremento de temperatura para una concentración en el generador de 69 % en peso de Carrol en la solución. En esta figura se muestra que el máximo coeficiente de temperatura de 0.26 se obtiene con un incremento de temperatura de 38 °C y que el máximo incremento de temperatura de 52.5 °C se obtiene a un coeficiente de operación de 0.09. Mostrando claramente que un valor mayor del incremento de operación implica una disminución del coeficiente de operación.

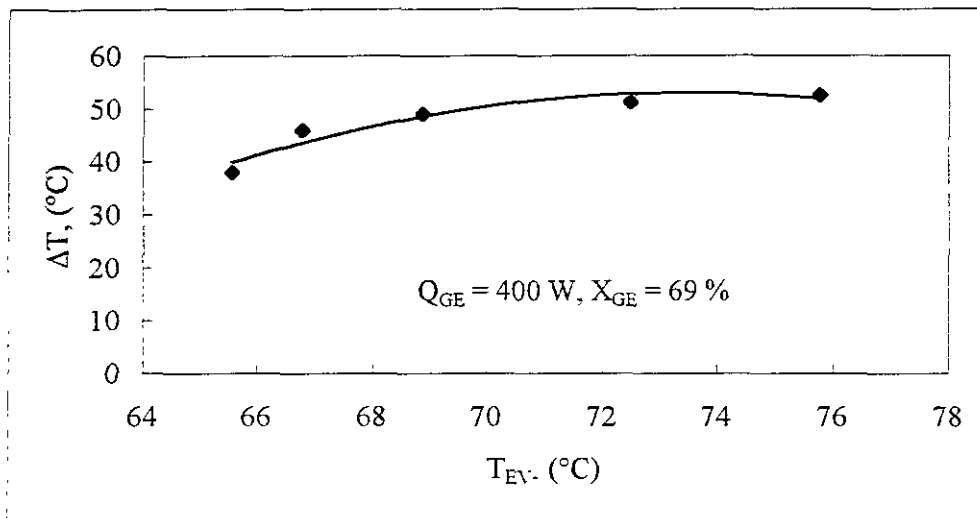


Figura 10.8. Incremento de temperatura en función de la temperatura del evaporador de un TTA.

La figura 10.8 muestra el incremento de temperatura en función de la temperatura del evaporador del TTA. En esta figura se puede apreciar que el  $\Delta T$  aumenta conforme aumenta la temperatura del evaporador del TTA acoplado al estanque solar. Se aprecia que el máximo  $\Delta T$  se obtiene a la mayor temperatura que pueda aportar el estanque solar.

### Conclusiones

El incremento de temperatura obtenido en un TTA metálico aumenta su valor al incrementar la concentración de la soluciones y al elevar la temperatura del estanque solar. El COP disminuye al aumentar  $\Delta T$  pero aumenta con las temperaturas del evaporador y del generador. El COP se mantuvo en el rango 0.08 a 0.33 con la mezcla Carrol - agua. Estos valores son más bajos que los esperados porque el TTA no operó a la capacidad de diseño. El máximo  $\Delta T$

fue de 52.5 °C. La máxima temperatura alcanzada por el TTA fue de 128°C. Con los resultados obtenidos se demostró que el uso de TTA con la mezcla Carrol – agua es ventajosa con respecto a la operación con bromuro de litio – agua, obteniéndose un  $\Delta T$  8°C mayor y hasta el doble del COP.

### **Agradecimientos**

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (proyecto número 25453-A y beca para estudios de doctorado para Rosenberg J Romero D) por patrocinar parcialmente la investigación.

### **Referencias**

- [1] H. Tabor. *Energía solar* (1981) 181.
- [2] K. Gommed y G. Grossman. *Energía solar* (1988) 81.
- [3] K. Mashimo. Proc. IEA Heat la Bomba Conf., Chelseia, Michigan, E.E.U.U. (1987) pág. 271.
- [4] W. Rivera & R J Romero, *Solar Energy Materials & solar Cells*, 63 (4) (2000) 413
- [5] R C Reimann and W J Biermann, Final Report, Prepared for the USA Department of Energy under contract EG-77-C-03-1587, Carrier Corporation, October, 1984.
- [6] R J Romero, Tesis de Maestría, UNAM, Mexico (1996).
- [7] W. Rivera. Ph. D. Thesis, Salford University, UK (1996).

## **Capítulo 11.- ESTUDIO TEÓRICO DEL ACOPLAMIENTO DE SISTEMAS DE ABSORCIÓN A UN ESQUEMA DE REFINACIÓN DE PETRÓLEO**

### ***INTRODUCCIÓN***

En este capítulo se muestra la posible integración de transformadores térmicos en un esquema de refinación de petróleo, ya sea para un escenario con coeficiente de operación (COP) bajo y temperatura de absorción ( $T_{AB}$ ) alta o el escenario con un COP alto y  $T_{AB}$  baja.

### ***DESCRIPCIÓN DEL ESQUEMA***

Los datos mostrados en este esquema de refinación fueron obtenidos a través del grupo de exergía, de la gerencia de investigación aplicada de procesos del instituto mexicano del petróleo (IMP), por medio del “Fondo de apoyo al desarrollo de proyectos de investigación básica y tecnológica en colaboración con las Instituciones de Educación Superior” (FIES) cuyos responsables fueron el Dr. Jaime Cervantes de Gortari, por parte de la U. N. A. M. y el Dr. Ricardo Rivero Rodríguez por parte del IMP.

Este proyecto tuvo como objetivo principal la valoración mediante métodos avanzados de la termodinámica aplicada, la potenciabilidad del empleo de las bombas de calor por absorción en el proceso de destilación del petróleo, aprovechando el calor de desecho en diversos intervalos de temperatura.

En este esquema de refinación de petróleo se ha considerado a la planta Tula – Sector I, en dónde se encuentran diversos intercambiadores de calor que disipan energía a diversos niveles de temperatura y diversas potencias. Estos equipos cuentan con corrientes para enfriamiento cercanas a los mismos, por lo cual existen al menos 4 niveles definidos de temperatura: Temperaturas de entrada y salida para las corrientes calientes y frías.

Este esquema se muestra en la tabla 11.1, con la nomenclatura EA para intercambiadores de calor de recuperación y EC para enfriadores, acompañados de un número que los identifica dentro del esquema de refinación de dicha planta.



Equipo	Corriente fría		Corriente caliente		Carga térmica
	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>s</sub> (°C)	Q (Mcal/hr)
EA-109	32	46.1	52.7	43.3	255
EA-110	32	45.6	54.3	43.4	575.2
EA-115	32	46.1	143.8	37.5	25685.3
EA-116	32	46.1	162.3	40.5	48531
EB-101	32	46.1			11373
EA-201	32	46.1	85	48.9	2182
EA-203	32	46.9	228.3	223.7	976.4
PAQUETE DE VACIO	32	46.1	212.6	54.4	8450.1
EA-802	32	42	147	62	8090.5
EA-803	32	46	195	49	3557.7
EA-805	32	38	89	56	865.6
EA-807	32	51	140.7	38	8086.6
EA-808	32	35	49	38	17.7
EA-404	32	46	111	43	6755.7
EA-406	32	33	106	38	211.3
EA-407	32	34	95	50	657.4
EA-408	32	33	72	60	1054.3
EA-502	32	38	55	38	3113.9
EA-504	32	42	61	41	1147.3
EA-505	32	33	32	26	136.6
EA-508	32	37	83	38	342.8
EC-501	16	55	149	50	24349.3
EC-502	16	27	158	61	2258.2
EC-503	16	83	158	61	6902.6
EA-1C	32	46	161	41	42401
EA-9C	32	46	54	41	4272.9
EA-12C	32	46	146	41	4753.3
EA-15C	32	46	58	42	10745.4
EA-17C	32	46	140	38	11908.4
EA-19C	32	46	46	44	5341.2
EA-20C	32	46	96	38	1092.3
EA-22C	32	46	44	38	158.1
EA-27C	32	46	73	41	2123.6
EC-4C	16	43	232	49	2842
EC-7C	16	43	203	66	1339.4
EA-101C	24	35	188	38	8354
CONDENSADOR DE SUPERFICIE	31	43.6	52.3	46	27830.3
EC-C02401	15.6	116.6	193	48.3	26156.4
Total					314893.8

Tabla 11.1. Datos de corrientes de la planta de refinación Tula – Sector I.

## CONSIDERACIONES DEL ACOPLAMIENTO

Para realizar el cálculo se han simulado todas las condiciones para acoplarse a un transformador térmico de una etapa, por lo que no se simularon los 38 equipos con la mezcla bromuro de litio y una efectividad ( $\eta$ ) del intercambiador de calor nula, para asegurar que en el escenario de un COP mínimo para las condiciones específicas de cada equipo (valor bajo), este valor sea realmente representativo, ya que al incluir un intercambiador de calor [Rivera, 1990; George, 1989] el valor original del COP aumenta.

Para cada equipo se han calculado todos los valores  $T_{AB}$  y COP que son posibles y se muestran en el apéndice C. Algunos equipos no pueden ser acoplados a un transformador térmico principalmente por la causa de cristalización del bromuro de litio dentro del equipo, que a su vez, se deben a las condiciones de operación (temperaturas y presiones) de dichos equipos.

Existen para cada equipo acoplable una serie de datos (ver Apéndice C) en los cuales se muestran las condiciones de operación adecuadas en función de las temperaturas presentes en cada equipo.

$T_{GE}$	$T_{CO}$	$T_{EV}$	$T_{AB}$	$P_{CO}$	$P_{EV}$	$X_A$	$X_{GE}$	$\Delta T$	FR	$\frac{Q_{GE}}{Q_{EV}}$	$\frac{Q_{CO}}{Q_{EV}}$	$\frac{Q_{AB}}{Q_{EV}}$	$COP_E$	$COP_C$	$E_{th}$
(°C)				(mmHg)		$X_B$ (%w)		(°C)	(adimensional)						

Estos valores presentan dos escenarios, el escenario 1 muestra el máximo valor de COP para el valor mínimo de  $T_{AB}$  y el escenario 2 muestra el mínimo valor de COP corresponde al valor máximo de  $T_{AB}$ . Estos son los datos que se muestran en la tabla 11.2, así como una estimación de la cantidad de energía revalorizada a la temperatura indicada ( $T_{AB}$  útil).

En esta tabla se resumen los 15 acoplamientos de los 38 equipos existentes y que reflejan en el escenario 1 una revalorización de 29525.4 Mcal/hr y en el segundo escenario una revalorización de 8584.9 Mcal/hr, que corresponden en términos reales al 47.9 % y 13.9 % de la energía suministrada a 15 transformadores térmicos en los equipos listados de la tabla 11.2. Y que representan el 9.4 % y 2.7% de la energía total de la refinería TULA – sector 1.

	Corriente fría		Corriente caliente		Carga Térmica (Mcal/hr)	Escenario 1		Escenario 2		Condición T <sub>CO</sub> (°C)	Mcal/hr recuperadas			
	Te(°C)	Ts(°C)	Te(°C)	Ts(°C)		COP máximo	T <sub>AB</sub> útil (°C)	COP mínimo	T <sub>AB</sub> útil (°C)		COP max.	COP min.		
EA-109	32	46.1	52.7	43.3	255	0.483	71	0.236	90	16	123.2	60.2		
EA-110	32	45.6	54.3	43.4	575.2	0.474	73	0.217	87	24	272.6	124.8		
EA-201	32	46.1	85	48.9	2182	0.485	107	0.102	141	32	1058.3	222.6		
EA-805	32	38	89	56	865.6	0.486	111	0.162	149	32	420.7	140.2		
EA-407	32	34	95	50	657.4	0.483	117	0.186	145	46	317.5	122.3		
EA-408	32	33	72	60	1054.3	0.482	92	0.18	113	32	508.2	189.8		
EA-502	32	38	55	38	3113.9	0.475	74	0.124	87	24	1479.1	386.1		
EA-504	32	42	61	41	1147.3	0.479	80	0.168	99	24	549.6	192.7		
EA-508	32	37	83	38	342.8	0.486	104	0.168	136	32	166.6	57.6		
EA-9C	32	46	54	41	4272.9	0.473	73	0.264	84	24	2021.1	1128.0		
EA-15C	32	46	58	42	10745.4	0.475	77	0.146	93	24	5104.1	1568.8		
EA-19C	32	46	46	44	5341.2	0.476	64	0.124	77	16	2542.4	662.3		
EA-20C	32	46	96	38	1092.3	0.482	119	0.193	147	46	526.5	210.8		
EA-27C	32	46	73	41	2123.6	0.481	94	0.176	115	32	1021.5	373.8		
COND. .SUP.	31	43.6	52.3	46	27830.3	0.482	71	0.113	90	16	13414.2	3144.8		
Total disponible											61599.2		29525.4	8584.9
Total del sector											314893.8		47.9%	13.9%

Tabla 11.2. Escenarios del acoplamiento de transformadores térmicos en equipos de la refinería TULA – Secto

En la tabla 11.2 también se menciona la restricción a la cual se acoplará un transformador térmico, esta restricción se refiere a la temperatura de condensador necesaria para lograr la operación de cada transformador térmico. En algunos casos se requiere retirar calor a temperaturas menores a las disponibles en las corrientes frías cercanas, sin embargo, se puede considerar utilizar agua de enfriamiento a la temperatura de condensación calculada.

### **CONDICIÓN ÓPTIMA DE OPERACIÓN**

Cabe señalar que existen varias estrategias para optimar un transformador térmico por absorción, que pueden fundamentarse desde varios puntos de vista: termodinámico [Herold, 1987], exérgico [Rivero, 1992] o ecológico [Chen, 1998], entre otros.

El COP puede ser considerado como un indicador de la eficiencia del intercambio de calor [Jernqvist, 1992], pero no indica explícitamente el nivel térmico al cual se revaloriza la energía, por lo cual se han definido otros parámetros de eficiencia, entre ellos la eficiencia termodinámica y la eficiencia exérgica [Abrahamsson, 1993] (ver capítulo 9).

Para encontrar la condición óptima de cada equipo, sugiero la siguiente estrategia: encontrar el valor de eficiencia termodinámica, definida como:

$$E_{th} = COP_E / COP_C \quad (11.1)$$

y expresar esta en función de  $T_{AB}$ , para encontrar una función que la exprese adecuadamente ( $R^2 > 0.99$ ), derivarla y encontrar un punto máximo relativo

$$\frac{\delta E_{TH}}{\delta T_{AB}} = 0 \quad (11.2)$$

De esta forma se encontrará la  $T_{AB}$  máxima con un valor de COP que no sea el mínimo, esta estrategia se ejemplifica en la figura 11.1.

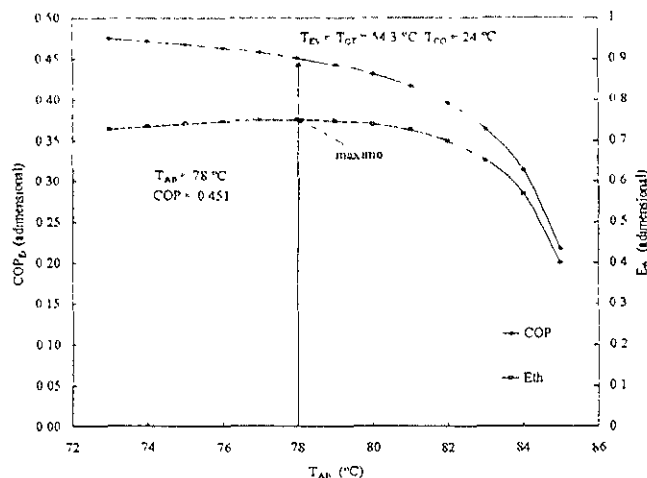


Figura 11.1. Estimación de la  $T_{AB}$  óptima en función de la variación del COP.

En esta figura, se muestran las variaciones del  $COP_E$  y del  $E_{th}$  en función de la  $T_{AB}$  para corrientes disponibles a  $54.3\text{ °C}$  (energía de desecho del esquema de refinación), con la cual se podría alimentar al generador y evaporador, con una temperatura de condensador (aire o agua) a  $24\text{ °C}$ . En esta figura se muestra que las condiciones de operación posibles inician con  $T_{AB}$  de  $73\text{ °C}$  y están limitadas en  $T_{AB}$  de  $85\text{ °C}$ . En estas condiciones el valor del COP disminuye al aumentar el valor de la  $T_{AB}$ , sin embargo, a partir del valor  $78\text{ °C}$ , la diferencia entre  $COP_E$  consecutivos aumenta de forma considerable.

En el mismo gráfico se muestra el valor de la eficiencia termodinámica (línea inferior) en la cual se observa el valor máximo en  $T_{AB} = 78\text{ °C}$ , por lo cual, se puede considerar a este punto como el óptimo para la  $T_{AB}$ .

A pesar de este tipo de análisis, el valor de  $T_{AB}$  a utilizar dependerá de los requerimientos mismos del proceso pudiendo no ser las condiciones óptimas pero en la que se puede integrar la energía revalorizada en una corriente útil del proceso mismo de dónde se desechó la energía suministrada al sistema.

## CONCLUSIONES

A partir de los datos generales de temperaturas disponibles en la energía que actualmente se desecha en los equipos de un esquema de refinación, (TULA – sector I) se evaluaron las combinaciones posibles en las que puede operar un transformador térmico encontrándose que el 40 % de los equipos se pueden acoplar a un TTA.

Estos acoplamientos solo muestran la factibilidad teórica de la integración de TTA a algunos equipos (15 de los 38 operantes), con dos escenarios: el escenario 1 en el cual se operarían todos los equipos con el máximo COP (en algunos casos hasta de 0.487) aunque se revalorizara la energía desechada al nivel mínimo de operación (un incremento mínimo de 18 °C) y el escenario 2, en el cual se revalorizaría la energía al nivel máximo de operación (un incremento máximo de 60 °C) aunque se revalorizaría con un menor COP (con valor mínimo de 0.102).

Aunque estos escenarios muestran una revalorización de la energía de 15 de los 38 equipos operantes en el esquema de refinación de petróleo, equivalente en el escenario 1 a 47.9% y en el escenario 2 a 13% de la energía desechada por estos 15 equipos.

Finalmente, el valor de la temperatura de revalorización dependerá del valor requerido para integrarse a una corriente cercana en el mismo proceso (ver capítulo de diseño termodinámico) ya sea como parte de un precalentamiento (reduciendo consumo de energía primaria) o como una parte o el total de una corriente requerida al nivel térmico producida por el transformador térmico.

## **REFERENCIAS**

- Abrahamsson K**, Jernqvist A & Aly G, Thermodynamic analysis of absorption Heat Cycles, International Absorption Heat Pump Conference, AES-Vol. 31, edited by ASME, pp 375 –383, 1993
- Chen T** & Yan Z, An ecological optimization criterion for a class of irreversible absorption heat transformers, J. Phys. D: Appl. Phys, Vol 31, pp 1078 – 1082, 1998
- George J M** & Srinivasa M, Influence of heat exchanger effectiveness on performance of vapour absorption heat transformers, Int. J. Energy Research, Vol 13, pp 455 – 475, 1989
- Herold K E**, Moran M J, Recent advances in the thermodynamic analysis of absorption heat pumps, in the “Second law analysis of thermal systems” edited by MJ Moran & E Sciubba – ASME, pp 97 –103, 1987
- Jernqvist A**, Abrahamsson K & Aly G, On the efficiencies of absorption heat transformers, Heat Recovery Systems & CHP, Vol 12, No. 4, pp 323 – 334, 1992

Rivera W, Estudio teórico de transformadores de calor por absorción operando con la mezcla bromuro de litio – agua, Tesis de Maestría, UNAM, Mexico, 1991

Rivero R & Le Goff P, On the performance criteria of sorption heat pump and heat transformers, in “Efficiency, cost, optimization and simulation of energy systems” edited by A Valero & G Tsatsaronis – ASME, pp 575 – 586, 1992

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

En este proyecto se presenta un modelo matemático y termodinámico que puede ser implementado para los fluidos de trabajo de los transformadores térmicos por absorción de una etapa (TTA) que cumplan con las consideraciones del modelo, presentadas en el capítulo 1 y de los cuales se conozcan sus ecuaciones de equilibrio.

Del trabajo realizado en la programación, compilación y edición del programa de cómputo ejecutable en computadoras personales se obtuvo una herramienta útil y práctica para poder determinar las condiciones de operación de un TTA con diferentes mezclas. Así como de una bomba de calor operando en diferentes modos: calentamiento, enfriamiento, y calentamiento y enfriamiento simultáneamente.

El software diseñado permite comparar la operación teórica de un sistema de absorción con diferentes mezclas y poder determinar de estas mezclas la que obtiene un mejor desempeño, es decir un mayor coeficiente de operación (COP) o una condición específica de temperaturas, como necesidad de un proceso industrial con condiciones fijas existentes.

Se listaron y compararon algunas de las condiciones de operación de un TTA como ejemplo de cálculo de la simulación asistida por computadora con el programa ejecutable TT-CIE. Así como también se publicaron los datos de diseño termodinámico para TTA con una mezcla acuosa de hidróxidos.

Con ayuda del software, se diseñó y construyó un TTA para una fuente de calor de desecho industrial a  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  a una temperatura ambiental de  $32\text{ }^{\circ}\text{C}$  y revalorizando dicho calor hasta un nivel térmico útil de  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con un COP de 0.44.

Contando con el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a través de un proyecto y una beca doctoral, se construyó y evaluó el TTA diseñado, obteniendo metodologías para el llenado, arranque, paro y operación correcta de un TTA.



Lo anterior permite la operación y evaluación de diversas mezclas para la revalorización de energía para condiciones específicas industriales.

En los resultados mostrados en el capítulo 5 se mostraron los límites de operación del equipo para las temperaturas, presiones y concentraciones de sus principales componentes.

Las correlaciones encontradas para los principales parámetros de diseño tienen factores de correlación razonablemente aceptables para la representatividad del desempeño del transformador térmico por absorción de una etapa operado con la mezcla Carrol - agua.

Se ha propuesto una correlación para el cálculo rápido de la potencia revalorizada en función de parámetros termodinámicos de fácil medición en un equipo experimental.

La operación del equipo mostró que el cambio de material y por lo tanto de la conductividad pueden lograr coeficientes de operación calculados por el modelo presentado.

Por otro lado, se ha demostrado que la operación del transformador térmico por absorción de una etapa con Carrol - agua, se encuentra en condiciones de operación similares a las predichas con el modelo mostrado, ya que en la mayoría de los experimentos realizados, la diferencia entre las temperaturas calculadas para el absorbedor y los valores alcanzados en los experimentos tiende a cero. Con esta conclusión se puede considerar que el programa TT-CIE utilizado es una herramienta muy útil y representativa para el cálculo de condiciones experimentales de los transformadores térmicos por absorción de una etapa.

Finalmente se mostró una correlación semi - empírica de parámetros medibles en la operación *in situ* de un TTA como lo son la potencia de evaporación, el flujo de solución y la presión del absorbedor para tener un cálculo rápido y confiable de la potencia útil revalorizada en el absorbedor.

En el estudio experimental del efecto de la recirculación de solución diluida (reflujo) del fondo del absorbedor al flujo de solución concentrada proveniente del generador se encontró que existe un valor óptimo  $RC = 0.4$ , para maximizar el incremento de temperatura ( $\Delta T$ ).

Este estudio experimental muestra también que existe una dependencia de la diferencia de concentración con respecto a este reflujo. Sin embargo, para cada reflujo la diferencia de concentraciones entre el generador y el absorbedor no permanece constante.

El estudio del efecto del reflujo se llevó a cabo con potencias constantes en generador y evaporador, por lo cual la diferencia de concentraciones se ha limitado a valores menores de 2 puntos porcentuales, por lo que no se puede extrapolar para variaciones mayores de concentración entre las soluciones presentes en el generador y el absorbedor.

Sin embargo, un punto muy interesante de este estudio y de las conclusiones del capítulo 5 (evaluación del equipo experimental) conducen a un valor de la diferencia de concentraciones de 1.24 como valor óptimo para maximizar el coeficiente de operación del transformador térmico por absorción de una etapa.

Todo lo anterior sugiere que el valor óptimo de reflujo es de 0.4 para las condiciones llevadas a cabo en este estudio experimental. Ya que este valor de reflujo optimiza la diferencia de temperaturas en el aceite del sistema de recuperación de calor y promueve la diferencia de concentraciones con valor cercano a 1.1, por lo cual se verá favorecido tanto el incremento de temperatura ( $\Delta T$ ) como el coeficiente de operación (COP) del transformador térmico por absorción de una etapa, operando con la mezcla Carrol - agua.

En el capítulo 7 se muestra el resultado de la determinación de el coeficiente global de transferencia de calor determinado en un absorbedor de película descendente. Para la determinación del coeficiente global de transferencia de calor se utilizó amoníaco y agua, para formar una solución con concentraciones de 13.22 y 14.52 % de amoníaco en la mezcla.

En el estudio experimental se propuso un método indirecto *in situ* para la determinación de la concentración de amoníaco en la solución formada, con una correlación de la conductividad eléctrica a una temperatura dada con presión constante.

Los resultados obtenidos en estos experimentos fueron perfiles de temperatura y valores del coeficiente global de transferencia de calor, el coeficiente de transferencia de calor de película y las condiciones de operación en este absorbedor para lograr una película descendente con área controlada.

En el estudio realizado para películas descendentes sobre superficies extendidas mostraron diferentes comportamientos y temperaturas. En el caso de los tubos lisos se encontró que para las condiciones de absorción de Carrol al 57 %, se puede obtener hasta un incremento de 7.8 °C en varios pequeños incrementos. En estos tubos, la mayor extracción de calor se realizaría en la parte media del haz de tubos lisos.

En el caso de los tubos micro – aletados se encontraron valores pequeños del incremento de temperatura. Este fenómeno puede deberse al poco tiempo de residencia que tiene la gota de solución de Carrol sobre la superficie. Por lo anterior, se recomienda que se diseñaran tuberías con aletas más largas para controlar el área mojada.

En el caso de los tubos corrugados se encontró que el se pueden obtener mayores incrementos de temperatura que en el tubo liso, llegando hasta 12.1 °C de incremento, alcanzado preferentemente en dos zonas. Esto sugiere que la mayor cantidad de calor que se retiraría de un absorbedor con haz de tubos horizontales corrugados se llevaría en la parte superior y la mayor parte de la extracción en la parte inferior del absorbedor.

Finalmente, en el caso de los tubos aletados (en 11 espiras por pulgada), se han obtenido incrementos de temperatura máximos de 8.3 °C, distribuidos en tres incrementos bien definidos y con valores máximos cercanos a 2 °C. Esta repetibilidad en la distribución de temperaturas puede ser aprovechada para el diseño de los absorbedores, ya que se puede conocer la zona preferente en dónde se extraerá la mayor parte de calor producida por la absorción. Estos incrementos aumentan su valor conforme desciende la solución de Carrol.

A partir de los datos recopilados y calculados para las diferentes condiciones de operación del TAS, se puede ver que la superficie horizontal que muestra el comportamiento más repetitivo es el tubo aletado de 11 espiras por pulgada, en el cual se puede observar que existen zonas preferentes y bien definidas para extraer el calor producto de la absorción del vapor de agua en la solución concentrada de Carrol .

Se presenta un criterio de optimación termodinámica para el diseño de absorbedores de película descendente. El cual está basado en la eficiencia termodinámica calculada a partir de simulaciones asistidas por computadora

para condiciones de operación de transformadores térmicos por absorción de una etapa.

Para el diseño optimado se consideraron los estudios experimentales de películas descendentes, poniendo especial atención en la distribución de temperaturas, conduciendo esto a la propuesta de un retorno del fluido que circula dentro de los tubos. Este fluido debe iniciar la extracción de calor por la parte superior de la coraza y finalizar en la parte inferior, en un número de pasos pares.

Se presenta el diseño optimado de un absorbedor con formación controlada de película descendente en la superficie exterior de haces de tubos horizontales con superficies extendidas (comerciales), a fin de obtener la mayor cantidad de energía revalorizada a un valor máximo de temperatura.

Se muestra el resultado del acoplamiento teórico de un estanque solar con un transformador térmico por absorción de una etapa utilizando la mezcla Carrol – agua, con calor proveniente de un estanque solar a temperaturas menores a 80 °C. Los resultados se mostraron en forma de relaciones gráficas del incremento de temperatura, el COP y el calor útil.

Se demostró en forma teórica que se puede acoplar un TTA con un estanque solar y obtener calor útil a 128 °C con un COP entre 0.08 y 0.33.

Se mostró la posibilidad de acoplar sistemas de absorción (TTA) en un esquema de refinación de petróleo, a partir de los datos generales de temperaturas disponibles en la energía que actualmente se desecha en los equipos de la planta TULA – sector I, (Petróleos Mexicanos).

Los acoplamientos de los TTA muestran la factibilidad de la integración a algunos equipos, con dos escenarios: el primer escenario en el cual se operarían todos los equipos con el máximo COP revalorizando la energía al nivel mínimo de operación y un segundo escenario, en el cual se revalorizaría la energía al nivel máximo de operación revalorizándose con un menor COP.

Los escenarios mostrados indican una revaloración potencial de la energía de 15 de los 38 equipos operantes en el esquema de refinación de petróleo, equivalente en el primer escenario a 47.9 % y en el segundo escenario a 13 % de la energía desechada por 15 equipos.

Finalmente, el valor de la temperatura de revalorización en un TTA dependerá del valor requerido para integrarse a una corriente cercana en el mismo proceso ya sea como parte de un precalentamiento, reduciendo consumo de energía primaria o como parte de una corriente requerida al nivel térmico de operación del TTA.

### **RECOMENDACIONES**

Para poder realizar una simulación asistida por computadora basada en el modelo presentado para una mezcla propuesta se requiere de las ecuaciones de equilibrio, por lo cual se recomienda instalar un laboratorio de calorimetría para poder obtener correlaciones de entalpía y presión, como funciones de la concentración y temperatura de una mezcla destinada a evaluarse como candidato a fluido de trabajo en sistemas de absorción.

Contando con el TTA construido se podrán evaluar experimentalmente mezclas potenciales para la recuperación de calor de desecho industrial y dependiendo de la mezcla, se podrán determinar los niveles térmicos de revalorización adecuados para cada proceso. Por lo que es recomendable evaluar experimentalmente efectos de las mezclas de bromuro de litio con aditivos específicos que promuevan los procesos de transferencia.

Es recomendable cambiar el serpentín del absorbedor por acero al carbón, a fin de recuperar una mayor cantidad de calor (mayor COP) debido al aumento en la conductividad, logrando con esto presentar un equipo en condiciones cercanas a los equipos que se utilizarían en la industria.

Se recomienda utilizar una recirculación del fondo del absorbedor a la parte superior del mismo para tener una diferencia de concentraciones entre generador y absorbedor cercana a la unidad, ya que en este valor se puede obtener el mayor incremento de temperatura y se promueve considerablemente la transferencia de calor al sistema de recuperación de calor.

Se recomienda utilizar el criterio de optimación basado en la eficiencia termodinámica, ya que se pueden obtener los valores del COP como función del incremento de temperatura a partir del modelo mostrado y por lo tanto su cálculo es sencillo.

Se recomienda para la construcción de absorbedores, el empleo de materiales con mayor conductividad que la del acero inoxidable 316S, a fin de retirar la mayor cantidad de calor posible.

En el acoplamiento de TTA a estanques solares se recomienda operar a la mayor temperatura posible en el absorbedor, aún con la disminución del COP, ya que para estos sistemas la cantidad de energía suministrada no es una limite para las condiciones de operación y pueden obtener incrementos de temperatura atractivos para procesos industriales.

Finalmente, en la integración de TTA a procesos industriales existentes, como el esquema de refinación de petróleo, se deben de identificar las corrientes de alimentación y los niveles térmicos requeridos cercanos a las corrientes que se revalorizan.

Recordemos que el mundo en que vivimos no lo tenemos heredado de nuestros padres, lo tenemos prestado de nuestros hijos.

Rosenberg Javier Romero Domínguez

Temixco, Mor., a mayo de 2001

## Apéndice A.- DATOS DE DISEÑO TERMODINÁMICO

En este apéndice se incluyen los datos de diseño termodinámico para transformadores térmicos por absorción de una etapa (TTA) con las mezclas:

Bromuro de litio – agua,

Bromuro de litio – etilenglicol (Carrol) – agua,

Bromuro de litio – etanolamina – agua, e

Hidróxido de sodio – hidróxido de potasio – hidróxido de cesio – agua.

Las condiciones calculadas para las mezclas basadas en bromuro de litio (con aditivos para modificar la solubilidad) se realizaron para las condiciones en que se ingresa calor de desecho industrial a la misma temperatura:

$$T_{EV} = T_{GE}$$

y se realizaron los cálculos para valores de 70, 80, 90 y 100 °C, con una temperatura constante en el condensador:

$$T_{CO} = 32 \text{ °C}$$

Considerándose esta una temperatura representativa del ambiente en la región central de México.

Una consideración importante es la efectividad del intercambiador de calor de las soluciones, que se tomó con un valor realista de 0.7.

En las siguientes hojas se muestran las temperaturas de generación, condensación, evaporación y absorción, presión en condensador – generador y evaporador – absorbedor, concentraciones de los absorbentes en el generador y absorbedor, relación de flujo, potencias en cada componente, coeficiente de operación entálpico y de Carnot, efectividad del intercambiador de calor (economizador), flujos en los componentes y absorbente utilizado.

Para la mezcla acuosa de hidróxidos se han calculado los datos de diseño termodinámico arrojados con el programa TT-CIE y se publicaron en la revista Applied Thermal Engineering, Vol. 18, Nos 3 –4, pp 147 – 156, 1998.

T <sub>GE</sub> (°C)	T <sub>CO</sub> (°C)	T <sub>EV</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)	P <sub>CO</sub> (mmHg)	P <sub>EV</sub> (mmHg)	X <sub>AB</sub> (%w)	X <sub>GE</sub> (%w)	RF (dim)	Q <sub>GE</sub> (kW)	Q <sub>EV</sub> (kW)	Q <sub>CO</sub> (kW)	Q <sub>AB</sub> (kW)	COP <sub>E</sub> (dim)	COP <sub>C</sub> (dim)	η <sub>HX</sub> (dim)	M <sub>EV</sub> (kg/s)	M <sub>AB</sub> (kg/s)	M <sub>GE</sub> (kg/s)	Fluido
70	32	70	106	35.7	233.6	53.7	57.3	16.2	1.91	2.20	2.20	1.91	0.464	0.567	0.7	8.83E-04	1.43E-02	1.34E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
70	32	70	107	35.7	233.6	54.2	57.3	18.7	1.85	2.20	2.20	1.85	0.457	0.561	0.7	8.83E-04	1.65E-02	1.57E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
70	32	70	108	35.7	233.6	54.7	57.3	22.0	1.78	2.20	2.20	1.78	0.447	0.555	0.7	8.83E-04	1.94E-02	1.85E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
70	32	70	109	35.7	233.6	55.1	57.3	27.1	1.66	2.20	2.20	1.66	0.430	0.550	0.7	8.83E-04	2.39E-02	2.30E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
70	32	70	110	35.7	233.6	55.6	57.3	34.4	1.50	2.20	2.20	1.49	0.404	0.544	0.7	8.83E-04	3.03E-02	2.95E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
70	32	70	111	35.7	233.6	56.0	57.3	47.2	1.20	2.20	2.20	1.20	0.352	0.539	0.7	8.83E-04	4.17E-02	4.08E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
70	32	70	112	35.7	233.6	56.5	57.3	75.4	0.54	2.20	2.20	0.54	0.198	0.533	0.7	8.83E-04	6.65E-02	6.56E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
70	32	70	99	35.7	233.6	56.6	64.4	8.2	2.05	2.20	2.20	2.04	0.481	0.615	0.7	8.83E-04	7.27E-03	6.38E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	100	35.7	233.6	57.1	64.4	8.9	2.03	2.20	2.20	2.03	0.480	0.608	0.7	8.83E-04	7.85E-03	6.97E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	101	35.7	233.6	57.7	64.4	9.6	2.02	2.20	2.20	2.02	0.478	0.600	0.7	8.83E-04	8.51E-03	7.62E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	102	35.7	233.6	58.3	64.4	10.5	2.00	2.20	2.20	2.00	0.476	0.594	0.7	8.83E-04	9.29E-03	8.40E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	103	35.7	233.6	58.8	64.4	11.5	1.98	2.20	2.20	1.98	0.473	0.587	0.7	8.83E-04	1.02E-02	9.30E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	104	35.7	233.6	59.3	64.4	12.7	1.96	2.20	2.20	1.95	0.470	0.580	0.7	8.83E-04	1.12E-02	1.03E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	105	35.7	233.6	59.8	64.4	14.2	1.92	2.20	2.20	1.92	0.466	0.574	0.7	8.83E-04	1.25E-02	1.16E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	106	35.7	233.6	60.4	64.4	16.0	1.88	2.20	2.20	1.88	0.461	0.567	0.7	8.83E-04	1.41E-02	1.33E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	107	35.7	233.6	60.9	64.4	18.3	1.83	2.20	2.20	1.83	0.454	0.561	0.7	8.83E-04	1.61E-02	1.53E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	108	35.7	233.6	61.4	64.4	21.3	1.76	2.20	2.20	1.76	0.444	0.555	0.7	8.83E-04	1.88E-02	1.79E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	109	35.7	233.6	61.8	64.4	25.3	1.67	2.20	2.20	1.67	0.431	0.550	0.7	8.83E-04	2.24E-02	2.15E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	110	35.7	233.6	62.3	64.4	31.3	1.53	2.20	2.20	1.53	0.410	0.544	0.7	8.83E-04	2.76E-02	2.67E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	111	35.7	233.6	62.8	64.4	40.7	1.31	2.20	2.20	1.31	0.373	0.539	0.7	8.83E-04	3.60E-02	3.51E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	112	35.7	233.6	63.3	64.4	57.5	0.92	2.20	2.20	0.92	0.294	0.533	0.7	8.83E-04	5.07E-02	4.99E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
70	32	70	88	35.7	233.6	50.2	64.3	4.6	2.14	2.20	2.20	2.14	0.493	0.714	0.7	8.83E-04	4.03E-03	3.15E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	89	35.7	233.6	50.8	64.3	4.8	2.14	2.20	2.20	2.14	0.492	0.704	0.7	8.83E-04	4.20E-03	3.32E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	90	35.7	233.6	51.4	64.3	5.0	2.14	2.20	2.20	2.13	0.492	0.693	0.7	8.83E-04	4.39E-03	3.50E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	91	35.7	233.6	51.9	64.3	5.2	2.13	2.20	2.20	2.13	0.492	0.684	0.7	8.83E-04	4.59E-03	3.70E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	92	35.7	233.6	52.5	64.3	5.4	2.13	2.20	2.20	2.13	0.492	0.674	0.7	8.83E-04	4.81E-03	3.93E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	93	35.7	233.6	53.1	64.3	5.7	2.13	2.20	2.20	2.13	0.491	0.665	0.7	8.83E-04	5.05E-03	4.17E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	94	35.7	233.6	53.6	64.3	6.0	2.12	2.20	2.20	2.12	0.491	0.656	0.7	8.83E-04	5.32E-03	4.43E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	95	35.7	233.6	54.2	64.3	6.4	2.12	2.20	2.20	2.11	0.490	0.647	0.7	8.83E-04	5.61E-03	4.73E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	96	35.7	233.6	54.8	64.3	6.7	2.11	2.20	2.20	2.11	0.489	0.639	0.7	8.83E-04	5.94E-03	5.06E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	97	35.7	233.6	55.3	64.3	7.1	2.10	2.20	2.20	2.10	0.488	0.631	0.7	8.83E-04	6.31E-03	5.43E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	98	35.7	233.6	55.9	64.3	7.6	2.09	2.20	2.20	2.09	0.487	0.623	0.7	8.83E-04	6.72E-03	5.84E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	99	35.7	233.6	56.4	64.3	8.2	2.08	2.20	2.20	2.08	0.485	0.615	0.7	8.83E-04	7.20E-03	6.32E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
70	32	70	100	35.7	233.6	57.0	64.3	8.9	2.07	2.20	2.20	2.07	0.484	0.608	0.7	8.83E-04	7.74E-03	6.85E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O



T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	T <sub>B</sub> (°C)	P <sub>O</sub> (mmHg)	P <sub>V</sub> (mmHg)	X <sub>B</sub> (%w)	X <sub>V</sub> (%w)	RI (dim)	Q <sub>GE</sub> (kW)	Q <sub>EV</sub> (kW)	Q <sub>AL</sub> (kW)	Q <sub>AP</sub> (kW)	OP <sub>E</sub> (dim)	P <sub>C</sub> (dim)	M <sub>1</sub> (kg/s)	M <sub>2</sub> (kg/s)	M <sub>3</sub> (kg/s)	Ind.	
70	32	70	101	35.7	233.6	57.5	64.3	9.5	2.05	2.20	2.20	2.05	0.482	0.600	0.7	8.83E-04	8.36E-03	7.48E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ON H <sub>2</sub> O
70	32	70	102	35.7	233.6	58.1	64.3	10.3	2.03	2.20	2.20	2.02	0.479	0.594	0.7	8.83E-04	9.09E-03	8.20E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ON H <sub>2</sub> O
70	32	70	103	35.7	233.6	58.6	64.3	11.3	2.00	2.20	2.20	2.00	0.476	0.587	0.7	8.83E-04	9.96E-03	9.08E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ON H <sub>2</sub> O
70	32	70	104	35.7	233.6	59.2	64.3	12.5	1.97	2.20	2.20	1.97	0.472	0.580	0.7	8.83E-04	1.10E-02	1.01E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ON H <sub>2</sub> O
70	32	70	105	35.7	233.6	59.7	64.3	13.9	1.93	2.20	2.20	1.93	0.467	0.574	0.7	8.83E-04	1.23E-02	1.14E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ON H <sub>2</sub> O
70	32	70	106	35.7	233.6	60.2	64.3	15.8	1.88	2.20	2.20	1.88	0.460	0.567	0.7	8.83E-04	1.39E-02	1.30E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ON H <sub>2</sub> O
70	32	70	107	35.7	233.6	60.8	64.3	18.2	1.81	2.20	2.20	1.81	0.451	0.561	0.7	8.83E-04	1.60E-02	1.52E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ON H <sub>2</sub> O
70	32	70	108	35.7	233.6	61.3	64.3	21.4	1.72	2.20	2.20	1.71	0.438	0.555	0.7	8.83E-04	1.89E-02	1.80E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ON H <sub>2</sub> O
70	32	70	109	35.7	233.6	61.9	64.3	26.0	1.58	2.20	2.20	1.58	0.418	0.550	0.7	8.83E-04	2.30E-02	2.21E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ON H <sub>2</sub> O
70	32	70	110	35.7	233.6	62.4	64.3	33.2	1.37	2.20	2.20	1.37	0.384	0.544	0.7	8.83E-04	2.93E-02	2.84E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ON H <sub>2</sub> O
70	32	70	111	35.7	233.6	62.9	64.3	45.6	1.01	2.20	2.20	1.00	0.313	0.539	0.7	8.83E-04	4.03E-02	3.94E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> -ON H <sub>2</sub> O
80	32	80	117	35.7	354.9	53.5	61.9	7.4	2.09	2.20	2.20	2.09	0.486	0.624	0.7	8.77E-04	6.52E-03	5.64E-03	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	118	35.7	354.9	54.0	61.9	7.9	2.08	2.20	2.20	2.08	0.485	0.618	0.7	8.77E-04	6.90E-03	6.03E-03	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	119	35.7	354.9	54.5	61.9	8.4	2.07	2.20	2.20	2.06	0.484	0.613	0.7	8.77E-04	7.35E-03	6.47E-03	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	120	35.7	354.9	54.9	61.9	8.9	2.05	2.20	2.20	2.05	0.482	0.607	0.7	8.77E-04	7.85E-03	6.97E-03	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	121	35.7	354.9	55.4	61.9	9.6	2.04	2.20	2.20	2.03	0.480	0.602	0.7	8.77E-04	8.42E-03	7.55E-03	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	122	35.7	354.9	55.8	61.9	10.3	2.02	2.20	2.20	2.02	0.478	0.597	0.7	8.77E-04	9.03E-03	8.15E-03	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	123	35.7	354.9	56.3	61.9	11.1	2.00	2.20	2.20	2.00	0.475	0.592	0.7	8.77E-04	9.73E-03	8.86E-03	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	124	35.7	354.9	56.8	61.9	12.1	1.97	2.20	2.20	1.97	0.472	0.587	0.7	8.77E-04	1.06E-02	9.77E-03	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	125	35.7	354.9	57.2	61.9	13.2	1.95	2.20	2.20	1.94	0.469	0.582	0.7	8.77E-04	1.15E-02	1.07E-02	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	126	35.7	354.9	57.6	61.9	14.5	1.91	2.20	2.20	1.91	0.464	0.577	0.7	8.77E-04	1.27E-02	1.18E-02	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	127	35.7	354.9	58.0	61.9	16.2	1.87	2.20	2.20	1.86	0.458	0.573	0.7	8.77E-04	1.42E-02	1.33E-02	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	128	35.7	354.9	58.4	61.9	18.1	1.81	2.20	2.20	1.81	0.451	0.568	0.7	8.77E-04	1.58E-02	1.50E-02	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	129	35.7	354.9	58.9	61.9	20.7	1.74	2.20	2.20	1.74	0.441	0.564	0.7	8.77E-04	1.82E-02	1.73E-02	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	130	35.7	354.9	59.3	61.9	23.9	1.65	2.20	2.20	1.65	0.428	0.559	0.7	8.77E-04	2.10E-02	2.01E-02	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	131	35.7	354.9	59.7	61.9	28.4	1.53	2.20	2.20	1.53	0.410	0.555	0.7	8.77E-04	2.49E-02	2.40E-02	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	132	35.7	354.9	60.0	61.9	34.0	1.37	2.20	2.20	1.37	0.384	0.551	0.7	8.77E-04	2.98E-02	2.89E-02	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	133	35.7	354.9	60.4	61.9	43.7	1.10	2.20	2.20	1.10	0.333	0.547	0.7	8.77E-04	3.83E-02	3.74E-02	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	134	35.7	354.9	60.8	61.9	59.9	0.65	2.20	2.20	0.65	0.227	0.543	0.7	8.77E-04	5.26E-02	5.17E-02	LiBr H <sub>2</sub> O
80	32	80	110	35.7	354.9	56.4	69.3	5.4	2.09	2.20	2.20	2.09	0.487	0.668	0.7	8.77E-04	4.73E-03	3.85E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
80	32	80	111	35.7	354.9	57.0	69.3	5.6	2.09	2.20	2.20	2.09	0.487	0.661	0.7	8.77E-04	4.94E-03	4.07E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
80	32	80	112	35.7	354.9	57.5	69.3	5.9	2.09	2.20	2.20	2.08	0.486	0.654	0.7	8.77E-04	5.18E-03	4.30E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
80	32	80	113	35.7	354.9	58.1	69.3	6.2	2.08	2.20	2.20	2.08	0.485	0.648	0.7	8.77E-04	5.43E-03	4.55E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
80	32	80	114	35.7	354.9	58.6	69.3	6.5	2.08	2.20	2.20	2.07	0.485	0.642	0.7	8.77E-04	5.70E-03	4.82E-03	CARROL H <sub>2</sub> O

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%w)	$X_{GE}$ (%w)	RF (dim)	$Q_{GL}$ (kW)	$Q_{EV}$ (kW)	$Q_{CO}$ (kW)	$Q_{AB}$ (kW)	$COPE$ (dim)	$COP_C$ (dim)	$THX$ (dim)	$M_{EV}$ (kg/s)	$M_{AB}$ (kg/s)	$M_{GE}$ (kg/s)	Fluido
80	32	80	115	35.7	354.9	59.1	69.3	6.8	2.07	2.20	2.20	2.07	0.484	0.636	0.7	8.77E-04	5.99E-03	5.11E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	116	35.7	354.9	59.6	69.3	7.2	2.06	2.20	2.20	2.06	0.483	0.630	0.7	8.77E-04	6.31E-03	5.44E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	117	35.7	354.9	60.1	69.3	7.6	2.05	2.20	2.20	2.05	0.482	0.624	0.7	8.77E-04	6.66E-03	5.78E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	118	35.7	354.9	60.6	69.3	8.0	2.04	2.20	2.20	2.04	0.481	0.618	0.7	8.77E-04	7.03E-03	6.15E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	119	35.7	354.9	61.1	69.3	8.5	2.03	2.20	2.20	2.03	0.479	0.613	0.7	8.77E-04	7.46E-03	6.58E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	120	35.7	354.9	61.6	69.3	9.0	2.02	2.20	2.20	2.01	0.478	0.607	0.7	8.77E-04	7.91E-03	7.03E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	121	35.7	354.9	62.1	69.3	9.6	2.00	2.20	2.20	2.00	0.476	0.602	0.7	8.77E-04	8.43E-03	7.56E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	122	35.7	354.9	62.5	69.3	10.3	1.98	2.20	2.20	1.98	0.474	0.597	0.7	8.77E-04	9.01E-03	8.13E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	123	35.7	354.9	63.0	69.3	11.0	1.96	2.20	2.20	1.96	0.471	0.592	0.7	8.77E-04	9.67E-03	8.79E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	124	35.7	354.9	63.4	69.3	11.9	1.94	2.20	2.20	1.94	0.468	0.587	0.7	8.77E-04	1.04E-02	9.56E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	125	35.7	354.9	63.9	69.3	12.9	1.92	2.20	2.20	1.91	0.465	0.582	0.7	8.77E-04	1.13E-02	1.04E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	126	35.7	354.9	64.3	69.3	14.0	1.88	2.20	2.20	1.88	0.461	0.577	0.7	8.77E-04	1.23E-02	1.14E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	127	35.7	354.9	64.8	69.3	15.4	1.85	2.20	2.20	1.84	0.456	0.573	0.7	8.77E-04	1.35E-02	1.26E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	128	35.7	354.9	65.2	69.3	17.1	1.80	2.20	2.20	1.80	0.449	0.568	0.7	8.77E-04	1.50E-02	1.41E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	129	35.7	354.9	65.6	69.3	19.0	1.74	2.20	2.20	1.74	0.441	0.564	0.7	8.77E-04	1.67E-02	1.58E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	130	35.7	354.9	66.0	69.3	21.5	1.67	2.20	2.20	1.67	0.431	0.559	0.7	8.77E-04	1.89E-02	1.80E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	131	35.7	354.9	66.5	69.3	24.7	1.58	2.20	2.20	1.58	0.417	0.555	0.7	8.77E-04	2.17E-02	2.08E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	132	35.7	354.9	66.9	69.3	29.1	1.46	2.20	2.20	1.45	0.398	0.551	0.7	8.77E-04	2.55E-02	2.46E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	133	35.7	354.9	67.3	69.3	35.3	1.28	2.20	2.20	1.28	0.367	0.547	0.7	8.77E-04	3.10E-02	3.01E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	134	35.7	354.9	67.7	69.3	44.4	1.02	2.20	2.20	1.01	0.315	0.543	0.7	8.77E-04	3.89E-02	3.81E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	135	35.7	354.9	68.1	69.3	60.8	0.55	2.20	2.20	0.54	0.198	0.539	0.7	8.77E-04	5.33E-02	5.24E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
80	32	80	99	35.7	354.9	50.3	69.9	3.6	2.17	2.20	2.20	2.17	0.496	0.755	0.7	8.77E-04	3.12E-03	2.24E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	100	35.7	354.9	50.8	69.9	3.7	2.17	2.20	2.20	2.17	0.496	0.746	0.7	8.77E-04	3.21E-03	2.34E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	101	35.7	354.9	51.4	69.9	3.8	2.18	2.20	2.20	2.17	0.497	0.737	0.7	8.77E-04	3.31E-03	2.43E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	102	35.7	354.9	51.9	69.9	3.9	2.18	2.20	2.20	2.17	0.497	0.728	0.7	8.77E-04	3.41E-03	2.54E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	103	35.7	354.9	52.5	69.9	4.0	2.18	2.20	2.20	2.17	0.497	0.720	0.7	8.77E-04	3.52E-03	2.64E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	104	35.7	354.9	53.0	69.9	4.1	2.18	2.20	2.20	2.17	0.497	0.712	0.7	8.77E-04	3.64E-03	2.76E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	105	35.7	354.9	53.6	69.9	4.3	2.17	2.20	2.20	2.17	0.496	0.704	0.7	8.77E-04	3.76E-03	2.88E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	106	35.7	354.9	54.1	69.9	4.4	2.17	2.20	2.20	2.17	0.496	0.696	0.7	8.77E-04	3.89E-03	3.01E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	107	35.7	354.9	54.7	69.9	4.6	2.17	2.20	2.20	2.17	0.496	0.689	0.7	8.77E-04	4.03E-03	3.16E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	108	35.7	354.9	55.2	69.9	4.8	2.17	2.20	2.20	2.17	0.496	0.682	0.7	8.77E-04	4.18E-03	3.31E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	109	35.7	354.9	55.8	69.9	5.0	2.17	2.20	2.20	2.17	0.496	0.675	0.7	8.77E-04	4.34E-03	3.47E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	110	35.7	354.9	56.3	69.9	5.2	2.17	2.20	2.20	2.16	0.495	0.668	0.7	8.77E-04	4.52E-03	3.64E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	111	35.7	354.9	56.9	69.9	5.4	2.16	2.20	2.20	2.16	0.495	0.661	0.7	8.77E-04	4.70E-03	3.83E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	112	35.7	354.9	57.4	69.9	5.6	2.16	2.20	2.20	2.16	0.495	0.654	0.7	8.77E-04	4.89E-03	4.02E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O

$T_{Li}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%w)	$X_{GE}$ (%w)	RF (dim)	$Q_{GE}$ (kW)	$Q_{EV}$ (kW)	$Q_{CO}$ (kW)	$Q_{AB}$ (kW)	COP <sub>E</sub> (dim)	COP <sub>C</sub> (dim)	$\eta_{HX}$ (dim)	$M_{EV}$ (kg/s)	$M_{AB}$ (kg/s)	$M_{GE}$ (kg/s)	Fluids
80	32	80	113	35.7	354.9	57.9	69.9	5.8	2.15	2.20	2.20	2.15	0.494	0.648	0.7	8.77E-04	5.13E-03	4.25E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	114	35.7	354.9	58.5	69.9	6.1	2.15	2.20	2.20	2.14	0.493	0.642	0.7	8.77E-04	5.37E-03	4.49E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	115	35.7	354.9	59.0	69.9	6.4	2.14	2.20	2.20	2.14	0.493	0.636	0.7	8.77E-04	5.63E-03	4.76E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	116	35.7	354.9	59.5	69.9	6.8	2.13	2.20	2.20	2.13	0.492	0.630	0.7	8.77E-04	5.92E-03	5.04E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	117	35.7	354.9	60.1	69.9	7.1	2.12	2.20	2.20	2.12	0.491	0.624	0.7	8.77E-04	6.24E-03	5.36E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	118	35.7	354.9	60.6	69.9	7.5	2.11	2.20	2.20	2.11	0.489	0.618	0.7	8.77E-04	6.59E-03	5.71E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	119	35.7	354.9	61.1	69.9	8.0	2.10	2.20	2.20	2.10	0.488	0.613	0.7	8.77E-04	6.99E-03	6.11E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	120	35.7	354.9	61.6	69.9	8.5	2.09	2.20	2.20	2.09	0.486	0.607	0.7	8.77E-04	7.43E-03	6.55E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	121	35.7	354.9	62.2	69.9	9.0	2.07	2.20	2.20	2.07	0.484	0.602	0.7	8.77E-04	7.93E-03	7.05E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	122	35.7	354.9	62.7	69.9	9.7	2.05	2.20	2.20	2.05	0.482	0.597	0.7	8.77E-04	8.50E-03	7.62E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	123	35.7	354.9	63.2	69.9	10.4	2.03	2.20	2.20	2.03	0.479	0.592	0.7	8.77E-04	9.16E-03	8.28E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	124	35.7	354.9	63.7	69.9	11.3	2.00	2.20	2.20	2.00	0.476	0.587	0.7	8.77E-04	9.93E-03	9.05E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	125	35.7	354.9	64.2	69.9	12.3	1.97	2.20	2.20	1.97	0.472	0.582	0.7	8.77E-04	1.08E-02	9.95E-03	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	126	35.7	354.9	64.7	69.9	13.6	1.93	2.20	2.20	1.93	0.467	0.577	0.7	8.77E-04	1.19E-02	1.10E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	127	35.7	354.9	65.3	69.9	15.1	1.88	2.20	2.20	1.88	0.461	0.573	0.7	8.77E-04	1.32E-02	1.23E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	128	35.7	354.9	65.8	69.9	16.9	1.82	2.20	2.20	1.82	0.452	0.568	0.7	8.77E-04	1.48E-02	1.40E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	129	35.7	354.9	66.3	69.9	19.3	1.74	2.20	2.20	1.74	0.441	0.564	0.7	8.77E-04	1.69E-02	1.60E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	130	35.7	354.9	66.8	69.9	22.4	1.64	2.20	2.20	1.64	0.426	0.559	0.7	8.77E-04	1.96E-02	1.88E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	131	35.7	354.9	67.3	69.9	26.8	1.49	2.20	2.20	1.49	0.403	0.555	0.7	8.77E-04	2.35E-02	2.26E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	132	35.7	354.9	67.8	69.9	33.1	1.27	2.20	2.20	1.27	0.366	0.551	0.7	8.77E-04	2.90E-02	2.82E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
80	32	80	133	35.7	354.9	68.3	69.9	43.4	0.92	2.20	2.20	0.91	0.293	0.547	0.7	8.77E-04	3.81E-02	3.72E-02	LiBr-C <sub>2</sub> H <sub>7</sub> ON/H <sub>2</sub> O
90	32	90	129	35.7	525.4	53.8	66.1	5.4	2.12	2.20	2.20	2.12	0.490	0.662	0.7	8.71E-04	4.71E-03	3.84E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	130	35.7	525.4	54.3	66.1	5.6	2.12	2.20	2.20	2.12	0.490	0.657	0.7	8.71E-04	4.91E-03	4.03E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	131	35.7	525.4	54.8	66.1	5.9	2.12	2.20	2.20	2.11	0.489	0.652	0.7	8.71E-04	5.10E-03	4.23E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	132	35.7	525.4	55.2	66.1	6.1	2.11	2.20	2.20	2.11	0.488	0.647	0.7	8.71E-04	5.30E-03	4.43E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	133	35.7	525.4	55.7	66.1	6.3	2.10	2.20	2.20	2.10	0.488	0.642	0.7	8.71E-04	5.53E-03	4.66E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	134	35.7	525.4	56.1	66.1	6.6	2.10	2.20	2.20	2.09	0.487	0.638	0.7	8.71E-04	5.78E-03	4.91E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	135	35.7	525.4	56.5	66.1	6.9	2.09	2.20	2.20	2.08	0.486	0.633	0.7	8.71E-04	6.04E-03	5.17E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	136	35.7	525.4	57.0	66.1	7.2	2.08	2.20	2.20	2.08	0.485	0.628	0.7	8.71E-04	6.32E-03	5.44E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	137	35.7	525.4	57.4	66.1	7.6	2.07	2.20	2.20	2.07	0.484	0.624	0.7	8.71E-04	6.62E-03	5.75E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	138	35.7	525.4	57.8	66.1	8.0	2.06	2.20	2.20	2.06	0.482	0.620	0.7	8.71E-04	6.96E-03	6.09E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	139	35.7	525.4	58.2	66.1	8.4	2.05	2.20	2.20	2.04	0.481	0.615	0.7	8.71E-04	7.33E-03	6.46E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	140	35.7	525.4	58.6	66.1	8.9	2.03	2.20	2.20	2.03	0.479	0.611	0.7	8.71E-04	7.71E-03	6.84E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	141	35.7	525.4	59.0	66.1	9.3	2.02	2.20	2.20	2.02	0.478	0.607	0.7	8.71E-04	8.13E-03	7.26E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	142	35.7	525.4	59.4	66.1	9.9	2.00	2.20	2.20	2.00	0.475	0.603	0.7	8.71E-04	8.65E-03	7.80E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O

T <sub>GE</sub> (°C)	T <sub>CO</sub> (°C)	T <sub>EV</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)	P <sub>CO</sub> (mmHg)	P <sub>EV</sub> (mmHg)	X <sub>AB</sub> (%w)	X <sub>GE</sub> (%w)	RF (dim)	Q <sub>GE</sub> (kW)	Q <sub>EV</sub> (kW)	Q <sub>CO</sub> (kW)	Q <sub>AB</sub> (kW)	COP <sub>E</sub> (dim)	COP <sub>C</sub> (dim)	η <sub>HX</sub> (dim)	M <sub>EV</sub> (kg/s)	M <sub>AB</sub> (kg/s)	M <sub>GE</sub> (kg/s)	Fluido
90	32	90	143	35.7	525.4	59.8	66.1	10.5	1.98	2.20	2.20	1.98	0.473	0.599	0.7	8.71E-04	9.18E-03	8.31E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	144	35.7	525.4	60.2	66.1	11.2	1.96	2.20	2.20	1.96	0.471	0.595	0.7	8.71E-04	9.72E-03	8.85E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	145	35.7	525.4	60.5	66.1	11.9	1.94	2.20	2.20	1.94	0.467	0.591	0.7	8.71E-04	1.04E-02	9.54E-03	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	146	35.7	525.4	60.9	66.1	12.8	1.91	2.20	2.20	1.91	0.464	0.587	0.7	8.71E-04	1.12E-02	1.03E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	147	35.7	525.4	61.3	66.1	13.8	1.88	2.20	2.20	1.88	0.460	0.584	0.7	8.71E-04	1.20E-02	1.11E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	148	35.7	525.4	61.6	66.1	14.9	1.85	2.20	2.20	1.84	0.455	0.580	0.7	8.71E-04	1.30E-02	1.21E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	149	35.7	525.4	62.0	66.1	16.2	1.80	2.20	2.20	1.80	0.449	0.576	0.7	8.71E-04	1.41E-02	1.32E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	150	35.7	525.4	62.3	66.1	17.7	1.75	2.20	2.20	1.75	0.443	0.573	0.7	8.71E-04	1.54E-02	1.46E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	151	35.7	525.4	62.7	66.1	19.6	1.69	2.20	2.20	1.69	0.434	0.569	0.7	8.71E-04	1.71E-02	1.62E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	152	35.7	525.4	63.1	66.1	21.9	1.62	2.20	2.20	1.61	0.423	0.566	0.7	8.71E-04	1.91E-02	1.82E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	153	35.7	525.4	63.4	66.1	24.4	1.53	2.20	2.20	1.53	0.410	0.563	0.7	8.71E-04	2.13E-02	2.04E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	154	35.7	525.4	63.7	66.1	28.2	1.41	2.20	2.20	1.41	0.390	0.559	0.7	8.71E-04	2.46E-02	2.37E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	155	35.7	525.4	64.0	66.1	32.6	1.27	2.20	2.20	1.26	0.364	0.556	0.7	8.71E-04	2.84E-02	2.76E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	156	35.7	525.4	64.4	66.1	38.8	1.06	2.20	2.20	1.06	0.325	0.553	0.7	8.71E-04	3.38E-02	3.29E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	157	35.7	525.4	64.7	66.1	47.7	0.77	2.20	2.20	0.77	0.258	0.550	0.7	8.71E-04	4.15E-02	4.07E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	158	35.7	525.4	65.0	66.1	62.2	0.29	2.20	2.20	0.29	0.116	0.547	0.7	8.71E-04	5.42E-02	5.33E-02	LiBr/H <sub>2</sub> O
90	32	90	121	35.7	525.4	56.3	73.8	4.2	2.11	2.20	2.20	2.11	0.489	0.707	0.7	8.71E-04	3.67E-03	2.80E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	122	35.7	525.4	56.9	73.8	4.4	2.11	2.20	2.20	2.11	0.488	0.701	0.7	8.71E-04	3.79E-03	2.92E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	123	35.7	525.4	57.4	73.8	4.5	2.11	2.20	2.20	2.10	0.488	0.695	0.7	8.71E-04	3.92E-03	3.05E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	124	35.7	525.4	57.9	73.8	4.6	2.11	2.20	2.20	2.10	0.488	0.689	0.7	8.71E-04	4.04E-03	3.17E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	125	35.7	525.4	58.4	73.8	4.8	2.10	2.20	2.20	2.10	0.488	0.684	0.7	8.71E-04	4.18E-03	3.31E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	126	35.7	525.4	58.9	73.8	5.0	2.10	2.20	2.20	2.10	0.487	0.678	0.7	8.71E-04	4.32E-03	3.45E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	127	35.7	525.4	59.4	73.8	5.1	2.10	2.20	2.20	2.09	0.487	0.673	0.7	8.71E-04	4.47E-03	3.60E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	128	35.7	525.4	59.9	73.8	5.3	2.09	2.20	2.20	2.09	0.487	0.667	0.7	8.71E-04	4.63E-03	3.76E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	129	35.7	525.4	60.4	73.8	5.5	2.09	2.20	2.20	2.09	0.486	0.662	0.7	8.71E-04	4.80E-03	3.93E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	130	35.7	525.4	60.9	73.8	5.7	2.09	2.20	2.20	2.08	0.486	0.657	0.7	8.71E-04	4.97E-03	4.10E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	131	35.7	525.4	61.4	73.8	5.9	2.08	2.20	2.20	2.08	0.485	0.652	0.7	8.71E-04	5.16E-03	4.29E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	132	35.7	525.4	61.8	73.8	6.2	2.07	2.20	2.20	2.07	0.484	0.647	0.7	8.71E-04	5.36E-03	4.49E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	133	35.7	525.4	62.3	73.8	6.4	2.07	2.20	2.20	2.06	0.484	0.642	0.7	8.71E-04	5.56E-03	4.69E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	134	35.7	525.4	62.7	73.8	6.7	2.06	2.20	2.20	2.06	0.483	0.638	0.7	8.71E-04	5.79E-03	4.92E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	135	35.7	525.4	63.2	73.8	6.9	2.05	2.20	2.20	2.05	0.482	0.633	0.7	8.71E-04	6.03E-03	5.16E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	136	35.7	525.4	63.6	73.8	7.2	2.04	2.20	2.20	2.04	0.481	0.628	0.7	8.71E-04	6.29E-03	5.42E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	137	35.7	525.4	64.0	73.8	7.5	2.04	2.20	2.20	2.03	0.480	0.624	0.7	8.71E-04	6.58E-03	5.71E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
90	32	90	138	35.7	525.4	64.5	73.8	7.9	2.03	2.20	2.20	2.02	0.478	0.620	0.7	8.71E-04	6.87E-03	6.00E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O

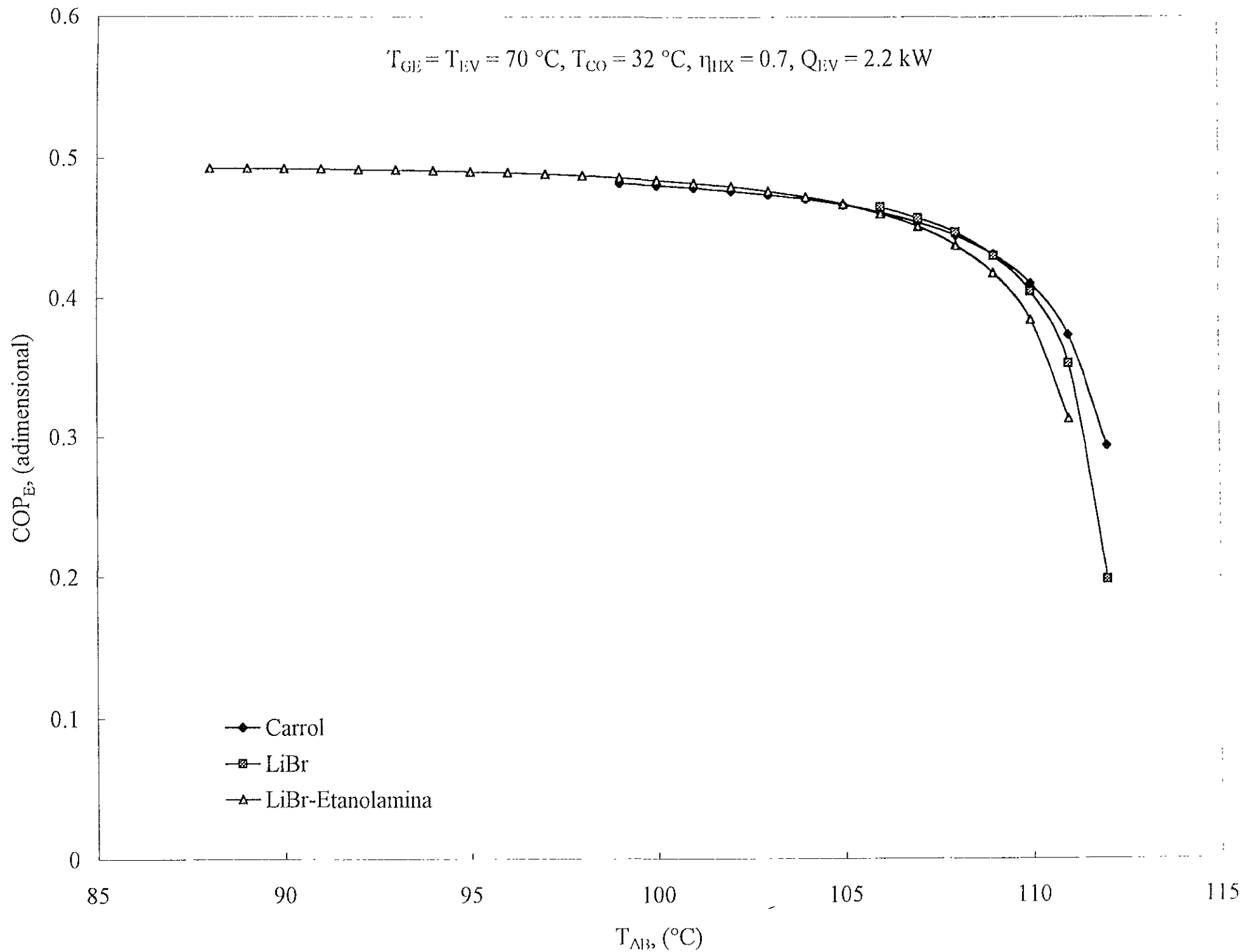
T <sub>g</sub> (°C)	T <sub>h</sub> (°C)	T <sub>c</sub> (°C)	T <sub>o</sub> (°C)	P <sub>g</sub> (mmHg)	P <sub>h</sub> (mmHg)	X <sub>g</sub> (%w)	X <sub>h</sub> (%w)	RF <sub>g</sub> (dim)	Q <sub>g</sub> (kW)	Q <sub>h</sub> (kW)	Q <sub>AB</sub> (kW)	Q <sub>PE</sub> (dim)	Q <sub>Fe</sub> (dim)	η <sub>g</sub> (dim)	M <sub>g</sub> (kg/s)	M <sub>h</sub> (kg/s)	M <sub>AB</sub> (kg/s)	M <sub>Fe</sub> (kg/s)	Units
90	32	90	140	35.7	525.4	65.3	73.8	8.7	2.00	2.20	2.20	2.00	0.475	0.611	0.7	8.71E-04	7.55E-03	6.68E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	141	35.7	525.4	65.7	73.8	9.1	1.99	2.20	2.20	1.98	0.474	0.607	0.7	8.71E-04	7.94E-03	7.07E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	142	35.7	525.4	66.1	73.8	9.6	1.97	2.20	2.20	1.97	0.472	0.603	0.7	8.71E-04	8.35E-03	7.48E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	143	35.7	525.4	66.5	73.8	10.1	1.96	2.20	2.20	1.95	0.470	0.599	0.7	8.71E-04	8.83E-03	7.96E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	144	35.7	525.4	66.9	73.8	10.7	1.94	2.20	2.20	1.93	0.467	0.595	0.7	8.71E-04	9.35E-03	8.48E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	145	35.7	525.4	67.3	73.8	11.4	1.91	2.20	2.20	1.91	0.464	0.591	0.7	8.71E-04	9.93E-03	9.05E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	146	35.7	525.4	67.7	73.8	12.1	1.89	2.20	2.20	1.89	0.461	0.587	0.7	8.71E-04	1.06E-02	9.71E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	147	35.7	525.4	68.1	73.8	13.0	1.86	2.20	2.20	1.86	0.458	0.584	0.7	8.71E-04	1.13E-02	1.04E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	148	35.7	525.4	68.5	73.8	13.9	1.83	2.20	2.20	1.83	0.453	0.580	0.7	8.71E-04	1.21E-02	1.13E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	149	35.7	525.4	68.9	73.8	15.0	1.80	2.20	2.20	1.79	0.448	0.576	0.7	8.71E-04	1.31E-02	1.22E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	150	35.7	525.4	69.3	73.8	16.3	1.75	2.20	2.20	1.75	0.442	0.573	0.7	8.71E-04	1.42E-02	1.33E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	151	35.7	525.4	69.7	73.8	17.7	1.70	2.20	2.20	1.70	0.435	0.569	0.7	8.71E-04	1.55E-02	1.46E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	152	35.7	525.4	70.0	73.8	19.5	1.64	2.20	2.20	1.64	0.427	0.566	0.7	8.71E-04	1.70E-02	1.61E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	153	35.7	525.4	70.4	73.8	21.7	1.57	2.20	2.20	1.57	0.415	0.563	0.7	8.71E-04	1.89E-02	1.80E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	154	35.7	525.4	70.8	73.8	24.3	1.48	2.20	2.20	1.48	0.402	0.559	0.7	8.71E-04	2.12E-02	2.03E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	155	35.7	525.4	71.2	73.8	27.8	1.37	2.20	2.20	1.36	0.382	0.556	0.7	8.71E-04	2.42E-02	2.33E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	156	35.7	525.4	71.5	73.8	32.1	1.22	2.20	2.20	1.21	0.355	0.553	0.7	8.71E-04	2.80E-02	2.71E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	157	35.7	525.4	71.9	73.8	38.1	1.02	2.20	2.20	1.01	0.315	0.550	0.7	8.71E-04	3.32E-02	3.23E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	158	35.7	525.4	72.2	73.8	46.7	0.72	2.20	2.20	0.72	0.246	0.547	0.7	8.71E-04	4.07E-02	3.98E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
90	32	90	159	35.7	525.4	72.6	73.8	60.5	0.25	2.20	2.20	0.25	0.102	0.544	0.7	8.71E-04	5.27E-02	5.18E-02	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	132	35.7	759.4	56.2	78.2	3.5	2.12	2.20	2.21	2.11	0.489	0.738	0.7	8.65E-04	3.07E-03	2.21E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	133	35.7	759.4	56.7	78.2	3.6	2.12	2.20	2.21	2.11	0.489	0.733	0.7	8.65E-04	3.15E-03	2.28E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	134	35.7	759.4	57.3	78.2	3.7	2.12	2.20	2.21	2.11	0.489	0.727	0.7	8.65E-04	3.23E-03	2.36E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	135	35.7	759.4	57.8	78.2	3.8	2.12	2.20	2.21	2.11	0.489	0.722	0.7	8.65E-04	3.31E-03	2.44E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	136	35.7	759.4	58.3	78.2	3.9	2.12	2.20	2.21	2.11	0.489	0.717	0.7	8.65E-04	3.40E-03	2.53E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	137	35.7	759.4	58.8	78.2	4.0	2.12	2.20	2.21	2.11	0.489	0.712	0.7	8.65E-04	3.48E-03	2.61E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	138	35.7	759.4	59.3	78.2	4.1	2.11	2.20	2.21	2.11	0.489	0.707	0.7	8.65E-04	3.57E-03	2.71E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	139	35.7	759.4	59.7	78.2	4.2	2.11	2.20	2.21	2.11	0.488	0.702	0.7	8.65E-04	3.66E-03	2.80E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	140	35.7	759.4	60.2	78.2	4.3	2.11	2.20	2.21	2.10	0.488	0.697	0.7	8.65E-04	3.76E-03	2.89E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	141	35.7	759.4	60.7	78.2	4.5	2.11	2.20	2.21	2.10	0.488	0.692	0.7	8.65E-04	3.86E-03	2.99E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	142	35.7	759.4	61.1	78.2	4.6	2.11	2.20	2.21	2.10	0.488	0.688	0.7	8.65E-04	3.96E-03	3.09E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	143	35.7	759.4	61.6	78.2	4.7	2.10	2.20	2.21	2.10	0.487	0.683	0.7	8.65E-04	4.07E-03	3.20E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	144	35.7	759.4	62.0	78.2	4.8	2.10	2.20	2.21	2.09	0.487	0.679	0.7	8.65E-04	4.18E-03	3.31E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	145	35.7	759.4	62.5	78.2	5.0	2.10	2.20	2.21	2.09	0.487	0.674	0.7	8.65E-04	4.30E-03	3.43E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	146	35.7	759.4	62.9	78.2	5.1	2.09	2.20	2.21	2.09	0.486	0.670	0.7	8.65E-04	4.42E-03	3.55E-03	CARROL H <sub>2</sub> O
100	32	100	147	35.7	759.4	63.3	78.2	5.3	2.09	2.20	2.21	2.08	0.486	0.666	0.7	8.65E-04	4.54E-03	3.68E-03	CARROL H <sub>2</sub> O

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{LV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%w)	$X_{GE}$ (%w)	RF (dim)	$Q_{GE}$ (kW)	$Q_{LV}$ (kW)	$Q_{CO}$ (kW)	$Q_{AB}$ (kW)	$COP_E$ (dim)	$COP_C$ (dim)	$\eta_{HX}$ (dim)	$M_{EV}$ (kg/s)	$M_{AB}$ (kg/s)	$M_{GE}$ (kg/s)	Fluido
100	32	100	148	35.7	759.4	63.8	78.2	5.4	2.08	2.20	2.21	2.08	0.485	0.662	0.7	8.65E-04	4.68E-03	3.82E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	149	35.7	759.4	64.2	78.2	5.6	2.08	2.20	2.21	2.07	0.485	0.658	0.7	8.65E-04	4.82E-03	3.95E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	150	35.7	759.4	64.6	78.2	5.7	2.07	2.20	2.21	2.07	0.484	0.654	0.7	8.65E-04	4.96E-03	4.10E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	151	35.7	759.4	65.0	78.2	5.9	2.07	2.20	2.21	2.06	0.483	0.650	0.7	8.65E-04	5.12E-03	4.26E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	152	35.7	759.4	65.4	78.2	6.1	2.06	2.20	2.21	2.06	0.483	0.646	0.7	8.65E-04	5.28E-03	4.42E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	153	35.7	759.4	65.8	78.2	6.3	2.06	2.20	2.21	2.05	0.482	0.642	0.7	8.65E-04	5.45E-03	4.59E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	154	35.7	759.4	66.2	78.2	6.5	2.05	2.20	2.21	2.04	0.481	0.638	0.7	8.65E-04	5.63E-03	4.77E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	155	35.7	759.4	66.6	78.2	6.7	2.04	2.20	2.21	2.04	0.480	0.634	0.7	8.65E-04	5.83E-03	4.96E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	156	35.7	759.4	67.0	78.2	7.0	2.03	2.20	2.21	2.03	0.479	0.631	0.7	8.65E-04	6.02E-03	5.16E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	157	35.7	759.4	67.4	78.2	7.2	2.03	2.20	2.21	2.02	0.478	0.627	0.7	8.65E-04	6.25E-03	5.38E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	158	35.7	759.4	67.8	78.2	7.5	2.02	2.20	2.21	2.01	0.477	0.624	0.7	8.65E-04	6.47E-03	5.61E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	159	35.7	759.4	68.1	78.2	7.8	2.01	2.20	2.21	2.00	0.476	0.620	0.7	8.65E-04	6.72E-03	5.85E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	160	35.7	759.4	68.5	78.2	8.1	1.99	2.20	2.21	1.99	0.474	0.617	0.7	8.65E-04	6.98E-03	6.11E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	161	35.7	759.4	68.9	78.2	8.4	1.98	2.20	2.21	1.98	0.473	0.613	0.7	8.65E-04	7.26E-03	6.40E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	162	35.7	759.4	69.3	78.2	8.7	1.97	2.20	2.21	1.96	0.471	0.610	0.7	8.65E-04	7.56E-03	6.69E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	163	35.7	759.4	69.6	78.2	9.1	1.96	2.20	2.21	1.95	0.469	0.607	0.7	8.65E-04	7.89E-03	7.03E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	164	35.7	759.4	70.0	78.2	9.5	1.94	2.20	2.21	1.94	0.467	0.604	0.7	8.65E-04	8.24E-03	7.37E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	165	35.7	759.4	70.4	78.2	10.0	1.92	2.20	2.21	1.92	0.465	0.600	0.7	8.65E-04	8.61E-03	7.75E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	166	35.7	759.4	70.7	78.2	10.4	1.91	2.20	2.21	1.90	0.463	0.597	0.7	8.65E-04	9.03E-03	8.16E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	167	35.7	759.4	71.1	78.2	11.0	1.89	2.20	2.21	1.88	0.460	0.594	0.7	8.65E-04	9.48E-03	8.62E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	168	35.7	759.4	71.4	78.2	11.5	1.87	2.20	2.21	1.86	0.457	0.591	0.7	8.65E-04	9.99E-03	9.12E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	169	35.7	759.4	71.8	78.2	12.1	1.84	2.20	2.21	1.84	0.454	0.588	0.7	8.65E-04	1.05E-02	9.65E-03	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	170	35.7	759.4	72.1	78.2	12.9	1.81	2.20	2.21	1.81	0.451	0.585	0.7	8.65E-04	1.11E-02	1.03E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	171	35.7	759.4	72.5	78.2	13.6	1.78	2.20	2.21	1.78	0.447	0.582	0.7	8.65E-04	1.18E-02	1.09E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	172	35.7	759.4	72.8	78.2	14.5	1.75	2.20	2.21	1.75	0.442	0.579	0.7	8.65E-04	1.25E-02	1.17E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	173	35.7	759.4	73.2	78.2	15.5	1.71	2.20	2.21	1.71	0.437	0.577	0.7	8.65E-04	1.34E-02	1.25E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	174	35.7	759.4	73.5	78.2	16.6	1.67	2.20	2.21	1.67	0.430	0.574	0.7	8.65E-04	1.43E-02	1.35E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	175	35.7	759.4	73.8	78.2	17.9	1.62	2.20	2.21	1.62	0.423	0.571	0.7	8.65E-04	1.55E-02	1.46E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	176	35.7	759.4	74.2	78.2	19.4	1.56	2.20	2.21	1.56	0.414	0.568	0.7	8.65E-04	1.68E-02	1.59E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	177	35.7	759.4	74.5	78.2	21.0	1.50	2.20	2.21	1.49	0.404	0.566	0.7	8.65E-04	1.82E-02	1.73E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	178	35.7	759.4	74.8	78.2	23.1	1.42	2.20	2.21	1.41	0.390	0.563	0.7	8.65E-04	2.00E-02	1.92E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	179	35.7	759.4	75.2	78.2	25.6	1.32	2.20	2.21	1.32	0.374	0.561	0.7	8.65E-04	2.21E-02	2.13E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	180	35.7	759.4	75.5	78.2	28.6	1.21	2.20	2.21	1.20	0.353	0.558	0.7	8.65E-04	2.47E-02	2.38E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	181	35.7	759.4	75.8	78.2	32.3	1.06	2.20	2.21	1.05	0.324	0.555	0.7	8.65E-04	2.80E-02	2.71E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	182	35.7	759.4	76.1	78.2	37.3	0.87	2.20	2.21	0.86	0.281	0.553	0.7	8.65E-04	3.22E-02	3.14E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O
100	32	100	183	35.7	759.4	76.4	78.2	43.0	0.61	2.20	2.21	0.60	0.235	0.551	0.7	8.65E-04	3.70E-02	3.70E-02	CARROL/H <sub>2</sub> O

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%w)	$X_{GE}$ (%w)	RF (dim)	$Q_{GE}$ (kW)	$Q_{EV}$ (kW)	$Q_{CO}$ (kW)	$Q_{AB}$ (kW)	COPE (dim)	COPC (dim)	$\eta_{HX}$ (dim)	$M_{LV}$ (kg/s)	$M_{AB}$ (kg/s)	$M_{GE}$ (kg/s)	Fluido
100	32	40	105	35.7	55.4	65.4	67.0	41.9	2.45	2.20	2.30	2.35	0.506	0.665	0.7	9.02E-04	3.78E-02	3.69E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
100	32	40	106	35.7	55.4	65.8	67.0	55.8	2.37	2.20	2.30	2.27	0.497	0.624	0.7	9.02E-04	5.03E-02	4.94E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
100	32	40	107	35.7	55.4	66.1	67.0	74.4	2.25	2.20	2.30	2.15	0.483	0.587	0.7	9.02E-04	6.71E-02	6.62E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
110	32	40	111	35.7	55.4	67.3	69.8	27.9	2.72	2.20	2.31	2.60	0.529	0.910	0.7	9.02E-04	2.52E-02	2.43E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
110	32	40	112	35.7	55.4	67.6	69.8	31.7	2.70	2.20	2.31	2.59	0.528	0.835	0.7	9.02E-04	2.86E-02	2.77E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
110	32	40	113	35.7	55.4	67.9	69.8	36.7	2.68	2.20	2.31	2.56	0.526	0.771	0.7	9.02E-04	3.31E-02	3.22E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
110	32	40	114	35.7	55.4	68.2	69.8	43.6	2.64	2.20	2.31	2.53	0.522	0.717	0.7	9.02E-04	3.93E-02	3.84E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
110	32	40	115	35.7	55.4	68.5	69.8	53.7	2.59	2.20	2.31	2.48	0.517	0.671	0.7	9.02E-04	4.84E-02	4.75E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
110	32	40	116	35.7	55.4	68.8	69.8	69.8	2.50	2.20	2.31	2.38	0.507	0.630	0.7	9.02E-04	6.29E-02	6.20E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
110	32	40	117	35.7	55.4	69.1	69.8	99.7	2.32	2.20	2.31	2.21	0.488	0.594	0.7	9.02E-04	8.99E-02	8.90E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	40	121	35.7	55.4	70.2	72.4	32.9	2.93	2.20	2.33	2.80	0.546	0.912	0.7	9.02E-04	2.97E-02	2.88E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	40	122	35.7	55.4	70.5	72.4	38.1	2.92	2.20	2.33	2.79	0.545	0.838	0.7	9.02E-04	3.44E-02	3.35E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	40	123	35.7	55.4	70.7	72.4	42.6	2.89	2.20	2.33	2.76	0.542	0.776	0.7	9.02E-04	3.84E-02	3.75E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	40	124	35.7	55.4	71.0	72.4	51.7	2.85	2.20	2.33	2.72	0.539	0.722	0.7	9.02E-04	4.66E-02	4.57E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	40	125	35.7	55.4	71.3	72.4	65.8	2.79	2.20	2.33	2.66	0.533	0.676	0.7	9.02E-04	5.93E-02	5.84E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	40	126	35.7	55.4	71.5	72.4	80.4	2.70	2.20	2.33	2.57	0.524	0.636	0.7	9.02E-04	7.25E-02	7.16E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	40	131	35.7	55.4	72.8	74.8	37.4	3.19	2.20	2.35	3.04	0.564	0.914	0.7	9.02E-04	3.37E-02	3.28E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	40	132	35.7	55.4	73.1	74.8	44.0	3.17	2.20	2.35	3.02	0.563	0.842	0.7	9.02E-04	3.97E-02	3.88E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	40	133	35.7	55.4	73.3	74.8	49.9	3.14	2.20	2.35	3.00	0.561	0.780	0.7	9.02E-04	4.50E-02	4.41E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	40	134	35.7	55.4	73.5	74.8	57.5	3.10	2.20	2.35	2.96	0.557	0.727	0.7	9.02E-04	5.19E-02	5.10E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	40	135	35.7	55.4	73.8	74.8	74.8	3.03	2.20	2.35	2.89	0.552	0.682	0.7	9.02E-04	6.74E-02	6.65E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	40	136	35.7	55.4	74.0	74.8	93.5	2.93	2.20	2.35	2.79	0.543	0.641	0.7	9.02E-04	8.43E-02	8.34E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
110	32	50	129	35.7	92.6	69.0	69.8	87.3	1.63	2.20	2.30	1.53	0.400	0.555	0.7	8.95E-04	7.81E-02	7.72E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	50	129	35.7	92.6	69.0	72.4	21.3	2.72	2.20	2.31	2.61	0.530	0.725	0.7	8.95E-04	1.91E-02	1.82E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	50	130	35.7	92.6	69.3	72.4	23.4	2.71	2.20	2.31	2.59	0.528	0.704	0.7	8.95E-04	2.09E-02	2.00E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	50	131	35.7	92.6	69.6	72.4	25.9	2.68	2.20	2.31	2.57	0.526	0.684	0.7	8.95E-04	2.31E-02	2.23E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	50	132	35.7	92.6	69.9	72.4	29.0	2.66	2.20	2.31	2.54	0.523	0.666	0.7	8.95E-04	2.59E-02	2.50E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	50	133	35.7	92.6	70.1	72.4	31.5	2.62	2.20	2.31	2.51	0.520	0.648	0.7	8.95E-04	2.82E-02	2.73E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	50	134	35.7	92.6	70.4	72.4	36.2	2.57	2.20	2.31	2.46	0.515	0.632	0.7	8.95E-04	3.24E-02	3.15E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	50	135	35.7	92.6	70.7	72.4	42.6	2.50	2.20	2.31	2.38	0.508	0.616	0.7	8.95E-04	3.81E-02	3.72E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O

T <sub>GE</sub> (°C)	T <sub>CO</sub> (°C)	T <sub>EV</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)	P <sub>CO</sub> (mmHg)	P <sub>EV</sub> (mmHg)	X <sub>AB</sub> (%w)	X <sub>GE</sub> (%w)	RF (dim)	Q <sub>GE</sub> (kW)	Q <sub>EV</sub> (kW)	Q <sub>CO</sub> (kW)	Q <sub>AB</sub> (kW)	COP <sub>E</sub> (dim)	COP <sub>C</sub> (dim)	η <sub>HX</sub> (dim)	M <sub>EV</sub> (kg/s)	M <sub>AB</sub> (kg/s)	M <sub>GE</sub> (kg/s)	Fluido
120	32	50	136	35.7	92.6	71.0	72.4	51.7	2.39	2.20	2.31	2.28	0.496	0.601	0.7	8.95E-04	4.63E-02	4.54E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	50	137	35.7	92.6	71.2	72.4	60.3	2.27	2.20	2.31	2.16	0.483	0.587	0.7	8.95E-04	5.40E-02	5.31E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
120	32	50	138	35.7	92.6	71.5	72.4	80.4	2.02	2.20	2.31	1.91	0.452	0.574	0.7	8.95E-04	7.20E-02	7.11E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	131	35.7	92.6	69.6	74.8	14.4	2.99	2.20	2.33	2.86	0.551	0.960	0.7	8.95E-04	1.29E-02	1.20E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	132	35.7	92.6	69.9	74.8	15.3	2.99	2.20	2.33	2.86	0.551	0.923	0.7	8.95E-04	1.37E-02	1.28E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	133	35.7	92.6	70.1	74.8	15.9	2.99	2.20	2.33	2.86	0.551	0.889	0.7	8.95E-04	1.42E-02	1.34E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	134	35.7	92.6	70.4	74.8	17.0	2.99	2.20	2.33	2.86	0.551	0.857	0.7	8.95E-04	1.52E-02	1.43E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	135	35.7	92.6	70.7	74.8	18.2	2.99	2.20	2.33	2.86	0.551	0.828	0.7	8.95E-04	1.63E-02	1.54E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	136	35.7	92.6	71.0	74.8	19.7	2.98	2.20	2.33	2.85	0.550	0.801	0.7	8.95E-04	1.76E-02	1.67E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	137	35.7	92.6	71.2	74.8	20.8	2.97	2.20	2.33	2.84	0.549	0.776	0.7	8.95E-04	1.86E-02	1.77E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	138	35.7	92.6	71.5	74.8	22.7	2.96	2.20	2.33	2.83	0.549	0.752	0.7	8.95E-04	2.03E-02	1.94E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	139	35.7	92.6	71.8	74.8	24.9	2.95	2.20	2.33	2.82	0.547	0.730	0.7	8.95E-04	2.23E-02	2.14E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	140	35.7	92.6	72.0	74.8	26.7	2.93	2.20	2.33	2.80	0.546	0.709	0.7	8.95E-04	2.39E-02	2.30E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	141	35.7	92.6	72.3	74.8	29.9	2.91	2.20	2.33	2.78	0.544	0.690	0.7	8.95E-04	2.68E-02	2.59E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	142	35.7	92.6	72.6	74.8	34.0	2.87	2.20	2.33	2.74	0.541	0.671	0.7	8.95E-04	3.04E-02	2.95E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	143	35.7	92.6	72.8	74.8	37.4	2.83	2.20	2.33	2.70	0.537	0.654	0.7	8.95E-04	3.35E-02	3.26E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	144	35.7	92.6	73.1	74.8	44.0	2.77	2.20	2.33	2.64	0.531	0.637	0.7	8.95E-04	3.94E-02	3.85E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	145	35.7	92.6	73.3	74.8	49.9	2.70	2.20	2.33	2.57	0.525	0.622	0.7	8.95E-04	4.46E-02	4.37E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	146	35.7	92.6	73.6	74.8	62.3	2.57	2.20	2.33	2.44	0.512	0.607	0.7	8.95E-04	5.58E-02	5.49E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O
130	32	50	147	35.7	92.6	73.8	74.8	74.8	2.43	2.20	2.33	2.30	0.496	0.593	0.7	8.95E-04	6.70E-02	6.61E-02	NaOH-CsOH-KOH-H <sub>2</sub> O





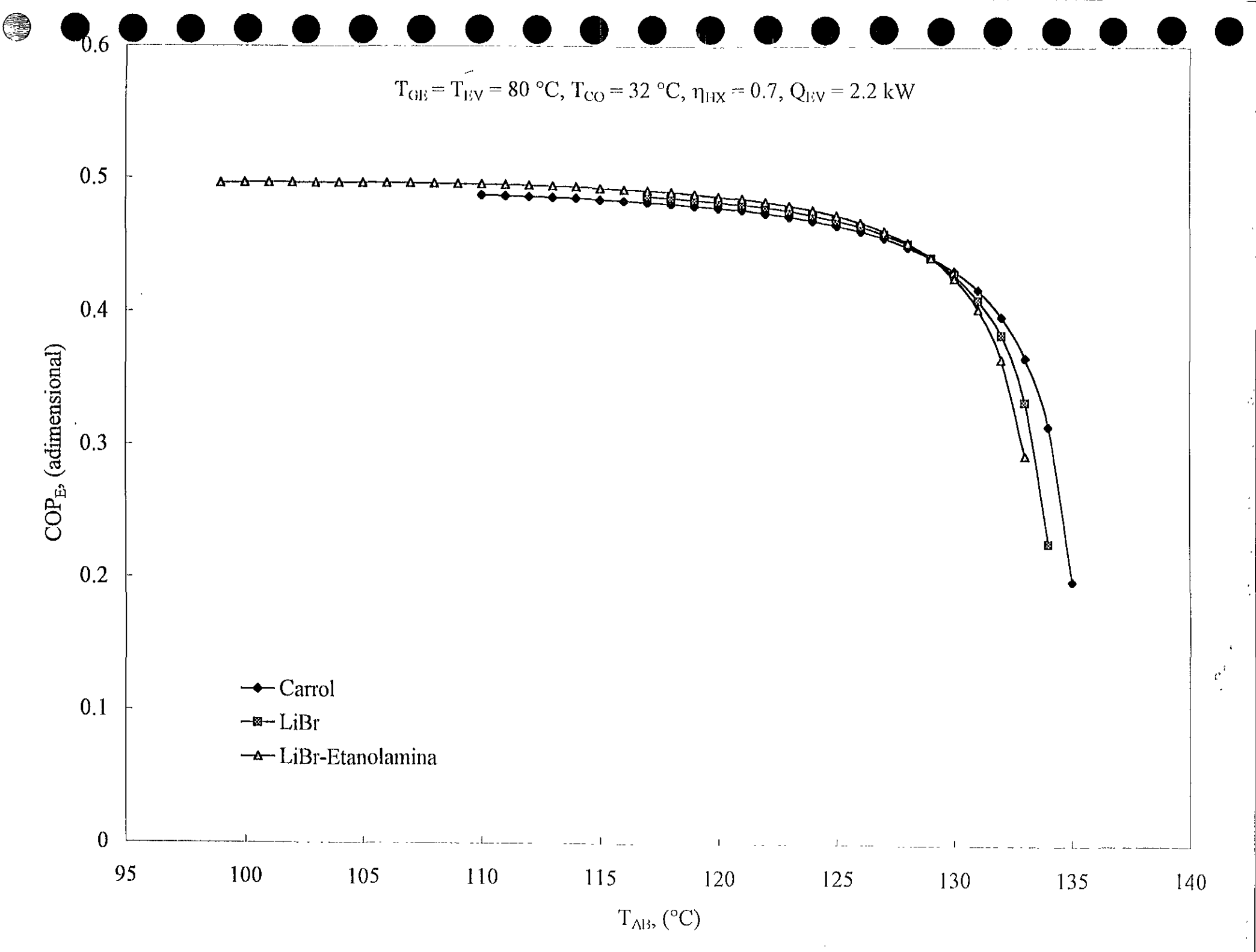
COP<sub>E</sub>, (adimensional)

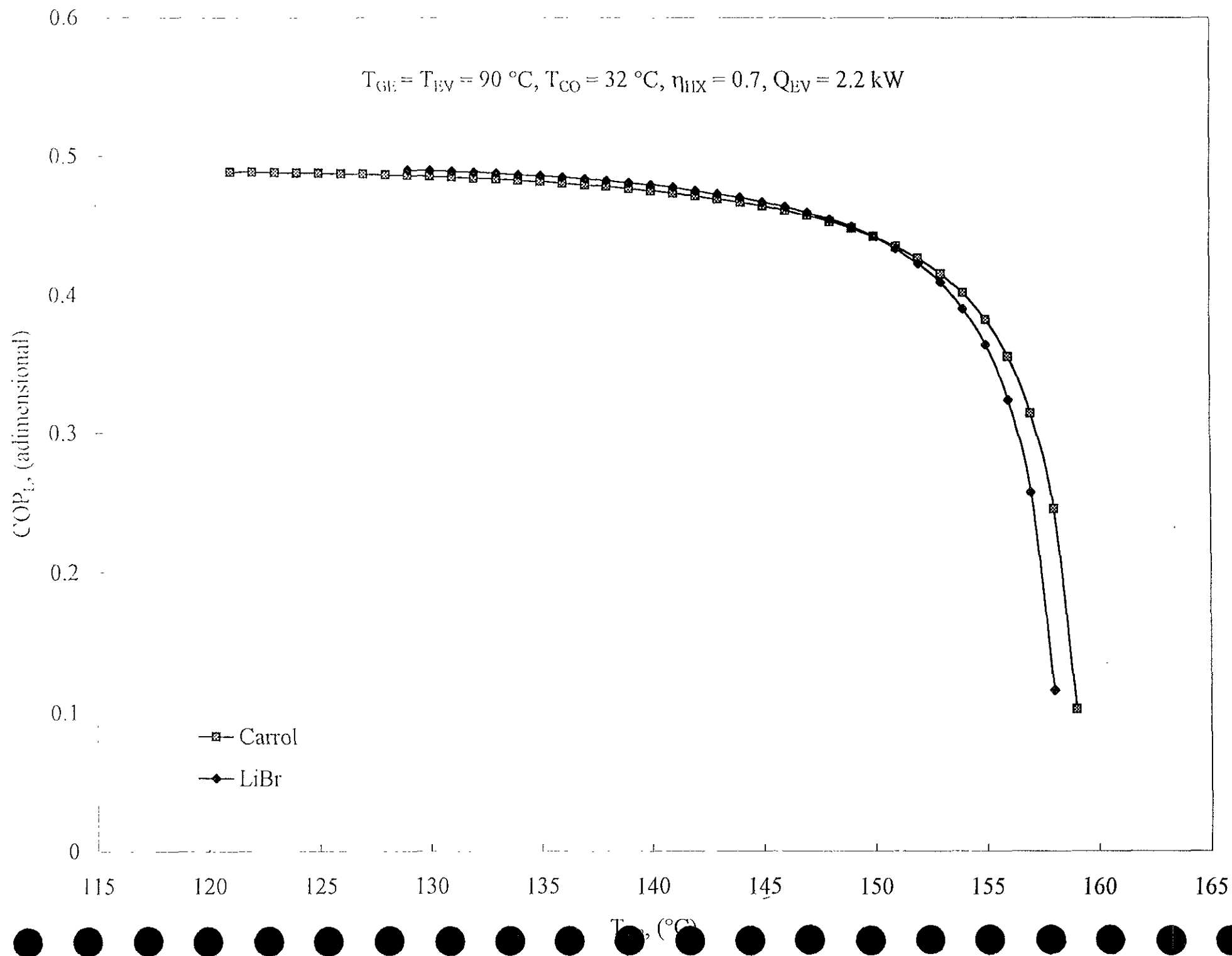
$T_{GE} = T_{EV} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{CO} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\eta_{HX} = 0.7$ ,  $Q_{EV} = 2.2\text{ kW}$

- Carrol
- LiBr
- ▲ LiBr-Etanolamina

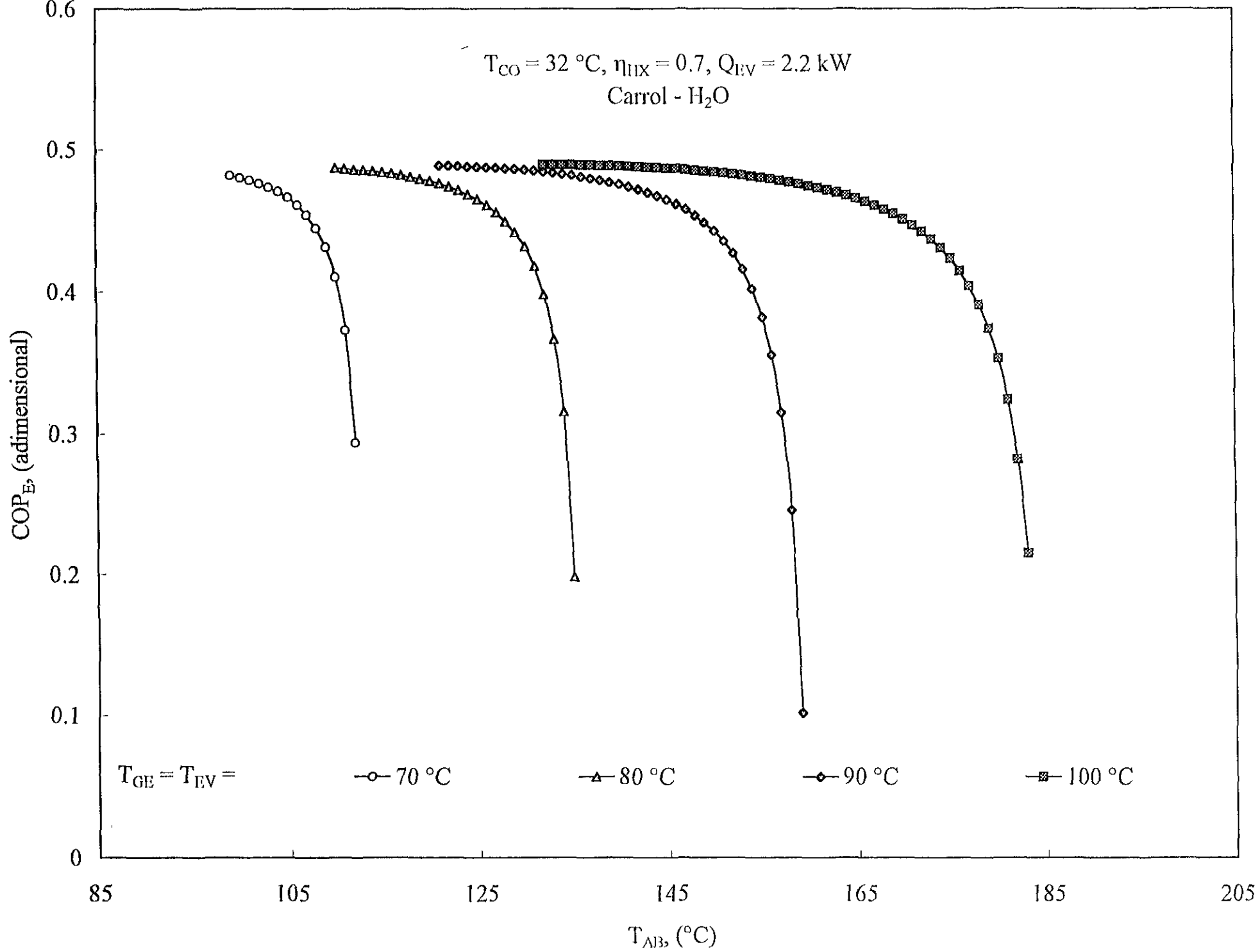
95 100 105 110 115 120 125 130 135 140

$T_{AB}, (^{\circ}\text{C})$





$T_{CO} = 32\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\eta_{HX} = 0.7$ ,  $Q_{EV} = 2.2\text{ kW}$   
Carrol - H<sub>2</sub>O



$T_{GE} = T_{EV} =$

○ 70 °C

△ 80 °C

◇ 90 °C

■ 100 °C

85

105

125

145

165

185

205

T<sub>AB</sub>, (°C)

Apéndice B.- IMÁGENES DE LOS COMPONENTES CONSTRUIDOS DE UN TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA (TTA) E INTERCONEXIÓN DE LOS MISMOS

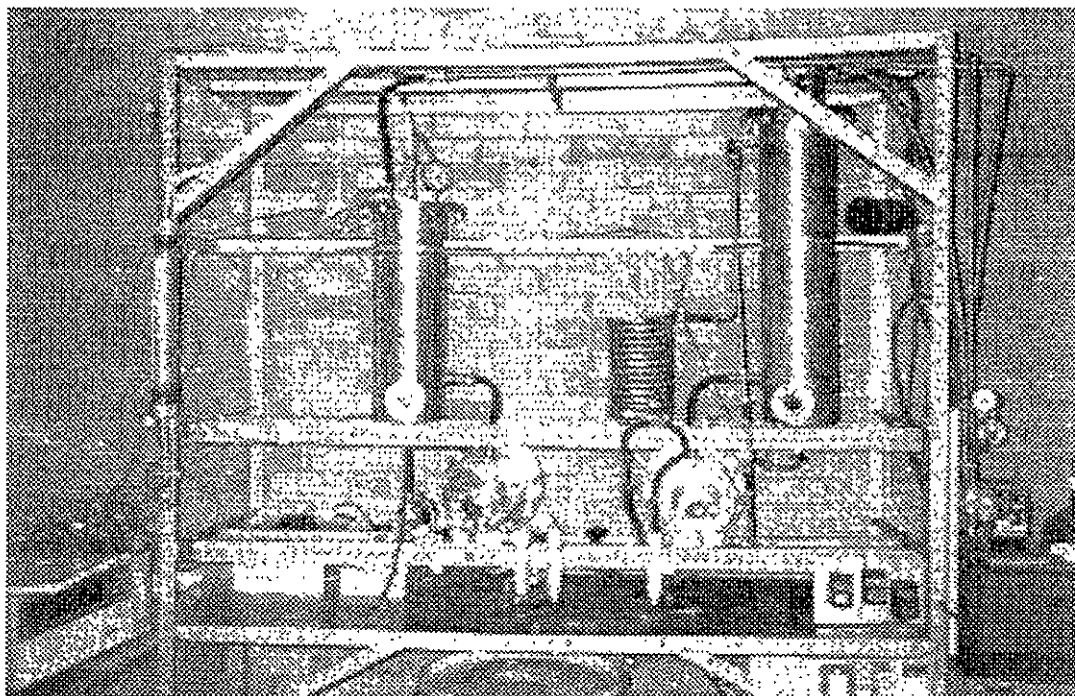


Figura B.1. Vista frontal del TTA diseñado y construido en el CIE – UNAM

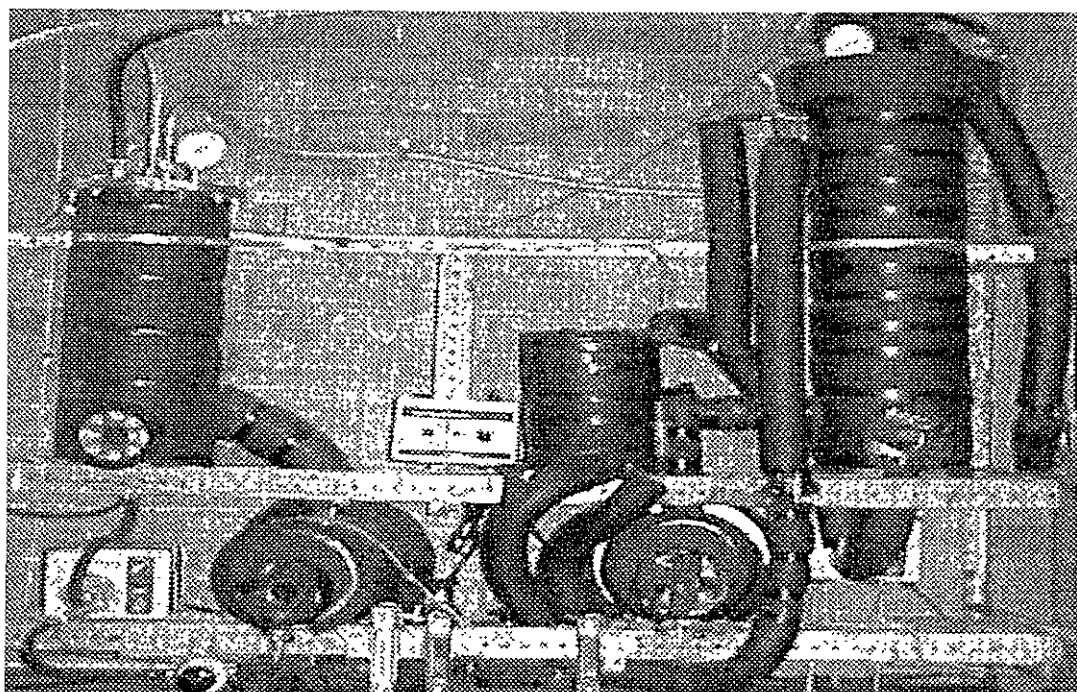


Figura B.2. Vista frontal del TTA aislado térmicamente para la evaluación experimental de condiciones de operación.

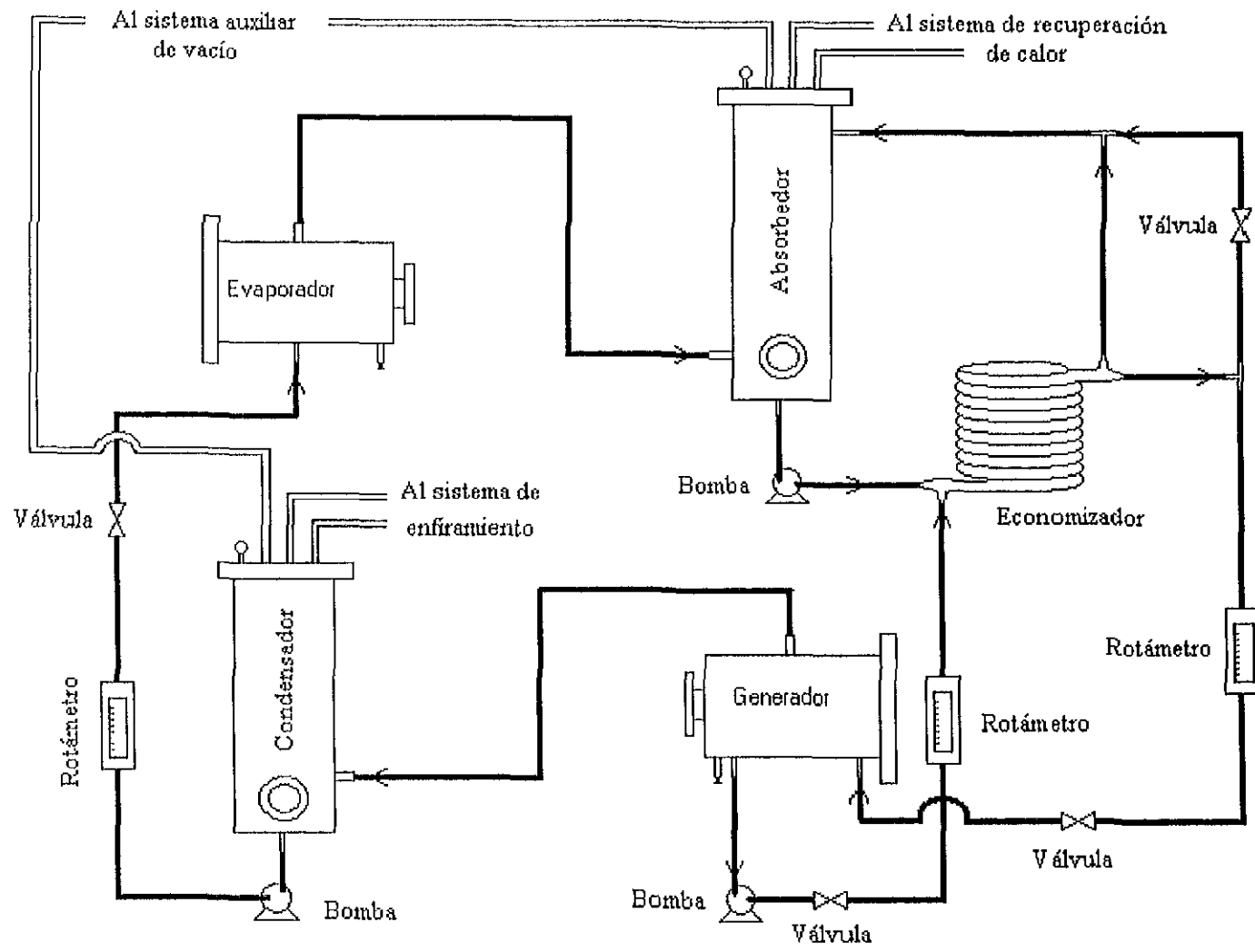


Figura B.3. Diagrama esquemático de interconexión de los componentes que forman un TTA, así como de los sistemas auxiliares para su operación.

## Apéndice C.- DATOS TERMODINÁMICOS PARA EL ACOPLAMIENTO DE TRANSFORMADORES TÉRMICOS POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA (TTA) EN UN ESQUEMA DE REFINACIÓN DE PETRÓLEO

Los siguientes datos han sido calculados con el modelo mostrado utilizando la mezcla Carrol – agua. Cada renglón es una condición teórica posible para el acoplamiento de un TTA en las condiciones que se muestran de generación y evaporación al mismo nivel térmico y con la consideración de condensación señalada para cada caso.

Dependiendo de las necesidades de energía, incluido el nivel térmico, se obtiene un Coeficiente de operación (COP) (definido en el capítulo 1).

Como se explicó (en el capítulo 9 de esta tesis), se puede utilizar la eficiencia termodinámica ( $E_{th}$ ) para poder considerar valores de optimación, sin embargo, la decisión final de operación está a cargo de los departamentos de ingeniería de proceso, para determinar las corrientes energéticas a las que se integrará un calor revalorizado.

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%v)	$X_{GH}$ (%v)	$\Delta T$ (°C)	FR (adim)	$Q_{GE}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{CO}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{AB}/Q_{EV}$ (adim)	$COP_E$ (adim)	$COP_C$ (adim)	$E_{th}$ (adim)	$\eta_{IX}$ (adim)
52.7	16	52.7	71	13.6	105.7	45.0	57.8	18.3	4.5	0.938	1.001	0.937	0.484	0.705	0.686	0
52.7	16	52.7	72	13.6	105.7	45.6	57.8	19.3	4.7	0.932	1.001	0.932	0.482	0.694	0.695	0
52.7	16	52.7	73	13.6	105.7	46.3	57.8	20.3	5.0	0.926	1.001	0.926	0.481	0.684	0.703	0
52.7	16	52.7	74	13.6	105.7	46.9	57.8	21.3	5.3	0.920	1.001	0.919	0.479	0.674	0.710	0
52.7	16	52.7	75	13.6	105.7	47.5	57.8	22.3	5.6	0.912	1.001	0.912	0.477	0.665	0.717	0
52.7	16	52.7	76	13.6	105.7	48.1	57.8	23.3	5.9	0.904	1.001	0.903	0.474	0.655	0.724	0
52.7	16	52.7	77	13.6	105.7	48.7	57.8	24.3	6.3	0.894	1.001	0.893	0.472	0.647	0.729	0
52.7	16	52.7	78	13.6	105.7	49.2	57.8	25.3	6.7	0.882	1.001	0.882	0.468	0.638	0.734	0
52.7	16	52.7	79	13.6	105.7	49.8	57.8	26.3	7.2	0.869	1.001	0.869	0.465	0.630	0.738	0
52.7	16	52.7	80	13.6	105.7	50.3	57.8	27.3	7.7	0.854	1.001	0.853	0.460	0.622	0.741	0
52.7	16	52.7	81	13.6	105.7	50.9	57.8	28.3	8.3	0.836	1.001	0.835	0.455	0.614	0.741	0
52.7	16	52.7	82	13.6	105.7	51.4	57.8	29.3	9.0	0.815	1.001	0.815	0.449	0.606	0.740	0
52.7	16	52.7	83	13.6	105.7	52.0	57.8	30.3	9.9	0.789	1.001	0.789	0.441	0.599	0.736	0
52.7	16	52.7	84	13.6	105.7	52.5	57.8	31.3	10.9	0.759	1.001	0.759	0.431	0.592	0.729	0
52.7	16	52.7	85	13.6	105.7	53.0	57.8	32.3	11.9	0.725	1.001	0.724	0.420	0.585	0.718	0
52.7	16	52.7	86	13.6	105.7	53.5	57.8	33.3	13.4	0.679	1.001	0.679	0.404	0.578	0.699	0
52.7	16	52.7	87	13.6	105.7	54.0	57.8	34.3	15.2	0.620	1.001	0.620	0.382	0.571	0.669	0
52.7	16	52.7	88	13.6	105.7	54.5	57.8	35.3	17.5	0.548	1.001	0.547	0.354	0.565	0.626	0
52.7	16	52.7	89	13.6	105.7	55.0	57.8	36.3	20.4	0.450	1.001	0.450	0.310	0.559	0.555	0
52.7	16	52.7	90	13.6	105.7	55.5	57.8	37.3	24.7	0.311	1.001	0.311	0.237	0.553	0.429	0
54.3	24	54.3	73	22.4	114.2	45.2	53.9	18.7	6.2	0.904	1.000	0.904	0.475	0.654	0.726	0
54.3	24	54.3	74	22.4	114.2	45.8	53.9	19.7	6.6	0.893	1.000	0.892	0.471	0.642	0.734	0
54.3	24	54.3	75	22.4	114.2	46.4	53.9	20.7	7.2	0.879	1.000	0.879	0.468	0.632	0.740	0
54.3	24	54.3	76	22.4	114.2	47.0	53.9	21.7	7.8	0.864	1.000	0.864	0.463	0.621	0.746	0
54.3	24	54.3	77	22.4	114.2	47.6	53.9	22.7	8.5	0.845	1.000	0.845	0.458	0.611	0.749	0
54.3	24	54.3	78	22.4	114.2	48.2	53.9	23.7	9.4	0.822	1.000	0.822	0.451	0.602	0.749	0
54.3	24	54.3	79	22.4	114.2	48.8	53.9	24.7	10.5	0.793	1.000	0.793	0.442	0.592	0.746	0
54.3	24	54.3	80	22.4	114.2	49.3	53.9	25.7	11.8	0.759	1.000	0.758	0.431	0.584	0.739	0
54.3	24	54.3	81	22.4	114.2	49.9	53.9	26.7	13.4	0.714	1.000	0.714	0.416	0.575	0.724	0
54.3	24	54.3	82	22.4	114.2	50.5	53.9	27.7	15.6	0.655	1.000	0.654	0.395	0.567	0.698	0
54.3	24	54.3	83	22.4	114.2	51.0	53.9	28.7	18.5	0.571	1.000	0.570	0.363	0.559	0.650	0
54.3	24	54.3	84	22.4	114.2	51.5	53.9	29.7	22.6	0.457	1.000	0.456	0.313	0.551	0.569	0
54.3	24	54.3	85	22.4	114.2	52.1	53.9	30.7	28.8	0.278	1.000	0.278	0.217	0.543	0.400	0
85	32	85	107	35.7	433.1	45.5	64.0	22.0	3.5	0.948	1.002	0.947	0.486	0.750	0.648	0



$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%w)	$X_{GE}$ (%w)	$\Delta T$ (°C)	FR (adim)	$Q_{GE}/Q_{IA}$ (adim)	$Q_{CO}/Q_{IA}$ (adim)	$Q_{WB}/Q_{EV}$ (adim)	$COP_L$ (adim)	$COP_c$ (adim)	$E_{th}$ (adim)	$\eta$ (adim)
85	32	85	108	35.7	433.1	46.0	64.0	23.0	3.6	0.946	1.002	0.944	0.485	0.742	0.654	0
85	32	85	109	35.7	433.1	46.6	64.0	24.0	3.7	0.943	1.002	0.941	0.484	0.734	0.660	0
85	32	85	110	35.7	433.1	47.1	64.0	25.0	3.8	0.940	1.002	0.938	0.484	0.727	0.665	0
85	32	85	111	35.7	433.1	47.6	64.0	26.0	3.9	0.937	1.002	0.935	0.483	0.720	0.671	0
85	32	85	112	35.7	433.1	48.2	64.0	27.0	4.0	0.933	1.002	0.931	0.482	0.712	0.676	0
85	32	85	113	35.7	433.1	48.7	64.0	28.0	4.2	0.929	1.002	0.927	0.481	0.705	0.681	0
85	32	85	114	35.7	433.1	49.3	64.0	29.0	4.3	0.925	1.002	0.923	0.480	0.699	0.686	0
85	32	85	115	35.7	433.1	49.7	64.0	30.0	4.5	0.920	1.002	0.918	0.478	0.692	0.691	0
85	32	85	116	35.7	433.1	50.2	64.0	31.0	4.6	0.915	1.002	0.913	0.477	0.686	0.696	0
85	32	85	117	35.7	433.1	50.8	64.0	32.0	4.8	0.909	1.002	0.907	0.475	0.679	0.700	0
85	32	85	118	35.7	433.1	51.3	64.0	33.0	5.0	0.903	1.002	0.901	0.474	0.673	0.704	0
85	32	85	119	35.7	433.1	51.8	64.0	34.0	5.2	0.896	1.002	0.894	0.472	0.667	0.707	0
85	32	85	120	35.7	433.1	52.3	64.0	35.0	5.4	0.888	1.002	0.886	0.469	0.661	0.710	0
85	32	85	121	35.7	433.1	52.8	64.0	36.0	5.7	0.879	1.002	0.878	0.467	0.655	0.713	0
85	32	85	122	35.7	433.1	53.2	64.0	37.0	5.9	0.870	1.002	0.869	0.464	0.650	0.715	0
85	32	85	123	35.7	433.1	53.7	64.0	38.0	6.2	0.860	1.002	0.858	0.461	0.644	0.716	0
85	32	85	124	35.7	433.1	54.2	64.0	39.0	6.5	0.848	1.002	0.847	0.458	0.639	0.717	0
85	32	85	125	35.7	433.1	54.6	64.0	40.0	6.8	0.836	1.002	0.834	0.454	0.634	0.717	0
85	32	85	126	35.7	433.1	55.1	64.0	41.0	7.2	0.822	1.002	0.820	0.450	0.628	0.716	0
85	32	85	127	35.7	433.1	55.5	64.0	42.0	7.5	0.807	1.002	0.805	0.446	0.623	0.715	0
85	32	85	128	35.7	433.1	56.0	64.0	43.0	8.0	0.789	1.002	0.788	0.440	0.618	0.712	0
85	32	85	129	35.7	433.1	56.4	64.0	44.0	8.4	0.771	1.002	0.769	0.434	0.614	0.708	0
85	32	85	130	35.7	433.1	56.8	64.0	45.0	8.9	0.749	1.002	0.748	0.427	0.609	0.702	0
85	32	85	131	35.7	433.1	57.3	64.0	46.0	9.5	0.725	1.002	0.724	0.419	0.604	0.694	0
85	32	85	132	35.7	433.1	57.7	64.0	47.0	10.1	0.698	1.002	0.696	0.410	0.600	0.684	0
85	32	85	133	35.7	433.1	58.1	64.0	48.0	10.9	0.666	1.002	0.664	0.399	0.595	0.670	0
85	32	85	134	35.7	433.1	58.5	64.0	49.0	11.6	0.632	1.002	0.630	0.386	0.591	0.654	0
85	32	85	135	35.7	433.1	58.9	64.0	50.0	12.5	0.592	1.002	0.590	0.371	0.586	0.632	0
85	32	85	136	35.7	433.1	59.3	64.0	51.0	13.7	0.541	1.002	0.539	0.350	0.582	0.601	0
85	32	85	137	35.7	433.1	59.7	64.0	52.0	15.0	0.485	1.002	0.483	0.325	0.578	0.563	0
85	32	85	138	35.7	433.1	60.1	64.0	53.0	16.3	0.422	1.002	0.421	0.296	0.574	0.516	0
85	32	85	139	35.7	433.1	60.5	64.0	54.0	18.2	0.340	1.002	0.339	0.253	0.570	0.443	0
85	32	85	140	35.7	433.1	60.9	64.0	55.0	20.5	0.236	1.002	0.234	0.190	0.566	0.335	0
85	32	85	141	35.7	433.1	61.2	64.0	56.0	23.1	0.116	1.002	0.114	0.102	0.562	0.182	0

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%wv)	$X_{GE}$ (%wv)	$\Delta T$ (°C)	FR (adim)	$Q_{GE}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{CO}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{AB}/Q_{EV}$ (adim)	$COP_E$ (adim)	$COP_C$ (adim)	$E_{th}$ (adim)	$\eta_{IX}$ (adim)
89	32	89	111	35.7	505.7	45.3	65.7	22.0	3.2	0.951	1.002	0.949	0.487	0.765	0.636	0
89	32	89	112	35.7	505.7	45.8	65.7	23.0	3.3	0.949	1.002	0.947	0.486	0.758	0.641	0
89	32	89	113	35.7	505.7	46.4	65.7	24.0	3.4	0.947	1.002	0.945	0.485	0.750	0.647	0
89	32	89	114	35.7	505.7	46.9	65.7	25.0	3.5	0.945	1.002	0.943	0.485	0.743	0.652	0
89	32	89	115	35.7	505.7	47.4	65.7	26.0	3.6	0.942	1.002	0.940	0.484	0.736	0.658	0
89	32	89	116	35.7	505.7	47.9	65.7	27.0	3.7	0.940	1.002	0.938	0.483	0.729	0.663	0
89	32	89	117	35.7	505.7	48.4	65.7	28.0	3.8	0.936	1.002	0.934	0.483	0.722	0.668	0
89	32	89	118	35.7	505.7	49.0	65.7	29.0	3.9	0.933	1.002	0.931	0.482	0.716	0.673	0
89	32	89	119	35.7	505.7	49.5	65.7	30.0	4.1	0.929	1.002	0.927	0.481	0.709	0.678	0
89	32	89	120	35.7	505.7	50.0	65.7	31.0	4.2	0.925	1.002	0.923	0.480	0.703	0.682	0
89	32	89	121	35.7	505.7	50.5	65.7	32.0	4.3	0.921	1.002	0.919	0.478	0.697	0.686	0
89	32	89	122	35.7	505.7	51.0	65.7	33.0	4.5	0.916	1.002	0.914	0.477	0.691	0.690	0
89	32	89	123	35.7	505.7	51.5	65.7	34.0	4.6	0.911	1.002	0.909	0.476	0.685	0.694	0
89	32	89	124	35.7	505.7	52.0	65.7	35.0	4.8	0.905	1.002	0.903	0.474	0.679	0.698	0
89	32	89	125	35.7	505.7	52.5	65.7	36.0	5.0	0.899	1.002	0.897	0.472	0.674	0.701	0
89	32	89	126	35.7	505.7	53.0	65.7	37.0	5.2	0.892	1.002	0.890	0.470	0.668	0.704	0
89	32	89	127	35.7	505.7	53.5	65.7	38.0	5.4	0.884	1.002	0.882	0.468	0.663	0.706	0
89	32	89	128	35.7	505.7	53.9	65.7	39.0	5.6	0.876	1.002	0.874	0.466	0.658	0.708	0
89	32	89	129	35.7	505.7	54.4	65.7	40.0	5.8	0.867	1.002	0.865	0.463	0.653	0.710	0
89	32	89	130	35.7	505.7	54.8	65.7	41.0	6.1	0.857	1.002	0.855	0.461	0.648	0.711	0
89	32	89	131	35.7	505.7	55.3	65.7	42.0	6.3	0.847	1.002	0.845	0.457	0.643	0.712	0
89	32	89	132	35.7	505.7	55.7	65.7	43.0	6.6	0.835	1.002	0.833	0.454	0.638	0.712	0
89	32	89	133	35.7	505.7	56.2	65.7	44.0	6.9	0.822	1.002	0.820	0.450	0.633	0.711	0
89	32	89	134	35.7	505.7	56.6	65.7	45.0	7.2	0.808	1.002	0.806	0.446	0.628	0.710	0
89	32	89	135	35.7	505.7	57.0	65.7	46.0	7.6	0.792	1.002	0.790	0.441	0.624	0.707	0
89	32	89	136	35.7	505.7	57.4	65.7	47.0	8.0	0.776	1.002	0.774	0.436	0.619	0.704	0
89	32	89	137	35.7	505.7	57.9	65.7	48.0	8.4	0.757	1.002	0.755	0.430	0.615	0.699	0
89	32	89	138	35.7	505.7	58.3	65.7	49.0	8.9	0.735	1.002	0.733	0.423	0.611	0.692	0
89	32	89	139	35.7	505.7	58.7	65.7	50.0	9.4	0.713	1.002	0.711	0.415	0.606	0.684	0
89	32	89	140	35.7	505.7	59.1	65.7	51.0	10.0	0.685	1.002	0.683	0.405	0.602	0.673	0
89	32	89	141	35.7	505.7	59.5	65.7	52.0	10.6	0.656	1.002	0.654	0.395	0.598	0.661	0
89	32	89	142	35.7	505.7	59.9	65.7	53.0	11.3	0.623	1.002	0.621	0.383	0.594	0.644	0
89	32	89	143	35.7	505.7	60.3	65.7	54.0	12.1	0.585	1.002	0.583	0.368	0.590	0.623	0
89	32	89	144	35.7	505.7	60.6	65.7	55.0	13.0	0.544	1.002	0.542	0.351	0.586	0.599	0

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%v)	$X_{GE}$ (%v)	$\Delta T$ (°C)	FR (adim)	$Q_{GE}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{CO}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{AB}/Q_{EV}$ (adim)	$COP_E$ (adim)	$COP_C$ (adim)	$E_{th}$ (adim)	$\eta_{EX}$ (adim)
89	32	89	145	35.7	505.7	61.0	65.7	56.0	14.1	0.493	1.002	0.491	0.329	0.582	0.565	0
89	32	89	146	35.7	505.7	61.3	65.7	57.0	15.2	0.438	1.002	0.436	0.303	0.579	0.524	0
89	32	89	147	35.7	505.7	61.7	65.7	58.0	16.6	0.372	1.002	0.370	0.270	0.575	0.469	0
89	32	89	148	35.7	505.7	62.1	65.7	59.0	18.2	0.293	1.002	0.291	0.225	0.571	0.394	0
89	32	89	149	35.7	505.7	62.4	65.7	60.0	20.2	0.197	1.002	0.195	0.163	0.568	0.287	0
95	46	95	117	75.7	633.4	45.0	61.2	22.0	3.8	0.938	1.002	0.936	0.483	0.731	0.660	0
95	46	95	118	75.7	633.4	45.5	61.2	23.0	3.9	0.934	1.002	0.933	0.482	0.723	0.667	0
95	46	95	119	75.7	633.4	46.1	61.2	24.0	4.0	0.930	1.002	0.929	0.481	0.715	0.673	0
95	46	95	120	75.7	633.4	46.6	61.2	25.0	4.2	0.926	1.002	0.924	0.480	0.707	0.679	0
95	46	95	121	75.7	633.4	47.1	61.2	26.0	4.3	0.921	1.002	0.920	0.479	0.699	0.684	0
95	46	95	122	75.7	633.4	47.6	61.2	27.0	4.5	0.916	1.002	0.915	0.477	0.692	0.690	0
95	46	95	123	75.7	633.4	48.2	61.2	28.0	4.7	0.911	1.002	0.909	0.476	0.685	0.695	0
95	46	95	124	75.7	633.4	48.7	61.2	29.0	4.9	0.904	1.002	0.903	0.474	0.678	0.699	0
95	46	95	125	75.7	633.4	49.2	61.2	30.0	5.1	0.898	1.002	0.896	0.472	0.671	0.704	0
95	46	95	126	75.7	633.4	49.7	61.2	31.0	5.3	0.890	1.002	0.888	0.470	0.664	0.708	0
95	46	95	127	75.7	633.4	50.2	61.2	32.0	5.6	0.882	1.002	0.880	0.468	0.658	0.711	0
95	46	95	128	75.7	633.4	50.7	61.2	33.0	5.8	0.872	1.002	0.871	0.465	0.651	0.714	0
95	46	95	129	75.7	633.4	51.1	61.2	34.0	6.1	0.862	1.002	0.861	0.462	0.645	0.717	0
95	46	95	130	75.7	633.4	51.7	61.2	35.0	6.4	0.851	1.002	0.849	0.459	0.639	0.718	0
95	46	95	131	75.7	633.4	52.1	61.2	36.0	6.7	0.838	1.002	0.836	0.455	0.633	0.719	0
95	46	95	132	75.7	633.4	52.6	61.2	37.0	7.1	0.824	1.002	0.822	0.451	0.627	0.719	0
95	46	95	133	75.7	633.4	53.1	61.2	38.0	7.5	0.808	1.002	0.807	0.446	0.621	0.718	0
95	46	95	134	75.7	633.4	53.5	61.2	39.0	8.0	0.790	1.002	0.788	0.440	0.616	0.715	0
95	46	95	135	75.7	633.4	54.0	61.2	40.0	8.5	0.769	1.002	0.767	0.434	0.610	0.711	0
95	46	95	136	75.7	633.4	54.5	61.2	41.0	9.1	0.746	1.002	0.744	0.426	0.605	0.705	0
95	46	95	137	75.7	633.4	54.9	61.2	42.0	9.7	0.720	1.002	0.718	0.418	0.600	0.696	0
95	46	95	138	75.7	633.4	55.4	61.2	43.0	10.5	0.689	1.002	0.688	0.407	0.595	0.684	0
95	46	95	139	75.7	633.4	55.8	61.2	44.0	11.3	0.653	1.002	0.652	0.394	0.590	0.668	0
95	46	95	140	75.7	633.4	56.2	61.2	45.0	12.3	0.614	1.002	0.612	0.379	0.585	0.648	0
95	46	95	141	75.7	633.4	56.7	61.2	46.0	13.5	0.563	1.002	0.561	0.359	0.580	0.619	0
95	46	95	142	75.7	633.4	57.1	61.2	47.0	14.8	0.505	1.002	0.504	0.335	0.576	0.581	0
95	46	95	143	75.7	633.4	57.5	61.2	48.0	16.5	0.434	1.002	0.433	0.302	0.571	0.528	0
95	46	95	144	75.7	633.4	57.9	61.2	49.0	18.5	0.345	1.002	0.344	0.256	0.567	0.451	0
95	46	95	145	75.7	633.4	58.3	61.2	50.0	21.2	0.230	1.002	0.229	0.186	0.562	0.331	0

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%v/v)	$X_{GE}$ (%v/v)	$\Delta T$ (°C)	FR (adim)	$Q_{GH}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{CO}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{NH}/Q_{EV}$ (adim)	$COP_E$ (adim)	$COP_C$ (adim)	$E_{th}$ (adim)	$\eta_{HX}$ (adim)
72	32	72	113	35.7	254.5	55.9	58.2	41.0	25.1	0.220	1.001	0.220	0.180	0.553	0.326	0
72	32	72	112	35.7	254.5	55.5	58.2	40.0	21.0	0.368	1.001	0.367	0.268	0.558	0.481	0
72	32	72	111	35.7	254.5	55.0	58.2	39.0	18.1	0.474	1.001	0.473	0.321	0.564	0.569	0
72	32	72	110	35.7	254.5	54.5	58.2	38.0	15.7	0.558	1.001	0.558	0.358	0.569	0.629	0
72	32	72	109	35.7	254.5	54.0	58.2	37.0	13.9	0.623	1.001	0.622	0.383	0.575	0.666	0
72	32	72	108	35.7	254.5	53.6	58.2	36.0	12.5	0.674	1.001	0.673	0.402	0.581	0.692	0
72	32	72	107	35.7	254.5	53.1	58.2	35.0	11.3	0.715	1.001	0.714	0.416	0.587	0.709	0
72	32	72	106	35.7	254.5	52.6	58.2	34.0	10.3	0.748	1.001	0.747	0.427	0.594	0.720	0
72	32	72	105	35.7	254.5	52.1	58.2	33.0	9.5	0.776	1.001	0.775	0.436	0.600	0.727	0
72	32	72	104	35.7	254.5	51.6	58.2	32.0	8.8	0.801	1.001	0.800	0.444	0.607	0.732	0
72	32	72	103	35.7	254.5	51.1	58.2	31.0	8.1	0.822	1.001	0.821	0.451	0.614	0.734	0
72	32	72	102	35.7	254.5	50.6	58.2	30.0	7.6	0.840	1.001	0.839	0.456	0.621	0.734	0
72	32	72	101	35.7	254.5	50.0	58.2	29.0	7.1	0.855	1.001	0.854	0.460	0.628	0.733	0
72	32	72	100	35.7	254.5	49.5	58.2	28.0	6.6	0.869	1.001	0.868	0.464	0.636	0.730	0
72	32	72	99	35.7	254.5	49.0	58.2	27.0	6.3	0.880	1.001	0.879	0.468	0.644	0.727	0
72	32	72	98	35.7	254.5	48.4	58.2	26.0	5.9	0.891	1.001	0.890	0.471	0.652	0.722	0
72	32	72	97	35.7	254.5	47.9	58.2	25.0	5.6	0.900	1.001	0.899	0.473	0.660	0.717	0
72	32	72	96	35.7	254.5	47.3	58.2	24.0	5.3	0.908	1.001	0.907	0.475	0.668	0.711	0
72	32	72	95	35.7	254.5	46.7	58.2	23.0	5.1	0.915	1.001	0.915	0.477	0.677	0.705	0
72	32	72	94	35.7	254.5	46.2	58.2	22.0	4.8	0.922	1.001	0.921	0.479	0.686	0.698	0
72	32	72	93	35.7	254.5	45.6	58.2	21.0	4.6	0.928	1.001	0.927	0.481	0.696	0.691	0
72	32	72	92	35.7	254.5	45.0	58.2	20.0	4.4	0.933	1.001	0.932	0.482	0.705	0.684	0
55	16	55	95	13.6	118.1	56.6	59.0	40.0	25.0	0.268	1.001	0.268	0.211	0.554	0.381	0
55	16	55	94	13.6	118.1	56.1	59.0	39.0	20.7	0.414	1.001	0.414	0.292	0.559	0.523	0
55	16	55	93	13.6	118.1	55.7	59.0	38.0	18.0	0.510	1.001	0.509	0.337	0.565	0.597	0
55	16	55	92	13.6	118.1	55.2	59.0	37.0	15.7	0.588	1.001	0.587	0.370	0.571	0.648	0
55	16	55	91	13.6	118.1	54.7	59.0	36.0	13.9	0.648	1.001	0.647	0.393	0.577	0.681	0
55	16	55	90	13.6	118.1	54.2	59.0	35.0	12.4	0.698	1.001	0.698	0.411	0.583	0.704	0
55	16	55	89	13.6	118.1	53.7	59.0	34.0	11.3	0.736	1.001	0.735	0.424	0.590	0.718	0
55	16	55	88	13.6	118.1	53.2	59.0	33.0	10.2	0.769	1.001	0.768	0.434	0.596	0.729	0
55	16	55	87	13.6	118.1	52.7	59.0	32.0	9.4	0.796	1.001	0.795	0.443	0.603	0.735	0
55	16	55	86	13.6	118.1	52.2	59.0	31.0	8.7	0.819	1.001	0.818	0.450	0.610	0.738	0
55	16	55	85	13.6	118.1	51.6	59.0	30.0	8.1	0.838	1.001	0.837	0.456	0.617	0.738	0
55	16	55	84	13.6	118.1	51.1	59.0	29.0	7.5	0.855	1.001	0.854	0.461	0.624	0.738	0

T (°C)	T <sub>C</sub> (°C)	T <sub>EA</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)	P <sub>CO</sub> (mmHg)	P <sub>EV</sub> (mmHg)	X <sub>AB</sub> (%w)	X <sub>GB</sub> (%w)	ΔT (°C)	FR (adim)	Q <sub>GE</sub> /Q <sub>EV</sub> (adim)	Q <sub>CO</sub> /Q <sub>EV</sub> (adim)	Q <sub>AB</sub> /Q <sub>EV</sub> (adim)	COP <sub>E</sub> (adim)	COP <sub>C</sub> (adim)	E <sub>th</sub> (adim)	η <sub>IX</sub> (adim)
55	16	55	83	13.6	118.1	50.6	59.0	28.0	7.0	0.869	1.001	0.868	0.465	0.632	0.735	0
55	16	55	82	13.6	118.1	50.0	59.0	27.0	6.6	0.882	1.001	0.881	0.468	0.640	0.732	0
55	16	55	81	13.6	118.1	49.5	59.0	26.0	6.2	0.893	1.001	0.892	0.471	0.648	0.728	0
55	16	55	80	13.6	118.1	48.9	59.0	25.0	5.9	0.902	1.001	0.902	0.474	0.656	0.723	0
55	16	55	79	13.6	118.1	48.3	59.0	24.0	5.5	0.911	1.001	0.910	0.476	0.664	0.717	0
55	16	55	78	13.6	118.1	47.8	59.0	23.0	5.3	0.918	1.001	0.918	0.478	0.673	0.711	0
55	16	55	77	13.6	118.1	47.2	59.0	22.0	5.0	0.925	1.001	0.924	0.480	0.682	0.704	0
55	16	55	76	13.6	118.1	46.6	59.0	21.0	4.8	0.931	1.001	0.930	0.482	0.692	0.697	0
55	16	55	75	13.6	118.1	45.9	59.0	20.0	4.5	0.936	1.001	0.935	0.483	0.701	0.689	0
55	16	55	74	13.6	118.1	45.3	59.0	19.0	4.3	0.940	1.001	0.940	0.484	0.711	0.681	0
55	24	55	87	22.4	118.1	52.7	54.3	32.0	33.0	0.142	1.000	0.142	0.124	0.540	0.230	0
55	24	55	86	22.4	118.1	52.2	54.3	31.0	25.1	0.372	1.000	0.372	0.271	0.547	0.495	0
55	24	55	85	22.4	118.1	51.6	54.3	30.0	20.3	0.513	1.000	0.512	0.339	0.555	0.611	0
55	24	55	84	22.4	118.1	51.1	54.3	29.0	16.8	0.613	1.000	0.612	0.380	0.562	0.675	0
55	24	55	83	22.4	118.1	50.6	54.3	28.0	14.5	0.679	1.000	0.679	0.404	0.570	0.709	0
55	24	55	82	22.4	118.1	50.0	54.3	27.0	12.6	0.731	1.000	0.731	0.422	0.578	0.730	0
55	24	55	81	22.4	118.1	49.5	54.3	26.0	11.2	0.771	1.000	0.771	0.435	0.587	0.742	0
55	24	55	80	22.4	118.1	48.9	54.3	25.0	10.0	0.803	1.000	0.802	0.445	0.596	0.747	0
55	24	55	79	22.4	118.1	48.3	54.3	24.0	9.0	0.829	1.000	0.829	0.453	0.605	0.749	0
55	24	55	78	22.4	118.1	47.8	54.3	23.0	8.3	0.850	1.000	0.849	0.459	0.614	0.747	0
55	24	55	77	22.4	118.1	47.2	54.3	22.0	7.6	0.867	1.000	0.867	0.464	0.624	0.744	0
55	24	55	76	22.4	118.1	46.6	54.3	21.0	7.0	0.882	1.000	0.882	0.469	0.634	0.739	0
55	24	55	75	22.4	118.1	45.9	54.3	20.0	6.5	0.895	1.000	0.895	0.472	0.645	0.732	0
55	24	55	74	22.4	118.1	45.3	54.3	19.0	6.0	0.906	1.000	0.906	0.475	0.656	0.724	0
61	24	61	99	22.4	156.4	55.2	57.4	38.0	27.1	0.214	1.010	0.204	0.168	0.549	0.306	0
61	24	61	98	22.4	156.4	54.8	57.4	37.0	22.2	0.380	1.010	0.371	0.269	0.555	0.484	0
61	24	61	97	22.4	156.4	54.3	57.4	36.0	18.8	0.496	1.010	0.486	0.325	0.561	0.579	0
61	24	61	96	22.4	156.4	53.8	57.4	35.0	16.1	0.585	1.010	0.575	0.363	0.568	0.639	0
61	24	61	95	22.4	156.4	53.3	57.4	34.0	14.1	0.651	1.010	0.642	0.389	0.574	0.677	0
61	24	61	94	22.4	156.4	52.8	57.4	33.0	12.5	0.702	1.010	0.693	0.407	0.581	0.701	0
61	24	61	93	22.4	156.4	52.3	57.4	32.0	11.3	0.743	1.010	0.734	0.421	0.588	0.716	0
61	24	61	92	22.4	156.4	51.8	57.4	31.0	10.3	0.776	1.010	0.767	0.432	0.595	0.726	0
61	24	61	91	22.4	156.4	51.3	57.4	30.0	9.4	0.803	1.010	0.794	0.440	0.602	0.731	0
61	24	61	90	22.4	156.4	50.7	57.4	29.0	8.7	0.827	1.010	0.818	0.447	0.609	0.734	0

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%v/v)	$X_{GE}$ (%v/v)	$\Delta T$ (°C)	FR (adim)	$Q_{GE}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{CO}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{AB}/Q_{EV}$ (adim)	$COP_E$ (adim)	$COP_C$ (adim)	$E_{th}$ (adim)	$\eta_{HX}$ (adim)
61	24	61	89	22.4	156.4	50.2	57.4	28.0	8.0	0.847	1.010	0.838	0.453	0.617	0.735	0
61	24	61	88	22.4	156.4	49.6	57.4	27.0	7.4	0.864	1.010	0.855	0.458	0.625	0.734	0
61	24	61	87	22.4	156.4	49.1	57.4	26.0	6.9	0.879	1.010	0.869	0.463	0.633	0.731	0
61	24	61	86	22.4	156.4	48.5	57.4	25.0	6.5	0.891	1.010	0.882	0.466	0.641	0.727	0
61	24	61	85	22.4	156.4	47.9	57.4	24.0	6.1	0.902	1.010	0.893	0.469	0.650	0.722	0
61	24	61	84	22.4	156.4	47.4	57.4	23.0	5.7	0.912	1.010	0.902	0.472	0.659	0.716	0
61	24	61	83	22.4	156.4	46.8	57.4	22.0	5.4	0.920	1.010	0.911	0.474	0.668	0.710	0
61	24	61	82	22.4	156.4	46.2	57.4	21.0	5.1	0.928	1.010	0.918	0.476	0.678	0.703	0
61	24	61	81	22.4	156.4	45.6	57.4	20.0	4.9	0.934	1.010	0.925	0.478	0.688	0.695	0
61	24	61	80	22.4	156.4	45.0	57.4	19.0	4.6	0.940	1.010	0.931	0.480	0.698	0.687	0
83	32	83	136	35.7	400.3	60.3	63.2	53.0	21.7	0.204	1.002	0.202	0.168	0.563	0.298	0
83	32	83	135	35.7	400.3	59.9	63.2	52.0	19.1	0.319	1.002	0.318	0.241	0.567	0.424	0
83	32	83	134	35.7	400.3	59.5	63.2	51.0	17.1	0.408	1.002	0.407	0.289	0.572	0.506	0
83	32	83	133	35.7	400.3	59.1	63.2	50.0	15.4	0.481	1.002	0.479	0.324	0.576	0.562	0
83	32	83	132	35.7	400.3	58.7	63.2	49.0	14.1	0.540	1.002	0.538	0.350	0.580	0.603	0
83	32	83	131	35.7	400.3	58.2	63.2	48.0	12.8	0.592	1.002	0.591	0.371	0.585	0.635	0
83	32	83	130	35.7	400.3	57.8	63.2	47.0	11.9	0.634	1.002	0.632	0.387	0.589	0.657	0
83	32	83	129	35.7	400.3	57.4	63.2	46.0	11.0	0.671	1.002	0.670	0.401	0.594	0.675	0
83	32	83	128	35.7	400.3	57.0	63.2	45.0	10.2	0.703	1.002	0.702	0.412	0.598	0.689	0
83	32	83	127	35.7	400.3	56.5	63.2	44.0	9.5	0.731	1.002	0.730	0.422	0.603	0.699	0
83	32	83	126	35.7	400.3	56.1	63.2	43.0	9.0	0.755	1.002	0.754	0.429	0.608	0.706	0
83	32	83	125	35.7	400.3	55.7	63.2	42.0	8.4	0.777	1.002	0.775	0.436	0.613	0.712	0
83	32	83	124	35.7	400.3	55.2	63.2	41.0	8.0	0.796	1.002	0.795	0.442	0.618	0.716	0
83	32	83	123	35.7	400.3	54.7	63.2	40.0	7.5	0.814	1.002	0.812	0.448	0.623	0.718	0
83	32	83	122	35.7	400.3	54.3	63.2	39.0	7.1	0.829	1.002	0.827	0.452	0.629	0.720	0
83	32	83	121	35.7	400.3	53.8	63.2	38.0	6.8	0.843	1.002	0.841	0.456	0.634	0.720	0
83	32	83	120	35.7	400.3	53.4	63.2	37.0	6.4	0.855	1.002	0.853	0.460	0.640	0.719	0
83	32	83	119	35.7	400.3	52.9	63.2	36.0	6.1	0.866	1.002	0.864	0.463	0.645	0.718	0
83	32	83	118	35.7	400.3	52.4	63.2	35.0	5.9	0.876	1.002	0.874	0.466	0.651	0.716	0
83	32	83	117	35.7	400.3	51.9	63.2	34.0	5.6	0.885	1.002	0.884	0.469	0.657	0.713	0
83	32	83	116	35.7	400.3	51.4	63.2	33.0	5.4	0.893	1.002	0.892	0.471	0.663	0.710	0
83	32	83	115	35.7	400.3	50.9	63.2	32.0	5.1	0.901	1.002	0.899	0.473	0.670	0.706	0
83	32	83	114	35.7	400.3	50.4	63.2	31.0	4.9	0.907	1.002	0.906	0.475	0.676	0.702	0
83	32	83	113	35.7	400.3	49.9	63.2	30.0	4.7	0.914	1.002	0.912	0.477	0.683	0.698	0

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%w)	$X_{CH}$ (%w)	$\Delta T$ (°C)	FR (adim)	$Q_{GE}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{CO}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{AB}/Q_{EV}$ (adim)	$COP_E$ (adim)	$COP_C$ (adim)	$E_{th}$ (adim)	$\eta_{HX}$ (adim)
83	32	83	112	35.7	400.3	49.4	63.2	29.0	4.6	0.919	1.002	0.917	0.478	0.689	0.693	0
83	32	83	111	35.7	400.3	48.8	63.2	28.0	4.4	0.924	1.002	0.923	0.479	0.696	0.689	0
83	32	83	110	35.7	400.3	48.3	63.2	27.0	4.3	0.929	1.002	0.927	0.481	0.703	0.683	0
83	32	83	109	35.7	400.3	47.8	63.2	26.0	4.1	0.933	1.002	0.931	0.482	0.711	0.678	0
83	32	83	108	35.7	400.3	47.2	63.2	25.0	4.0	0.937	1.002	0.935	0.483	0.718	0.672	0
83	32	83	107	35.7	400.3	46.7	63.2	24.0	3.8	0.940	1.002	0.938	0.484	0.726	0.666	0
83	32	83	106	35.7	400.3	46.1	63.2	23.0	3.7	0.943	1.002	0.942	0.485	0.734	0.660	0
83	32	83	105	35.7	400.3	45.6	63.2	22.0	3.6	0.946	1.002	0.944	0.485	0.742	0.654	0
83	32	83	104	35.7	400.3	45.0	63.2	21.0	3.5	0.948	1.002	0.947	0.486	0.750	0.648	0
54	24	54	84	22.4	112.6	51.7	53.8	30.0	26.1	0.360	1.001	0.359	0.264	0.546	0.484	0
54	24	54	83	22.4	112.6	51.2	53.8	29.0	20.9	0.509	1.001	0.509	0.337	0.554	0.609	0
54	24	54	82	22.4	112.6	50.6	53.8	28.0	17.1	0.613	1.001	0.612	0.380	0.562	0.676	0
54	24	54	81	22.4	112.6	50.1	53.8	27.0	14.6	0.684	1.001	0.684	0.406	0.570	0.713	0
54	24	54	80	22.4	112.6	49.5	53.8	26.0	12.6	0.737	1.001	0.736	0.424	0.578	0.733	0
54	24	54	79	22.4	112.6	49.0	53.8	25.0	11.2	0.776	1.001	0.776	0.437	0.587	0.744	0
54	24	54	78	22.4	112.6	48.4	53.8	24.0	9.9	0.809	1.001	0.809	0.447	0.596	0.750	0
54	24	54	77	22.4	112.6	47.8	53.8	23.0	9.0	0.834	1.001	0.833	0.454	0.606	0.750	0
54	24	54	76	22.4	112.6	47.2	53.8	22.0	8.2	0.856	1.001	0.855	0.461	0.616	0.748	0
54	24	54	75	22.4	112.6	46.6	53.8	21.0	7.5	0.872	1.001	0.872	0.466	0.626	0.744	0
54	24	54	74	22.4	112.6	46.0	53.8	20.0	6.9	0.887	1.001	0.886	0.470	0.637	0.738	0
54	24	54	73	22.4	112.6	45.4	53.8	19.0	6.4	0.899	1.001	0.899	0.473	0.648	0.730	0
58	24	58	93	22.4	136.1	54.0	55.9	35.0	29.5	0.188	1.014	0.174	0.147	0.545	0.269	0
58	24	58	92	22.4	136.1	53.5	55.9	34.0	23.6	0.377	1.014	0.363	0.264	0.551	0.478	0
58	24	58	91	22.4	136.1	53.0	55.9	33.0	19.4	0.509	1.014	0.496	0.328	0.558	0.588	0
58	24	58	90	22.4	136.1	52.5	55.9	32.0	16.5	0.602	1.014	0.588	0.367	0.565	0.650	0
58	24	58	89	22.4	136.1	52.0	55.9	31.0	14.3	0.669	1.014	0.656	0.393	0.572	0.686	0
58	24	58	88	22.4	136.1	51.4	55.9	30.0	12.6	0.723	1.014	0.710	0.412	0.579	0.711	0
58	24	58	87	22.4	136.1	50.9	55.9	29.0	11.3	0.763	1.014	0.749	0.425	0.587	0.724	0
58	24	58	86	22.4	136.1	50.4	55.9	28.0	10.1	0.797	1.014	0.783	0.436	0.595	0.733	0
58	24	58	85	22.4	136.1	49.8	55.9	27.0	9.2	0.824	1.014	0.810	0.444	0.603	0.737	0
58	24	58	84	22.4	136.1	49.3	55.9	26.0	8.5	0.846	1.014	0.832	0.451	0.611	0.738	0
58	24	58	83	22.4	136.1	48.7	55.9	25.0	7.8	0.865	1.014	0.851	0.456	0.620	0.736	0
58	24	58	82	22.4	136.1	48.1	55.9	24.0	7.2	0.881	1.014	0.867	0.461	0.629	0.733	0
58	24	58	81	22.4	136.1	47.6	55.9	23.0	6.7	0.895	1.014	0.881	0.465	0.638	0.729	0

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%w)	$X_{GB}$ (%w)	$\Delta T$ (°C)	FR (adim)	$Q_{GB}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{CO}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{AB}/Q_{EV}$ (adim)	$COP_E$ (adim)	$COP_C$ (adim)	$E_{th}$ (adim)	$\eta_{HX}$ (adim)
58	24	58	80	22.4	136.1	47.0	55.9	22.0	6.3	0.907	1.014	0.893	0.468	0.647	0.723	0
58	24	58	79	22.4	136.1	46.4	55.9	21.0	5.9	0.917	1.014	0.903	0.471	0.657	0.717	0
58	24	58	78	22.4	136.1	45.8	55.9	20.0	5.5	0.926	1.014	0.912	0.474	0.668	0.709	0
58	24	58	77	22.4	136.1	45.2	55.9	19.0	5.2	0.934	1.014	0.920	0.476	0.678	0.701	0
46	16	46	77	13.6	75.7	52.8	54.4	31.0	34.3	0.143	1.000	0.143	0.125	0.540	0.231	0
46	16	46	76	13.6	75.7	52.2	54.4	30.0	25.6	0.386	1.000	0.386	0.278	0.547	0.509	0
46	16	46	75	13.6	75.7	51.7	54.4	29.0	20.4	0.530	1.000	0.529	0.346	0.555	0.624	0
46	16	46	74	13.6	75.7	51.2	54.4	28.0	17.0	0.625	1.000	0.624	0.384	0.563	0.683	0
46	16	46	73	13.6	75.7	50.6	54.4	27.0	14.6	0.692	1.000	0.691	0.409	0.571	0.716	0
46	16	46	72	13.6	75.7	50.0	54.4	26.0	12.6	0.744	1.000	0.744	0.426	0.579	0.736	0
46	16	46	71	13.6	75.7	49.5	54.4	25.0	11.1	0.783	1.000	0.783	0.439	0.588	0.746	0
46	16	46	70	13.6	75.7	48.9	54.4	24.0	10.0	0.813	1.000	0.812	0.448	0.597	0.750	0
46	16	46	69	13.6	75.7	48.3	54.4	23.0	9.0	0.838	1.000	0.838	0.456	0.607	0.751	0
46	16	46	68	13.6	75.7	47.7	54.4	22.0	8.2	0.859	1.000	0.859	0.462	0.617	0.749	0
46	16	46	67	13.6	75.7	47.1	54.4	21.0	7.5	0.876	1.000	0.876	0.467	0.627	0.745	0
46	16	46	66	13.6	75.7	46.5	54.4	20.0	6.9	0.890	1.000	0.890	0.471	0.638	0.738	0
46	16	46	65	13.6	75.7	45.8	54.4	19.0	6.4	0.902	1.000	0.902	0.474	0.649	0.731	0
46	16	46	64	13.6	75.7	45.2	54.4	18.0	5.9	0.913	1.000	0.912	0.477	0.660	0.722	0
96	46	96	147	75.7	657.1	58.6	61.6	51.0	20.6	0.241	1.002	0.240	0.193	0.563	0.343	0
96	46	96	146	75.7	657.1	58.2	61.6	50.0	18.1	0.352	1.002	0.350	0.259	0.568	0.456	0
96	46	96	145	75.7	657.1	57.9	61.6	49.0	16.3	0.432	1.002	0.430	0.301	0.572	0.525	0
96	46	96	144	75.7	657.1	57.4	61.6	48.0	14.6	0.506	1.002	0.505	0.335	0.577	0.581	0
96	46	96	143	75.7	657.1	57.0	61.6	47.0	13.4	0.559	1.002	0.558	0.358	0.581	0.615	0
96	46	96	142	75.7	657.1	56.6	61.6	46.0	12.2	0.610	1.002	0.608	0.378	0.586	0.645	0
96	46	96	141	75.7	657.1	56.2	61.6	45.0	11.3	0.649	1.002	0.648	0.393	0.591	0.665	0
96	46	96	140	75.7	657.1	55.7	61.6	44.0	10.4	0.685	1.002	0.684	0.406	0.595	0.681	0
96	46	96	139	75.7	657.1	55.3	61.6	43.0	9.7	0.716	1.002	0.714	0.416	0.600	0.693	0
96	46	96	138	75.7	657.1	54.9	61.6	42.0	9.1	0.741	1.002	0.739	0.425	0.605	0.701	0
96	46	96	137	75.7	657.1	54.4	61.6	41.0	8.5	0.765	1.002	0.764	0.433	0.611	0.709	0
96	46	96	136	75.7	657.1	53.9	61.6	40.0	8.0	0.785	1.002	0.784	0.439	0.616	0.713	0
96	46	96	135	75.7	657.1	53.5	61.6	39.0	7.6	0.804	1.002	0.802	0.445	0.621	0.716	0
96	46	96	134	75.7	657.1	53.0	61.6	38.0	7.2	0.820	1.002	0.818	0.450	0.627	0.717	0
96	46	96	133	75.7	657.1	52.5	61.6	37.0	6.8	0.834	1.002	0.832	0.454	0.632	0.718	0
96	46	96	132	75.7	657.1	52.1	61.6	36.0	6.4	0.847	1.002	0.845	0.458	0.638	0.717	0



$T_c$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{LV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{LV}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%w)	$X_{GB}$ (%w)	$\Delta T$ (°C)	FR (adim)	$Q_{GB}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{CO}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{AB}/Q_{EV}$ (adim)	$COP_E$ (adim)	$COP_C$ (adim)	$E_{th}$ (adim)	$\eta_{HX}$ (adim)
96	46	96	131	75.7	657.1	51.6	61.6	35.0	6.1	0.859	1.002	0.857	0.461	0.644	0.716	0
96	46	96	130	75.7	657.1	51.1	61.6	34.0	5.9	0.869	1.002	0.867	0.464	0.650	0.714	0
96	46	96	129	75.7	657.1	50.6	61.6	33.0	5.6	0.879	1.002	0.877	0.467	0.656	0.711	0
96	46	96	128	75.7	657.1	50.1	61.6	32.0	5.3	0.887	1.002	0.885	0.469	0.663	0.708	0
96	46	96	127	75.7	657.1	49.6	61.6	31.0	5.1	0.895	1.002	0.893	0.471	0.669	0.704	0
96	46	96	126	75.7	657.1	49.1	61.6	30.0	4.9	0.902	1.002	0.900	0.473	0.676	0.700	0
96	46	96	125	75.7	657.1	48.6	61.6	29.0	4.7	0.908	1.002	0.906	0.475	0.683	0.696	0
96	46	96	124	75.7	657.1	48.1	61.6	28.0	4.5	0.914	1.002	0.912	0.477	0.690	0.691	0
96	46	96	123	75.7	657.1	47.6	61.6	27.0	4.4	0.919	1.002	0.917	0.478	0.697	0.686	0
96	46	96	122	75.7	657.1	47.1	61.6	26.0	4.2	0.924	1.002	0.922	0.479	0.704	0.681	0
96	46	96	121	75.7	657.1	46.5	61.6	25.0	4.1	0.928	1.002	0.927	0.481	0.712	0.675	0
96	46	96	120	75.7	657.1	46.0	61.6	24.0	3.9	0.932	1.002	0.931	0.482	0.720	0.669	0
96	46	96	119	75.7	657.1	45.5	61.6	23.0	3.8	0.936	1.002	0.934	0.483	0.728	0.663	0
73	32	73	115	35.7	265.6	56.3	58.7	42.0	24.8	0.215	1.001	0.215	0.177	0.554	0.319	0
73	32	73	114	35.7	265.6	55.9	58.7	41.0	20.9	0.362	1.001	0.361	0.265	0.559	0.474	0
73	32	73	113	35.7	265.6	55.4	58.7	40.0	17.8	0.474	1.001	0.473	0.321	0.565	0.569	0
73	32	73	112	35.7	265.6	54.9	58.7	39.0	15.7	0.552	1.001	0.551	0.355	0.570	0.623	0
73	32	73	111	35.7	265.6	54.5	58.7	38.0	13.9	0.617	1.001	0.616	0.381	0.576	0.661	0
73	32	73	110	35.7	265.6	54.0	58.7	37.0	12.6	0.665	1.001	0.664	0.399	0.582	0.685	0
73	32	73	109	35.7	265.6	53.5	58.7	36.0	11.4	0.707	1.001	0.706	0.414	0.588	0.703	0
73	32	73	108	35.7	265.6	53.0	58.7	35.0	10.4	0.741	1.001	0.740	0.425	0.594	0.716	0
73	32	73	107	35.7	265.6	52.5	58.7	34.0	9.5	0.771	1.001	0.770	0.435	0.600	0.724	0
73	32	73	106	35.7	265.6	52.0	58.7	33.0	8.8	0.796	1.001	0.795	0.443	0.607	0.730	0
73	32	73	105	35.7	265.6	51.5	58.7	32.0	8.2	0.816	1.001	0.816	0.449	0.614	0.732	0
73	32	73	104	35.7	265.6	51.0	58.7	31.0	7.6	0.835	1.001	0.834	0.454	0.620	0.733	0
73	32	73	103	35.7	265.6	50.5	58.7	30.0	7.2	0.851	1.001	0.850	0.459	0.628	0.732	0
73	32	73	102	35.7	265.6	49.9	58.7	29.0	6.7	0.865	1.001	0.864	0.463	0.635	0.730	0
73	32	73	101	35.7	265.6	49.4	58.7	28.0	6.3	0.877	1.001	0.876	0.467	0.642	0.727	0
73	32	73	100	35.7	265.6	48.9	58.7	27.0	6.0	0.887	1.001	0.886	0.470	0.650	0.722	0
73	32	73	99	35.7	265.6	48.4	58.7	26.0	5.7	0.897	1.001	0.896	0.472	0.658	0.718	0
73	32	73	98	35.7	265.6	47.8	58.7	25.0	5.4	0.905	1.001	0.904	0.475	0.666	0.712	0
73	32	73	97	35.7	265.6	47.3	58.7	24.0	5.1	0.912	1.001	0.911	0.477	0.675	0.707	0
73	32	73	96	35.7	265.6	46.7	58.7	23.0	4.9	0.919	1.001	0.918	0.478	0.683	0.700	0
73	32	73	95	35.7	265.6	46.1	58.7	22.0	4.7	0.925	1.001	0.924	0.480	0.692	0.694	0

$T_{GE}$ (°C)	$T_{CO}$ (°C)	$T_{EV}$ (°C)	$T_{AB}$ (°C)	$P_{CO}$ (mmHg)	$P_{EA}$ (mmHg)	$X_{AB}$ (%w)	$X_{GE}$ (%w)	$\Delta T$ (°C)	FR (adim)	$Q_{GE}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{CO}/Q_{EV}$ (adim)	$Q_{AB}/Q_{EV}$ (adim)	$COP_E$ (adim)	$COP_C$ (adim)	$E_{th}$ (adim)	$\eta_{IIX}$ (adim)
73	32	73	94	35.7	265.6	45.5	58.7	21.0	4.5	0.930	1.001	0.929	0.481	0.701	0.686	0
52.3	16	52.3	90	13.6	103.7	55.7	57.6	37.7	30.5	0.129	1.001	0.128	0.114	0.547	0.208	0
52.3	16	52.3	89	13.6	103.7	55.2	57.6	36.7	24.2	0.333	1.001	0.332	0.249	0.553	0.450	0
52.3	16	52.3	88	13.6	103.7	54.7	57.6	35.7	20.1	0.466	1.001	0.466	0.318	0.559	0.568	0
52.3	16	52.3	87	13.6	103.7	54.2	57.6	34.7	17.0	0.566	1.001	0.566	0.361	0.566	0.638	0
52.3	16	52.3	86	13.6	103.7	53.7	57.6	33.7	14.9	0.635	1.001	0.634	0.388	0.572	0.678	0
52.3	16	52.3	85	13.6	103.7	53.3	57.6	32.7	13.2	0.688	1.001	0.687	0.407	0.579	0.703	0
52.3	16	52.3	84	13.6	103.7	52.7	57.6	31.7	11.8	0.732	1.001	0.731	0.422	0.586	0.721	0
52.3	16	52.3	83	13.6	103.7	52.2	57.6	30.7	10.7	0.767	1.001	0.767	0.434	0.593	0.732	0
52.3	16	52.3	82	13.6	103.7	51.7	57.6	29.7	9.7	0.796	1.001	0.795	0.443	0.600	0.738	0
52.3	16	52.3	81	13.6	103.7	51.1	57.6	28.7	8.9	0.821	1.001	0.820	0.450	0.608	0.741	0
52.3	16	52.3	80	13.6	103.7	50.6	57.6	27.7	8.2	0.841	1.001	0.840	0.456	0.615	0.742	0
52.3	16	52.3	79	13.6	103.7	50.0	57.6	26.7	7.6	0.858	1.001	0.858	0.461	0.623	0.740	0
52.3	16	52.3	78	13.6	103.7	49.5	57.6	25.7	7.1	0.873	1.001	0.872	0.466	0.632	0.737	0
52.3	16	52.3	77	13.6	103.7	48.9	57.6	24.7	6.6	0.886	1.001	0.885	0.469	0.640	0.733	0
52.3	16	52.3	76	13.6	103.7	48.3	57.6	23.7	6.2	0.897	1.001	0.896	0.472	0.649	0.728	0
52.3	16	52.3	75	13.6	103.7	47.7	57.6	22.7	5.8	0.907	1.001	0.906	0.475	0.658	0.722	0
52.3	16	52.3	74	13.6	103.7	47.1	57.6	21.7	5.5	0.915	1.001	0.914	0.477	0.668	0.715	0
52.3	16	52.3	73	13.6	103.7	46.5	57.6	20.7	5.2	0.922	1.001	0.921	0.479	0.677	0.708	0
52.3	16	52.3	72	13.6	103.7	45.9	57.6	19.7	4.9	0.929	1.001	0.928	0.481	0.687	0.700	0
52.3	16	52.3	71	13.6	103.7	45.3	57.6	18.7	4.7	0.934	1.001	0.934	0.483	0.698	0.692	0