

7



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA**

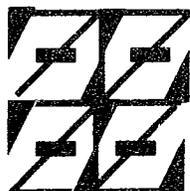
**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN  
TRANSFORMADOR DE CALOR DE UNA  
ETAPA DE 2 kW DE POTENCIA OPERANDO  
CON LA MEZCLA BROMURO DE LITIO-AGUA**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:  
LEONEL BENÍTEZ SERRANO**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

**U.N.A.M.  
FES  
ZARAGOZA**



**LO HUMANO EJE  
DE NUESTRA REFLEXIÓN**

**DIRECTOR DE TESIS:  
DR. WILFRIDO RIVERA GÓMEZ FRANCO**

**MÉXICO, D.F.**

**2002**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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.



**FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA**

**JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA**

**OFICIO: FESZ/JCIQ/049/02**

**ASUNTO: Asignación de Jurado**

**ALUMNO: BENITEZ SERRANO LEONEL**

**P r e s e n t e.**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

<b>Presidente:</b>	<b>I.Q. Rafael Sánchez Dirzo</b>
<b>Vocal:</b>	<b>Dr. Wilfrido Rivera Gómez Franco</b>
<b>Secretario:</b>	<b>I.Q. Cuauhtémoc Lagos Chávez</b>
<b>Suplente:</b>	<b>I.I. Espiridión Muñoz Rivera</b>
<b>Suplente:</b>	<b>M. en I. Eliseo Martínez Espinosa</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A t e n t a m e n t e**

**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**

México, D. F., 14 de Mayo de 2002

**EL JEFE DE LA CARRERA**

**I.Q. ARTURO E. MENDEZ GUTIERREZ**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

### **A DIOS:**

Por todo lo que me has dado,  
Por lo que me has permitido realizar,  
especialmente hoy,  
por ofrecerme la oportunidad de concluir esta etapa,  
eternamente gracias.

### **A MIS PADRES: Eufracia y Francisco**

Por apoyarme durante todo este trayecto,  
por su inagotable amor,  
por estar siempre conmigo,  
por ser un ejemplo de fortaleza,  
por ser uno sólo  
muchas gracias.

### **A MIS HERMANOS: Gumersindo, Leonarda, Rosa, Lourdes y Honorio**

A quienes han sido mis compañeros de toda la vida,  
a quienes crecieron conmigo,  
a quienes aún disfrutan a mi lado cada logro,  
gracias por alentarme a continuar.  
gracias.

**A MI ESPOSA:  
Paula Alicia**

Gracias por tener la paciencia y el valor de luchar conmigo, por tu cariño y tu tesón, sobre todo por tu compañía, gracias.

**A MIS HIJOS:  
Mayra Alejandra, Francisco Leonel y Christian Ariel**

Por que le han dado a mis días un sentido especial, por que poco a poco me han ofrecido la paz que necesitaba y me han dado felicidad en exceso, por que han logrado (sin proponérselo) que desapareciera en mí un vacío existencial que en otro tiempo me acongojara. Gracias por haber venido.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresarle mi más profundo agradecimiento a las personas que me apoyaron directamente en la realización de este trabajo de tesis, se que su ayuda ha sido la base fundamental, para que este sueño que surgió hace muchos años pudiera realizarse, gracias por su amable atención.

### **Al Dr, Wilfrido Rivera Gómez Franco.**

Por haber aceptado ser mi asesor de tesis, por su dirección profesional y por tener ese Don de gente.

### **Al M.C. Jesús Cerezo Román.**

Por ser un excelente amigo y por la desinteresada y valiosa ayuda profesional en la realización de este trabajo.

### **Al Centro de Investigación en Energía (CIE) de la U.N.A.M.**

Al departamento de Sistemas Energéticos particularmente, por darme la oportunidad de hacer mi Servicio Social y mi tesis.

### **AL COMITÉ REVISOR:**

I.Q. Rafael Sánchez Dirzo  
Dr. Wilfrido Rivera Gómez Franco  
I.Q. Cuauhtémoc Lagos Chávez  
I.I. Espiridión Muñoz Rivera  
M. en I. Eliseo Martínez Espinosa

Por haber aceptado ser mis sinodales y por sus valiosos comentarios.

## RESUMEN

El consumo inmoderado de combustibles fósiles y los problemas ecológicos y ambientales generados a raíz de la emanación de contaminantes a la atmósfera, obligan a que muchos países realicen una búsqueda permanente de fuentes energéticas alternas, y que desarrollen una cultura del ahorro de la energía que en los últimos años ha tenido bastante auge. Además, bajo la consideración de que la creciente demanda de energéticos, derivada del desarrollo de las sociedades, ocasiona una explotación inmoderada de los recursos naturales y que estos se irán agotando paulatinamente, se han tenido que crear proyectos de apoyo que establezcan alternativas viables para el ahorro de la energía y la aplicación de fuentes alternativas.

Entre las posibles soluciones para disminuir el consumo de energía esta la tarea de hacer más eficientes los procesos productivos, siendo una alternativa a esto el desarrollo de transformadores de calor; con la finalidad de aprovechar la energía denominada como de baja calidad o energía de desecho, incrementando su temperatura para volverla a utilizar.

Esta tesis presenta la evaluación experimental de un transformador térmico por absorción de una etapa de 2 kW de potencia instalado en el Laboratorio de Termodinámica Aplicada de la Coordinación de Refrigeración y Bombas de Calor del Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México, siendo el presente estudio parte de los proyectos de investigación permanente en sistemas energéticos.

Con el fin de lograr los objetivos de este trabajo, se efectuaron las siguientes actividades: Inicialmente se hace una revisión bibliográfica con el propósito de conocer el estado del arte de esta tecnología a nivel mundial. A continuación se dan las bases teóricas del funcionamiento de estos sistemas. Después se describe de manera detallada la unidad experimental utilizada, así como la instrumentación requerida y la forma en que se calibró ésta para hacer posible la evaluación. Posteriormente se explica la manera en que se realizó la experimentación y se presentan los resultados obtenidos, haciendo un análisis de los mismos, finalmente se dan las conclusiones correspondientes y algunas recomendaciones para trabajos posteriores.

Para la experimentación se empleo la mezcla de trabajo Bromuro de Litio-Agua a diferentes concentraciones, que fueron desde 50.19 % hasta 61.45 % en peso, con intervalos de 2 % en peso aproximadamente. Se hicieron variaciones en la temperatura del aceite térmico a la entrada del absorbedor obteniendo Coeficientes de Operación entre 0.06 y 0.24

# ÍNDICE

## CAPÍTULO 1

### GENERALIDADES 1

---

---

1.1 Introducción.	1
1.2 Ahorro de energía.	2
1.3 Situación energética actual.	3
1.3.1 Consumo actual de energéticos.	3
1.3.2 Consumo de energía primaria.	4
1.3.3 Reservas de petróleo.	6
1.4 Revisión bibliográfica.	7
1.4.1 Estudios teóricos.	7
1.4.2 Estudios experimentales.	10
1.5 Justificación del trabajo.	12
1.6 Objetivos.	12
1.7 Estructura de la tesis.	13

## CAPÍTULO 2

### TRANSFORMADORES DE CALOR POR ABSORCIÓN 14

---

---

2.1 Introducción.	14
2.2 Generalidades.	14
2.3 El ciclo de Carnot.	15
2.3.1 El ciclo de Carnot inverso.	16
2.4 Bombas de calor.	22
2.5 Clasificación de las Bombas de calor.	22
2.5.1 Bomba de calor por compresión mecánica de vapor.	23
2.5.2 Bomba de calor por absorción.	25
2.5.3 Bomba de calor por compresión-absorción.	26
2.6 Transformadores de calor por absorción.	27
2.6.1 Transformador de calor por absorción de una etapa (SSHT).	28
2.6.2 Transformador de calor de doble etapa (TSHT).	30
2.6.3 Transformador de calor de doble absorción (DAHT).	32
2.7 Propiedades de los fluidos de trabajo y de los absorbentes.	33
2.7.1 Fluido de trabajo.	33
2.7.2 Absorbente.	33

2.7.3 Otras propiedades para todos los fluidos.	34
2.8 Principales mezclas fluido de trabajo-absorbente utilizadas en los transformadores térmicos por absorción.	34
2.8.1 Amoníaco-Agua.	34
2.8.2 Bromuro de Litio-Agua.	35
2.9 Aplicaciones industriales de los transformadores de calor	39
2.10 Consideraciones termodinámicas y parámetros de evaluación de los transformadores de calor por absorción.	41
2.10.1 Consideraciones termodinámicas.	41
2.10.2 Parámetros de evaluación.	41
2.10.2.1 Relación de flujo (RF).	41
2.10.2.2 Coeficiente de operación (COP).	42
2.10.2.3 Incremento de temperatura ( $\Delta T$ ).	43

## CAPÍTULO 3

### DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO 44

---

3.1 Introducción.	44
3.2 Descripción del transformador de calor experimental.	44
3.3 Descripción de los componentes del transformador térmico.	46
3.3.1 Generador.	47
3.3.2 Condensador.	48
3.3.3 Evaporador.	50
3.3.4 Absorbedor.	51
3.3.5 Economizador.	53
3.4 Válvulas y tubería.	54
3.5 Materiales y aislantes.	54
3.6 Sistemas auxiliares.	55
3.6.1 Sistema de enfriamiento.	55
3.6.2 Sistema de recuperación de calor.	55
3.6.3 Sistema de vacío.	56
3.7 Instrumentación.	60
3.7.1 Medición de la temperatura.	60
3.7.2 Medidores de presión.	62
3.7.3 Reguladores de flujo.	63
3.7.4 Bombas.	63
3.7.5 Controladores de potencia.	63
3.7.6 Medición de la concentración.	64
3.8 Calibración del equipo de trabajo.	64
3.8.1 Calibración de rotámetros.	64
3.8.2 Calibración de los termopares.	65

3.8.3 Calibración del flujo del aceite en el sistema de recuperación de calor.	66
3.8.4 Calibración de los reguladores de voltaje.	66
3.8.5 Calibración del refractómetro de Abbe para el registro de la concentración.	67
3.9 Metodología de operación del equipo.	67
3.9.1 Metodología de llenado del equipo.	68
3.9.1.1 Alimentación de la solución concentrada en el generador y el absorbedor.	68
3.9.1.2 Ingreso del fluido de trabajo en el condensador y evaporador.	69
3.9.2 Metodología de arranque del equipo.	70
3.9.3 Operación del equipo.	71
3.9.4 Metodología de paro del equipo.	71

## **CAPÍTULO 4**

<b>EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL TRANSFORMADOR DE CALOR POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA OPERANDO CON LA MEZCLA DE TRABAJO BROMURO DE LITIO-AGUA</b>	<b>73</b>
--	-----------

---

4.1 Introducción.	73
4.2 Procedimiento experimental.	73
4.3 Resultados.	75
4.4 Análisis de los resultados.	76

## **CAPÍTULO 5**

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>90</b>
---------------------------------------	-----------

---

5.2 Conclusiones.	90
5.3 Recomendaciones.	91

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>93</b>
---------------------	-----------

---

<b>NOMENCLATURA</b>	<b>96</b>
---------------------	-----------

---

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Las sociedades modernas requieren de un elevado consumo de energía que en los países desarrollados procede fundamentalmente del petróleo y de las centrales nucleares. El inconveniente de los combustibles fósiles es que se agotan y que su consumo crea graves problemas ecológicos y ambientales. Las centrales nucleares, que parecían ser una alternativa, han resultado ser muy caras, en gran medida por la necesidad de complejos sistemas de seguridad y el problema de la eliminación de los residuos contaminantes. Actualmente el desafío consiste en encontrar energías alternativas no contaminantes, eficaces y que favorezcan el ahorro energético, dichas fuentes de energía no resultan ser muy extrañas ya que el ser humano consume y produce energía desde tiempos remotos, por ejemplo con la creación de la rueda y su combinación con la fuerza de elementos naturales como el agua y el viento, obtuvo la energía mecánica, para impulsar veleros, mover una noria, o incluso con la fuerza humana o la de algún animal de carga podía desplazar cuerpos demasiado pesados utilizando troncos para rodarlos, este modelo energético perduró hasta el siglo XVIII, ya que posteriormente con la revolución industrial se utilizaron fuentes como el carbón, el petróleo y la energía nuclear que de la mano del impresionante desarrollo tecnológico, dispararon la producción y el consumo de estos energéticos a niveles insospechables

Desafortunadamente el auge ha tenido también consecuencias no favorables, una de ellas ha sido el cambio en el clima mundial debido a la emanación de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono, producido principalmente por el empleo de energéticos fósiles, cuya utilización se ha visto agigantada, registrando un incremento del 40% entre mediados de la década 70 y comienzos del 90.

Para el 2010 las perspectivas tanto en la emisión de gases como en el consumo de energía, prevén un incremento del 50% con respecto a los índices registrados a mediados de la década del 90. Previéndose también que si se llega a agotar el 25% de las reservas existentes se desencadenaría una catástrofe climática tan severa, que muy difícilmente podría adaptarse cualquier forma de vida en nuestro planeta.

Una manera de reducir el consumo exagerado de los combustibles fósiles es mediante el desarrollo de proyectos que estimulen el uso eficiente de la energía en los procesos productivos, lo cual es de interés general ya que aparte de contribuir a que disminuya el consumo de energía en los procesos de producción, se reducen también por consecuencia los costos de operación y la incidencia de contaminantes que son desechados al medio ambiente.

Cabe mencionar que dentro de este contexto, los transformadores térmicos se manejan como una alternativa para el ahorro de energía en las plantas de proceso principalmente, lo que los hace atractivos para el desarrollo de proyectos que conllevan a su adaptación en las mismas.

## 1.2 AHORRO DE ENERGÍA

Debido a la competencia que se establece actualmente dentro de las empresas, es necesario que estas, realicen un esfuerzo por reducir los costos de producción si quieren sobrevivir en el mercado, para lo cual es necesario que se tengan proyectos de mejora constante que impulsen el desarrollo de ideas, para generar ahorros. Dentro del marco de reducción de costos, la energía es uno de los aspectos más importantes, por lo que no se debe descuidar, tomándose en cuenta sus dos componentes básicos que son, la energía térmica y la energía eléctrica. Sin embargo, para que en una unidad productiva se realicen esfuerzos de ahorro de energía, se necesita antes que nada tener conciencia de los desperdicios, así como una capacitación adecuada en los aspectos energéticos, considerando la administración y las nuevas tecnologías energéticas. Es también importante el conocimiento profundo del comportamiento de la unidad productiva, ya que, de éste se derivan los elementos necesarios para la proposición de nuevas ideas, conceptos y/o proyectos para ahorrar energía.

El ahorro, implica bajar los costos de producción, o producir más con el mismo costo, por esto mismo deben conocerse con detalle los elementos del costo del producto e ir atacando de una manera ordenada cada uno de los rubros implicados en el proceso de producción. En cuanto a las cantidades de energéticos requeridas, no solamente se deben conocer cómo una estimación aproximada, sino también como producto de mediciones reales, ya que a medida que se logre cuantificar con exactitud tanto el consumo, como las pérdidas, en esa misma medida podrá lograrse una mejora.

Otra característica importante a propósito de la necesidad del ahorro en la energía, está dada por el hecho de que existe una vinculación entre las medidas de ahorro y uso eficiente de la energía con el combate a la contaminación, por lo que puede existir un incentivo económico para el consumidor, vinculado al de protección ambiental. La actividad a favor del uso eficiente de la energía, con políticas para el manejo de la demanda, está apenas en su etapa inicial en nuestro país. La planeación energética basada en los mínimos costos hasta el uso final, sólo es objeto de investigación en algunos grupos en nuestro país, entre ellos el Centro de Investigación en Energía de la U.N.A.M. sus beneficios económicos y ambientales no son despreciables, pudiendo establecerse una más estrecha coordinación entre el sector ambiental y energético para su mutuo reforzamiento.

En este sentido, la preocupación por el medio ambiente ha sido desde ya hace muchos años un tema de interés mundial, la devastación ecológica ciertamente es muy antigua, pero el desarrollo de la contaminación normalmente se sitúa con la revolución industrial, al crearse las máquinas que transforman la energía térmica en energía mecánica e iniciarse el uso masivo de los combustibles fósiles.

Sin embargo es en la época actual que el proceso de deterioro ecológico se acelera, Nueva York, Tokio, la ciudad de México, etcétera, son ejemplos de ciudades con problemas ecológicos diversos, tales como la lluvia ácida, la contaminación de las cuencas hidrológicas, acumulación de contaminantes altamente tóxicos en el ambiente, etcétera, y a nivel mundial los agujeros en la capa superior de ozono, o el cambio climático. Estos problemas de contaminación coinciden definitivamente con el incremento desproporcionado en el uso de combustibles fósiles.

Dada la complejidad del tema energético, el objetivo, no es plantear una solución final, sino un proceso que promueva un cambio adecuado a las necesidades sociales y de las empresas, en ese orden, proponiendo un sistema que permita un uso más eficiente de la energía.

Los transformadores térmicos son una opción para coadyuvar en la tarea del ahorro de la energía, ya que existen industrias que desechan calor a la atmósfera a una temperatura entre los 60 y 100 °C, que puede aprovecharse mediante la reutilización del mismo, al incrementar su temperatura, y desde luego su calidad.

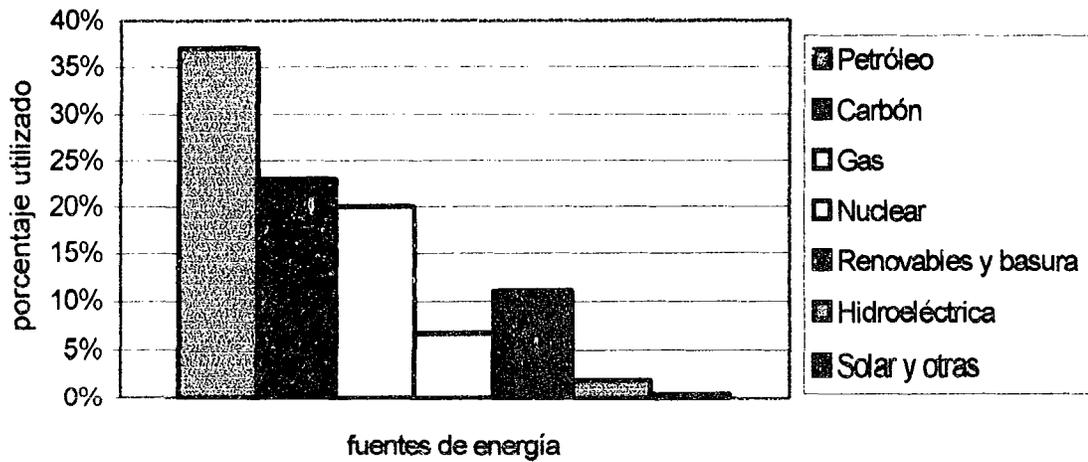
Otros factores tales como los altos costos de los energéticos y la escasez que se tendrá en el petróleo al paso de algunos años ocasiona que muchos países en estos momentos estén destinando importantes sumas de dinero en la investigación de equipos para la recuperación de la energía y para hacer más eficiente el uso de la misma.

### **1.3 SITUACIÓN ENERGÉTICA ACTUAL**

A continuación se presenta un resumen de la forma de consumo de las fuentes energéticas visto desde un enfoque general, señalando también las necesidades de consumo de energía primaria que tienen los países, así como las reservas mundiales de petróleo.

#### **1.3.1 Consumo actual de energéticos**

En la actualidad el consumo de las fuentes energéticas se encuentra distribuido de la siguiente manera: petróleo 37%, carbón 23%, gas 20%, nuclear 6.5%, renovables y basura 11%, hidroeléctrica 2%, solar y otras 0.5%, de lo que se concluye que más de 3/4 partes provienen de fuentes fósiles (gráfica 1.3.1), que son responsables directas de diversos problemas ambientales, como el calentamiento global de la tierra



Gráfica 1.3.1. - Consumo actual de energéticos

Fuente: Consejo Nacional para el Ahorro de la Energía

### 1.3.2 Consumo de energía primaria

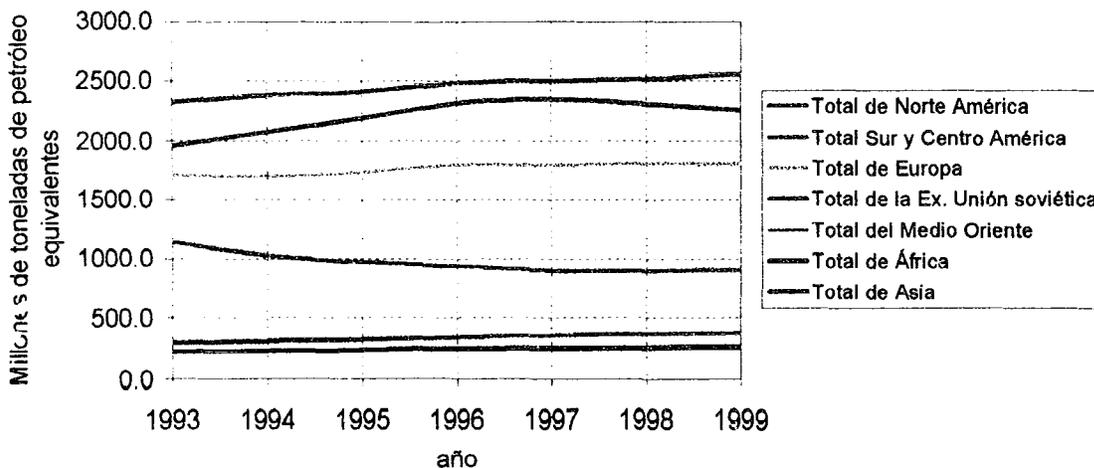
Los hidrocarburos siguen siendo la principal fuente de producción de energía primaria y el consumo de esta aumenta gradualmente debido a las necesidades productivas, de acuerdo con la tabla 1.3.2. se puede ver que México ha tenido un ligero incremento en este rubro al igual que Centro y Sud América, como se muestra también en la figura 1.3.2.

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 1.3.2 Consumo Mundial de Energía Primaria  
(millones de toneladas de petróleo equivalente)

<b>País</b>	<b>1993</b>	<b>1994</b>	<b>1995</b>	<b>1996</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>
Estados Unidos	2001.7	2044.7	2079.6	2144.8	2156.5	2169.5	2204.9
Canadá	214.2	222.9	219.4	225.6	227.7	221.9	227.8
México	103.8	111.6	107.5	112.2	116.6	123.8	124.6
Total de Norte América	2319.7	2379.2	2406.5	2482.6	2500.8	2515.2	2557.3
Total Sur y Centro América	293.6	306.8	321.8	338.6	356.2	367.9	371.2
Total de Europa	1706.8	1694.6	1732.9	1796.4	1790.1	1806.3	1800.8
Total de la Ex. U. soviética	1136.9	1024.5	969.5	936.0	898.8	894.9	908.1
Total del Medio Oriente	285.7	302.7	320.9	343.5	358.3	368.5	380.3
Total de África	220.1	228.3	238.7	247.8	252.0	256.5	261.2
Total de Asia	1956.8	2075.2	2188.0	2314.2	2348.1	2307.5	2254.7
<b>TOTAL MUNDIAL</b>	<b>7919.6</b>	<b>8011.3</b>	<b>8178.3</b>	<b>8459.1</b>	<b>8504.3</b>	<b>8516.8</b>	<b>8533.6</b>

Fuente: British Petroleum, Statical review of world energy



Gráfica 1.3.2 Consumo mundial de energías primarias

Fuente: British Petroleum, Statical review of world energy

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 1.3.3 Reservas de Petróleo

El alto empleo de combustibles fósiles, provoca que sea estratégico el almacenamiento de los mismos para asegurar que en un futuro se pueda contar con el abastecimiento suficiente para satisfacer todas las necesidades energéticas de las principales potencias por lo general en este punto puede observarse de acuerdo con los datos de la tabla 1.3.3 que es medio oriente quien cuenta con las reservas elevadas, siendo también allí donde se da la mayor producción de petróleo.

Tabla 1.3.1 Reservas de Petróleo  
(miles de millones de barriles)

país	A finales de 1979	A finales de 1989	A finales de 1998	A finales de 1999
Estados Unidos	33.7	33.6	30.1	28.6
Canadá	8.1	8.4	6.8	6.8
<b>México</b>	<b>31.3</b>	<b>56.4</b>	<b>47.8</b>	<b>28.4</b>
Total de Norteamérica	73.0	98.4	84.7	63.7
Total sur y Centro América	25.2	68.7	89.0	89.5
Total de Europa	26.6	20.5	20.8	20.6
Total de la Ex. U. Soviética	67.0	58.4	65.4	65.4
Total del Medio Oriente	361.8	660.3	673.6	675.7
Total de Africa	57.1	58.8	75.4	74.9
Total de Asia	39.4	46.6	43.1	44.0
<b>TOTAL MUNDIAL</b>	<b>650.1</b>	<b>1011.7</b>	<b>1052.0</b>	<b>1033.8</b>

Fuente : British Petroleum, Statistical Review of World Energy

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

## 1.4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Durante los últimos años se han publicado importantes estudios sobre los transformadores de calor, lo que ha contribuido a que las expectativas de utilizarlos para el aprovechamiento de energía de desecho se vea más real. A continuación se presenta una revisión bibliográfica de los estudios más recientes, la cual se ha dividido en dos partes: teórica y experimental, en la que de manera cronológica se hace un pequeño resumen del contenido de cada una de las publicaciones hechas.

### 1.4.1 Estudios teóricos

En 1990, Best et al, publicaron información sobre el diseño termodinámico de un transformador de calor, trabajando con la mezcla amoníaco-nitrato de litio ( $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ ). Reportaron gráficas y tablas con diversas combinaciones de temperaturas de operación y concentraciones, velocidades de flujo, así como de coeficientes de operación de Carnot y entálpicos para este sistema.

En 1990, Ciambelli y Tufano analizaron el funcionamiento de un transformador térmico de una etapa, operando con una fuente de calor finita, la mezcla de trabajo utilizada fue agua-ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$ ), concluyeron que la operación del transformador térmico disminuía debido a la consideración del sistema con las fuentes y sumideros de calor finitos. Sin embargo, este tipo de transformadores de calor parece ser el más adecuado para trabajar a temperaturas elevadas en donde la fuente de calentamiento permanece a una temperatura constante.

En 1990, Holmberg y Berntsson publican un estudio teórico del comportamiento de un transformador de calor utilizando como fluidos de trabajo los pares binarios y terciarios: agua-hidróxido de potasio ( $\text{H}_2\text{O}/\text{KOH}$ ), agua-hidróxido de sodio ( $\text{H}_2\text{O}/\text{NaOH}$ ), agua-ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2\text{SO}_4$ ), agua-bromuro de litio-cloruro de zinc ( $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}/\text{ZnCl}_2$ ) (con relación 1:1 en peso), agua-bromuro de litio-cianida sulfuro de litio ( $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}/\text{LiSCN}$ ) (con relación 1:1 por mol) y agua-bromuro de litio-cloruro de litio ( $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}/\text{LiCl}$ ) (con relación 2:1 por mol). Basándose en las propiedades termodinámicas de las soluciones y de un programa de cómputo que simula el transformador de calor, llevaron a cabo la evaluación concluyendo que con el par agua-hidróxido de potasio se obtiene una mejor operación que con el par agua-bromuro de litio, aunque la solubilidad del hidróxido de potasio es más baja que la del bromuro de litio.

En 1991, Patit et al, publicaron un estudio del comportamiento teórico de un transformador de calor operando con la mezcla agua-yoduro de litio ( $\text{H}_2\text{O}/\text{LiI}$ ), reportan también el efecto del economizador en la eficiencia del sistema. Concluyendo que es conveniente el uso del economizador y también es adecuado operar el transformador de calor con las mismas temperaturas en el generador y en el evaporador.

En 1992, Best et al, publicaron los resultados de la simulación de un transformador de calor trabajando con la mezcla amoníaco-tiocianato de sodio ( $\text{NH}_3/\text{NaSCN}$ ). Concluyendo que se puede generar calor útil a una temperatura de  $140\text{ }^\circ\text{C}$ , el cual se puede liberar en el absorbedor estando el evaporador a una temperatura de  $90\text{ }^\circ\text{C}$ . Reportaron además relaciones entre los principales parámetros de diseño para un amplio rango de condiciones de operación.

En 1992, Ciambelli y Tufano propusieron una configuración alternativa para un transformador de calor de doble etapa, que es más compleja, ya que incluye dos evaporadores en la segunda etapa lo cual podría mejorar la calidad del calor obtenido y podrían emplearse fuentes de calentamiento de baja calidad. Compararon el comportamiento del sistema agua-ácido sulfúrico ( $H_2O/H_2SO_4$ ) contra los resultados obtenidos en transformadores de calor con otras configuraciones. Concluyendo de acuerdo a los índices de operación que la configuración propuesta no resulta ser conveniente.

En 1992, Jernqvist et al, Efectuaron un estudio sobre las mediciones de la eficiencia de transformadores de calor, concluyendo a partir de éste que el coeficiente de operación debe usarse exclusivamente para comparar la operación de diferentes transformadores de calor así como la velocidad de flujo. Emplearon resultados obtenidos con la mezcla de trabajo agua-hidróxido de sodio ( $H_2O/NaOH$ ) para exponer la aplicación de otras eficiencias propuestas. Sugiriéndose la utilización del índice exergético para evaluar la operación de transformadores de calor.

En 1994, Best y Rivera, reportaron un estudio de simulación para un transformador de calor por absorción operando con la mezcla carrol-agua, donde carrol es una combinación de bromuro de litio ( $LiBr$ ) y etilen glicol ( $CH_2OH$ )<sub>2</sub> en relación 1:4.5. Concluyendo que teóricamente es posible alcanzar un incremento de temperatura de 60 °C con esta mezcla, a diferentes temperaturas de suministro de calor. Además reportaron posibles combinaciones de temperaturas, concentraciones, relaciones de flujo y coeficientes de operación.

En 1994 a, Rivera et al, publicaron un análisis termodinámico para transformadores de calor operando con la mezcla de trabajo  $H_2O/LiBr$ . Incluyendo en este estudio el análisis de la efectividad del economizador en la operación de un transformador de calor de una etapa, además de analizar tres configuraciones para el transformador de calor. Concluyendo que se pueden alcanzar mayores coeficientes de operación y mayor temperatura en el absorbedor al utilizar el intercambiador de calor.

En 1994 b, Rivera et al, efectuaron un estudio para analizar el comportamiento de un transformador de calor de doble etapa y el de un transformador de doble absorción operando con la mezcla de trabajo bromuro de litio-agua ( $H_2O/LiBr$ ). Concluyendo que el sistema de doble absorción técnicamente más simple, puede lograr un aumento de temperatura y lograr coeficientes de operación tan altos como los transformadores de doble etapa.

En 1994, Iyoki et al, reportaron el estudio teórico de la operación de máquinas de refrigeración por absorción, bombas de calor por absorción, y transformadores de calor por absorción empleando como mezclas varios absorbentes binarios y terciarios. El cálculo de los coeficientes de operación se realizó usando las entalpías a diferentes temperaturas, presión y concentración del absorbente. Los sistemas analizados fueron: (i) en máquinas de refrigeración de doble efecto, una etapa y doble etapa (ii) en bombas de calor por absorción de simple efecto y doble efecto y (iii) transformadores de calor por absorción de una etapa y doble etapa.

En 1997, Best et al, publicaron un modelo matemático para la operación de un transformador de calor de una etapa, doble etapa y doble absorción operando con la mezcla carrol/agua, concluyendo de acuerdo con los resultados que los coeficientes de operación son mayores en el

transformador de calor de una etapa, con la desventaja de que el rango de temperatura con el que se puede trabajar, es el más bajo. En cuanto a los transformadores de calor de doble etapa y doble absorción, se concluyó que se obtienen valores de coeficientes de operación y de incrementos de temperatura similares para algunas condiciones de operación. El incremento mayor de temperatura para el transformador de una etapa se da alrededor de los 60 °C, mientras que para el de doble absorción y doble etapa es de alrededor de 105 °C.

En 1998, Rivera et al, publicaron un modelo matemático para predecir el comportamiento de transformadores de calor por absorción de una etapa, dos etapas y doble absorción, operando con la mezcla bromuro de litio/agua y carrol/agua, Haciendo una comparación de los coeficientes de operación e incrementos de temperatura en función de la temperatura del sistema para ambas mezclas. Concluyendo que la mezcla de carrol/agua presenta mejores características de operación que la mezcla de bromuro de litio/agua.

En 1998, Saravanan et al, reportaron un análisis termodinámico de un sistema de refrigeración por absorción de vapor, donde utilizan cuatro mezclas binarias que tienen como base agua, variando para la simulación las temperaturas de operación y la efectividad del intercambiador de calor, concluyendo que la mezcla binaria de agua/cloruro de litio es conveniente para utilizarse a bajas temperaturas, mientras que la mezcla cuaternaria agua/bromuro de litio/cloruro de litio/cloruro de zinc tiene los mayores coeficientes de operación.

En 1999, Ishida et al, desarrollaron un estudio gráfico exergetico para transformadores de calor por absorción de una etapa. Concluyendo que este análisis puede proporcionar información detallada sobre los fenómenos internos y la distribución de pérdida de exergía en cada subsistema del transformador, lo que puede ayudar a su optimización.

En 2000, Talbi et al, publicaron un análisis de exergía de un sistema de refrigeración por absorción de simple efecto, utilizando la mezcla de trabajo bromuro de litio/agua. Señalando que el proceso termodinámico en los sistemas de calor por absorción libera una gran cantidad de calor a mayor temperatura que la del ambiente, lo que ocasiona daños irreversibles a los componentes del sistema. Presentaron la tabulación de los resultados numéricos obtenidos, concluyendo que estos pueden ser utilizados para un procedimiento de optimización.

En 2000, Yin et al, reportaron un análisis teórico sobre la operación de un transformador de calor por absorción de una etapa, trabajando con la combinación de diferentes mezclas de trabajo, señalando que se puede recuperar alrededor del 50% del calor desechado en procesos industriales para su reutilización, pero que sin embargo existe la necesidad de identificar el fluido de trabajo adecuado. Presentaron un estudio comparativo con H<sub>2</sub>O/LiBr, TFE(2,2,2 trifluoroetanol), NMP(N-metil-2-pirolidon), TFE/E181(dimetil éter tetraetilen glicol) y TFE/PYR (2-pirotidone), concluyendo conforme a los resultados, que las cuatro combinaciones son adecuadas para trabajar con el transformador de calor por absorción de una etapa, que la mezcla H<sub>2</sub>O/LiBr es apropiada para trabajar a bajas temperaturas, mientras que TFE/NMP, TFE/E181 y TFE/PYR son adecuadas para altas temperaturas de operación.

En 2001, Arun et al, desarrollaron la comparación de un sistema de refrigeración de doble efecto trabajando con la mezcla bromuro de litio/agua para flujo en serie y flujo en paralelo, concluyendo que se obtienen mayores coeficientes de operación para el ciclo de flujo en paralelo,

bajo las condiciones de operación analizadas. También reportan que la operación de sistemas de flujo en paralelo es más sensible al bajar la presión que en los sistemas de flujo en serie, y que el coeficiente de operación es más sensible a las variaciones de temperatura en los sistemas de flujo en paralelo que en los de flujo en serie.

En 2001, Romero et al, publicaron la comparación teórica en la operación de una bomba de calor para enfriamiento y calentamiento trabajando con la mezcla  $H_2O/LiBr$  y una mezcla alternativa ternaria de hidróxidos consistente en  $NaOH:KOH:CsOH$  en proporciones 40:36:24, reportando los coeficientes de operación de Carnot y coeficientes de operación entálpicos, así como el incremento mayor de temperatura. Concluyendo que se obtienen coeficientes de operación similares para ambas mezclas, en tanto que el sistema con la mezcla alternativa puede operar en un rango mayor de temperaturas para el condensador y el absorbedor, y que el calor liberado por estos componentes puede ser fácilmente removido con aire.

#### **1.4.2 Estudios experimentales**

En 1990, Alefeld et al, publicaron un estudio sobre el funcionamiento de bombas de calor por absorción avanzadas, transformadores de calor y combinaciones de ellos. Desarrollaron un transformador de calor de doble absorción operando con el par de trabajo  $H_2O/LiBr$ . Alcanzando incrementos de temperatura entre 60 y 70 °C con un coeficiente de operación cercanos a 0.3

En 1991, Herold y Radermacher analizaron un ciclo nuevo de absorción, alcanzando un incremento significativo en la temperatura del calor generado. El ciclo se basa en el uso de una mezcla ternaria, que consiste de hidróxido de sodio, potasio y calcio, en proporción de 40:36:24. Concluyeron que con el fluido de trabajo propuesto se logran alcanzar incrementos de temperatura suficientes para aplicaciones de calentamiento de agua.

En 1991, Arh y Gaspersic, construyeron una unidad experimental, que consiste en la combinación de una bomba de calor/transformador de calor, la cual proporciona simultáneamente calentamiento y enfriamiento utilizando como mezcla de trabajo  $H_2O/LiBr$ . Los resultados preliminares muestran que hay un buen potencial con respecto al enfriamiento y capacidad de calentamiento para que puedan ser integrados en procesos industriales.

En 1992, Nomura y Nishimura propusieron un sistema de secado empleando un transformador de calor por absorción que trabaja con energía solar. El transformador de calor se maneja directamente por calentamiento desde un colector solar. Concluyendo que este sistema se puede utilizar en industrias donde requieren elevadas temperaturas para secado.

En 1993, George y Murthy publicaron los resultados experimentales que obtuvieron de un transformador de calor por absorción de 2 kW de potencia, operando con la mezcla de trabajo  $R21/DMETG$ . Obteniendo un incremento de temperatura de 20 °C, para una temperatura en el absorbedor arriba de 85 °C. El coeficiente de operación varió entre 0.2 y 0.35, mientras que la eficiencia exergética estuvo entre 0.3 y 0.4. Observando también que la efectividad de la transferencia de masa en el absorbedor disminuye con el incremento de temperatura.

En 1993, Krom y Oostendorp publicaron la operación exitosa de un transformador de calor de 4 MW instalado en una industria de acero de Holanda. Los autores publicaron la experiencia con el primer transformador de calor en Holanda en AKZO Delamine reportado por Bouma en 1990 y como fueron resueltos los problemas. Reportaron también los cambios en la economía desde el inicio del proyecto. Señalando que los transformadores de calor serían más atractivos si el precio de la energía fuera 50% más elevado.

En 1993, Zhuo y Machielsen reportaron un estudio de propiedades termofísicas para la mezcla de trabajo trifluoroetano/pirrolidona (TFE/Pir). Concluyendo que esta mezcla puede utilizarse satisfactoriamente en transformadores de calor por absorción debido a la buena combinación de sus propiedades térmicas y físicas.

En 1994, Curie y Pritchard, presentaron resultados de un transformador de calor de doble etapa, diseñado para investigar el potencial de deshumidificación en una unidad industrial de secado. Obteniendo datos de operación que muestran a una corriente de aire fría calentada a una temperatura de 160 °C, utilizando una solución de LiBr al 68% en peso, el aumento de temperatura entre 50 y 70 °C fue alcanzado en la columna de recalentamiento empleando bajas velocidades de flujo y altas concentraciones de LiBr. Los coeficientes de operación y exergeticos varían entre 0.2 - 0.3 y 0.4 - 0.7 respectivamente.

En 1994, Zhuo y Machielsen, analizaron la operación de un transformador de calor por absorción con TFE/Pir como mezcla de trabajo. El transformador de calor fue construido y operado en el laboratorio de ingeniería de refrigeración, en la universidad de Delft del Instituto Tecnológico de Holanda. Se desarrolló un programa de cómputo para investigar la influencia de las condiciones de operación, parámetros de diseño y dimensiones de los componentes en el funcionamiento del transformador de calor. También hicieron la comparación teórica del funcionamiento de un transformador de calor operando con H<sub>2</sub>O/LiBr y TFE/Pir. Concluyendo que con la mezcla H<sub>2</sub>O/LiBr se pueden lograr mayores coeficientes de operación, sin embargo, debido a problemas de corrosión la mezcla de TFE/Pir puede ser más adecuada a temperaturas cercanas a 150 °C.

En 1995, Abrahamsson et al, presentaron el diseño y operación experimental de un transformador de calor por absorción de 10 kW de potencia, basado en circulación natural, trabajando con la mezcla H<sub>2</sub>O/NaOH. El transformador de calor produjo vapor a 123 °C usando vapor a 100 °C en el generador y el evaporador. Concluyendo que se estima la recuperación de capital para esta unidad en un periodo de 4.4 años.

En 1996, Eisa, publicó propuestas económicas para bombas de calor presentando un número de condiciones básicas que deben satisfacerse. Bajo estas condiciones y de acuerdo con datos técnicos y experimentales se discute la aplicación de las bombas de calor en procesos químicos. Concluyendo que las bombas de calor son los únicos sistemas de recuperación de calor capaces de incrementar la temperatura de calor de deshecho, energía del medio ambiente o incrementar la corriente de proceso y que tienen un enorme potencial para reducir los requerimientos de energía primaria de múltiples procesos.

En 1999, Rivera et al, reportaron los resultados obtenidos durante la experimentación, con un transformador de calor por absorción de una etapa (SSHT), utilizando como mezcla de trabajo carrol/agua, donde carrol es una mezcla de bromuro de litio (LiBr) y etilen glicol (CH<sub>2</sub>OH)<sub>2</sub> en

una relación 1:4.5, reportando la razón de flujo, el calor útil y los coeficientes de operación en función de la temperatura y de la concentración de la solución, concluyendo que la mezcla de carrol/agua tiene mayor solubilidad que la de bromuro de litio/agua, por lo que se puede trabajar a mayores temperaturas, considerándola más apropiada que la primera, a temperaturas elevadas.

En 1999, Santoyo et al, analizaron las ventajas de acoplar un transformador de calor por absorción de una etapa trabajando con la mezcla Bromuro de Litio/Agua a un sistema de destilación simple para tratamiento de efluentes. Reportando resultados de coeficientes de operación en el rango de 0.1 a 0.4, y efectividad de la bomba de calor de 0.58 a 0.72, por lo que se considera apropiado este sistema a pequeña escala, para que pueda operarse a escala industrial con energía de deshecho, solar o geotérmica.

## **1.5 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO**

En la actualidad existen en nuestro país y en muchos otros países del mundo, industrias que disipan calor al medio ambiente a temperaturas que varían entre los 60 y 100°C debido a que no les es útil a esas condiciones, disminuyendo con esto, su eficiencia y aumentando sus costos de operación, así como la producción de contaminantes que son liberados a la atmósfera debido al consumo de combustibles fósiles.

De esta manera las reservas naturales se irán agotando paulatinamente debido a la explotación inmoderada, así como a la creciente demanda de energéticos consecuencia lógica del desarrollo de las sociedades, lo que hace necesario crear proyectos de apoyo que establezcan alternativas viables para el ahorro de la energía y la aplicación de fuentes alternativas.

Por estas razones se plantea como proyecto de tesis, la operación de un transformador de calor de una etapa operando con la mezcla Bromuro de Litio-Agua, con el propósito de demostrar la factibilidad del uso de calor residual a baja temperatura para transformarlo en calor útil a una temperatura mayor.

## **1.6 OBJETIVOS**

Los objetivos que se plantearon para que se pudiera llevar a cabo adecuadamente el desarrollo de la presente tesis son los siguientes:

1. Operar el transformador térmico por absorción de una etapa de 2 kW de potencia instalado en el Laboratorio de Termodinámica Aplicada de la Coordinación de Refrigeración y Bombas de Calor del Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México, utilizando para su operación la mezcla de trabajo Bromuro de Litio-Agua (H<sub>2</sub>O/LiBr)
2. Calibrar la instrumentación que se requiere para la evaluación del transformador térmico.

3. Analizar el comportamiento del transformador térmico con base en los resultados obtenidos durante la experimentación.

## **1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS**

Para conseguir que los objetivos planteados se logren, la presente tesis se ha elaborado bajo la siguiente estructura:

En el capítulo 1 se presentan los aspectos generales sobre la situación energética mundial planteando la necesidad de hacer más eficiente el uso de la energía. Se hace una revisión bibliográfica sobre el tema y se justifica el presente trabajo, mencionando también cuales son los objetivos de éste.

En el capítulo 2 se dan los aspectos generales sobre las bombas de calor más comunes y se presenta una descripción de los transformadores de calor por absorción, señalando las características de las mezclas de trabajo más empleadas, haciendo énfasis en la mezcla Bromuro de Litio-Agua.

En el capítulo 3 se hace una descripción de cada uno de los componentes del transformador utilizado, así como de los equipos auxiliares, la instrumentación, las conexiones y los aislantes, también se presenta la metodología que se siguió para calibrar los sistemas de medición, así como las ecuaciones obtenidas durante la calibración, y la metodología para la operación adecuada del transformador térmico.

En el capítulo 4 se explica cual fue el procedimiento experimental y se presentan los resultados obtenidos haciendo un análisis de los mismos.

En el capítulo 5 se dan las conclusiones y se hacen algunas recomendaciones para trabajos posteriores con el mismo transformador de calor.

De esta manera se desarrollara la parte teórica y la parte experimental para la evaluación del transformador térmico por absorción de una etapa de 2 kW de potencia.

## **CAPITULO 2**

### **TRANSFORMADORES DE CALOR POR ABSORCIÓN**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

El trabajo es una forma muy valiosa de energía, ya que 100% de trabajo, puede convertirse en calor, y sólo una fracción de calor puede convertirse en trabajo. Al incrementar la temperatura de la energía calorífica que generalmente ya no se emplea por su bajo potencial de trabajo, se logra el ahorro en los requerimientos de energía primaria de las plantas de proceso, lo que aumenta la eficiencia de la planta productiva, disminuyendo lógicamente, los costos de producción, así como el consumo de energéticos, y la contaminación del medio ambiente.

Esta Tesis pretende analizar experimentalmente el comportamiento de un transformador de calor por absorción de una etapa, por lo que se hace especial énfasis en el ciclo de funcionamiento de este transformador y en la mezcla de trabajo utilizada durante la experimentación, También se mencionan las consideraciones termodinámicas y los parámetros más importantes para evaluar el transformador.

#### **2.2 GENERALIDADES**

Cuando se transfiere calor de un cuerpo de alta temperatura a uno de menor temperatura, la energía térmica se degrada, debido a que una menor cantidad del mismo puede convertirse en trabajo, por lo que se puede decir que la energía tiene calidad, así como cantidad. A partir de valores de eficiencia térmica se puede ver que más cantidad de energía térmica de alta temperatura puede convertirse en trabajo. Por lo que se puede decir que entre más alta es la temperatura, mayor es la calidad de la energía.

Por ejemplo, cantidades grandes de energía solar pueden ser almacenadas en un estanque solar a aproximadamente 350 K esta energía almacenada puede ser suministrada a una máquina térmica para producir algún tipo de trabajo, pero la energía almacenada en la fuente es de muy baja calidad lo que no hace alentador su empleo, aún cuando sea gratuita. Existen diversas formas de aumentar la calidad de la energía en un estanque solar, por ejemplo mediante colectores concentradores, pero en ese caso el costo del equipo se vuelve muy elevado.

Es importante que la inversión que se haga en cualquier industria para la implementación de un equipo de ahorro de energía, sea redituable, para alentar los esfuerzos de investigación.

En la actualidad existen una serie de medidas encaminadas a "conservar la energía", aunque de hecho sabemos que la energía se conserva, lo que no se conserva es su calidad, o el potencial de trabajo de ésta. En tal sentido, un transformador por absorción de una etapa como el que se

analiza en la presente Tesis, tiene el objetivo de incrementar la calidad de la energía que comúnmente se desecha en la industria, revalorizándola, para que pueda emplearse en alguna etapa posterior del proceso.

## 2.3 EL CICLO DE CARNOT

Las máquinas térmicas son dispositivos cíclicos, es decir que el fluido de trabajo regresa a su estado inicial al final del ciclo, en este caso se dice que el fluido realiza trabajo en una parte del ciclo, y también en otra parte se realiza trabajo sobre el mismo, la diferencia entre estos dos es el trabajo neto entregado por la máquina térmica, la eficiencia de una máquina térmica depende de la forma como se efectúen los procesos individuales que integran el ciclo, esta eficiencia o trabajo neto, puede maximizarse al utilizar procesos que requieran la menor cantidad de trabajo y entreguen el máximo, es decir, empleando procesos reversibles.

Aunque se sabe que los ciclos reversibles no pueden ser alcanzados en la práctica, debido a que no pueden eliminarse completamente las irreversibilidades asociadas a cada proceso, sin embargo, los ciclos reversibles son útiles ya que representan límites superiores en el rendimiento de los ciclos reales. Las máquinas térmicas y los refrigeradores, que trabajan en ciclos reversibles, son modelos con los cuales las máquinas térmicas y los refrigeradores reales pueden compararse. Los ciclos reversibles sirven también como punto de partida en el desarrollo de los ciclos reales y se modifican según se necesite.

El ciclo reversible más conocido es el ciclo de Carnot, quien lo propuso por primera vez en 1824. La máquina teórica con la que opera este ciclo, se conoce como la máquina térmica de Carnot. El ciclo de Carnot se compone de cuatro procesos reversibles: dos isotérmicos y dos adiabáticos. Este ciclo puede llevarse a cabo, ya sea en un sistema cerrado o en uno de flujo permanente.

Para ejemplificar la explicación anterior, se puede considerar un sistema cerrado compuesto por un gas contenido en un dispositivo de cilindro-émbolo adiabático, como se indica en la figura 2.3.1. El aislamiento de la cabeza del cilindro es tal que puede quitarse para poner el cilindro en contacto con depósitos que permitan la transferencia de calor. Los cuatro procesos reversibles que componen el ciclo de Carnot son los siguientes:

### Expansión isotérmica reversible

En el estado 1 (figura 2.3.1), la temperatura del gas es  $T_H$ , y la cabeza del cilindro está en contacto con una fuente de temperatura  $T_H$ , entonces el gas se expande lentamente y efectúa trabajo sobre sus alrededores, cuando se expande el gas su temperatura tiende a disminuir, pero en cuanto la temperatura disminuye en una cantidad infinitesimal  $dT$ , fluye calor del depósito al gas, elevando su temperatura nuevamente hasta  $T_H$ , en consecuencia se puede decir que la temperatura del gas se mantiene constante en  $T_H$ . Como la diferencia de temperatura entre el gas y el depósito de temperatura no excede una cantidad diferencial  $dT$ , este es un proceso de transferencia de calor reversible, el cual continúa hasta que el émbolo alcanza una posición 2, la cantidad de calor total que se le ha transferido al gas es  $Q_H$ .

### **Expansión adiabática reversible**

En el estado 2 (figura 2.3.2), el depósito se quita y se reemplaza por un aislamiento de manera que el sistema se vuelve adiabático, ya que la cabeza del cilindro no está en contacto con la fuente de temperatura. El gas continúa su expansión lenta y efectúa trabajo sobre sus alrededores hasta que su temperatura desciende de  $T_H$  a  $T_L$ . En este caso se supone que no hay fricción en el émbolo y el proceso será de cuasiequilibrio, por lo que el proceso es tanto reversible como adiabático.

### **Compresión isotérmica reversible**

En estado 3 (figura 2.3.3), se quita el aislamiento en la cabeza del cilindro para que entre en contacto con un sumidero a temperatura  $T_L$ , después se efectúa trabajo sobre el gas empujando el émbolo hacia dentro mediante una fuerza externa. A medida que se comprime el gas su temperatura tiende a aumentar, sin embargo, tan pronto como se incrementa en una cantidad infinitesimal  $dT$ , fluye calor del gas al sumidero, disminuyendo la temperatura del gas a  $T_L$ , por lo que la temperatura del gas se mantiene constante en  $T_L$ , como la diferencia de temperatura entre el gas y el sumidero nunca se excede de una cantidad diferencial  $dT$ , éste es un proceso de transferencia de calor reversible. Este proceso sigue hasta que el émbolo alcanza la posición 4. La cantidad de calor total desechada por el gas es  $Q_L$ .

### **Compresión adiabática reversible**

En el estado 4 (figura 2.3.4), se quita el sumidero, y se vuelve a poner el aislamiento sobre la cabeza del cilindro y el gas se comprime de manera reversible, regresando a su estado inicial, en este punto la temperatura aumenta de  $T_L$  a  $T_H$ , completándose así el ciclo.

En la figura 2.3.5 se muestra el diagrama de P-v, el área bajo la curva del proceso, representa el trabajo de la frontera en procesos de cuasiequilibrio (internamente reversibles), el área bajo la curva 1-2-3 es el trabajo efectuado por el gas durante la expansión, y el área bajo la curva 3-4-1 es la parte de trabajo efectuada por el gas durante la compresión. El área encerrada durante la trayectoria del ciclo 1-2-3-4-1, es la diferencia entre estas dos y representa el trabajo neto efectuado durante el ciclo.

#### **2.3.1 El ciclo de Carnot inverso**

El ciclo de la máquina térmica de Carnot, es un ciclo totalmente reversible, por lo que los procesos que comprende pueden invertirse, en cuyo caso se convierte en el ciclo de refrigeración de Carnot. En este caso el ciclo es igual, solamente que las interacciones de calor y de trabajo se invierten, es decir que se absorbe una cantidad de calor  $Q_L$  del depósito de baja temperatura, y se deshecha calor en la cantidad de  $Q_H$  en un depósito de alta temperatura. Para lograrlo se necesita una cantidad de trabajo de  $W_{en,neto}$ .

### **Expansión adiabática reversible**

En el estado 2 (figura 2.3.2), el depósito se quita y se reemplaza por un aislamiento de manera que el sistema se vuelve adiabático, ya que la cabeza del cilindro no está en contacto con la fuente de temperatura. El gas continúa su expansión lenta y efectúa trabajo sobre sus alrededores hasta que su temperatura desciende de  $T_H$  a  $T_L$ . En este caso se supone que no hay fricción en el émbolo y el proceso será de cuasiequilibrio, por lo que el proceso es tanto reversible como adiabático.

### **Compresión isotérmica reversible**

En estado 3 (figura 2.3.3), se quita el aislamiento en la cabeza del cilindro para que entre en contacto con un sumidero a temperatura  $T_L$ , después se efectúa trabajo sobre el gas empujando el émbolo hacia dentro mediante una fuerza externa. A medida que se comprime el gas su temperatura tiende a aumentar, sin embargo, tan pronto como se incrementa en una cantidad infinitesimal  $dT$ , fluye calor del gas al sumidero, disminuyendo la temperatura del gas a  $T_L$ , por lo que la temperatura del gas se mantiene constante en  $T_L$ , como la diferencia de temperatura entre el gas y el sumidero nunca se excede de una cantidad diferencial  $dT$ , éste es un proceso de transferencia de calor reversible. Este proceso sigue hasta que el émbolo alcanza la posición 4. La cantidad de calor total desechada por el gas es  $Q_L$ .

### **Compresión adiabática reversible**

En el estado 4 (figura 2.3.4), se quita el sumidero, y se vuelve a poner el aislamiento sobre la cabeza del cilindro y el gas se comprime de manera reversible, regresando a su estado inicial, en este punto la temperatura aumenta de  $T_L$  a  $T_H$ , completándose así el ciclo.

En la figura 2.3.5 se muestra el diagrama de P-v, el área bajo la curva del proceso, representa el trabajo de la frontera en procesos de cuasiequilibrio (internamente reversibles), el área bajo la curva 1-2-3 es el trabajo efectuado por el gas durante la expansión, y el área bajo la curva 3-4-1 es la parte de trabajo efectuada por el gas durante la compresión. El área encerrada durante la trayectoria del ciclo 1-2-3-4-1, es la diferencia entre estas dos y representa el trabajo neto efectuado durante el ciclo.

#### **2.3.1 El ciclo de Carnot inverso**

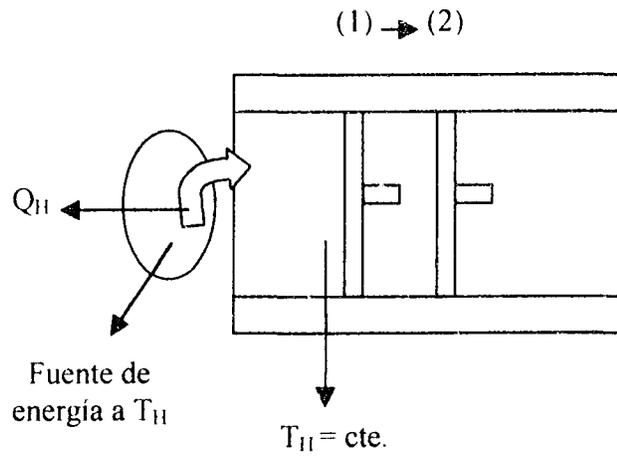
El ciclo de la máquina térmica de Carnot, es un ciclo totalmente reversible, por lo que los procesos que comprende pueden invertirse, en cuyo caso se convierte en el ciclo de refrigeración de Carnot. En este caso el ciclo es igual, solamente que las interacciones de calor y de trabajo se invierten, es decir que se absorbe una cantidad de calor  $Q_L$  del depósito de baja temperatura, y se deshecha calor en la cantidad de  $Q_H$  en un depósito de alta temperatura. Para lograrlo se necesita una cantidad de trabajo de  $W_{en,neto}$ .

El diagrama P-v para el ciclo de Carnot invertido es el mismo que para el Ciclo de Carnot, con la diferencia de que todas las direcciones de los procesos están invertidas. Como se ve en la figura 2.3.6.

En la figura 2.3.7 se presenta un diagrama de T-S, la trayectoria representa el ciclo de Carnot, en la etapa 1-2 hay una absorción isotérmica de calor desde una fuente de alta temperatura a  $T_H$  en una cantidad  $Q_H$ ; esta etapa corresponde a un proceso de vaporización a presión constante y produce vapor saturado a partir del líquido saturado. La etapa 2-3 corresponde a una expansión isentrópica donde disminuye la temperatura hasta  $T_L$ , la etapa 3-4 es un rechazo de calor isotérmico hacia un sumidero a baja temperatura a  $T_L$  en una cantidad  $Q_L$  siendo un proceso de condensación incompleto, en la línea 4-1 regresa el ciclo a su origen, produciendo líquido saturado en el punto 1 mediante un proceso de compresión isentrópica.

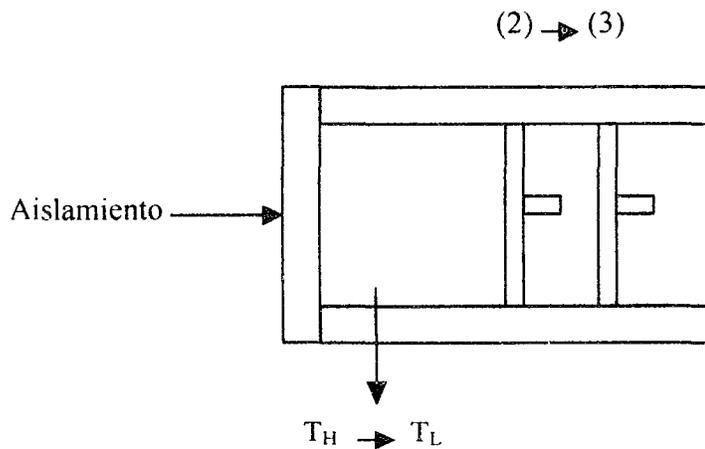
En la figura 2.3.8 se presenta el diagrama T-S para el ciclo de Carnot inverso, en la etapa 1-2 el refrigerante absorbe calor isotérmicamente de una fuente de baja temperatura a  $T_L$  en la cantidad  $Q_L$ , en la etapa 2-3 se comprime isentrópicamente hasta vapor saturado aumentando su temperatura hasta  $T_H$ , en la etapa 3-4, rechaza calor isotérmicamente en un sumidero de alta temperatura a  $T_H$  en la cantidad de  $Q_H$  pasando de vapor saturado a líquido saturado, finalmente en la etapa 4-1 se expande isentrópicamente hasta el estado 1 donde la temperatura desciende hasta  $T_L$ .

Al ser un ciclo reversible, el de Carnot es el ciclo más eficiente que opera entre dos límites de temperatura especificados, la eficiencia de los ciclos reales puede mejorarse si se aproximan al ciclo de Carnot.



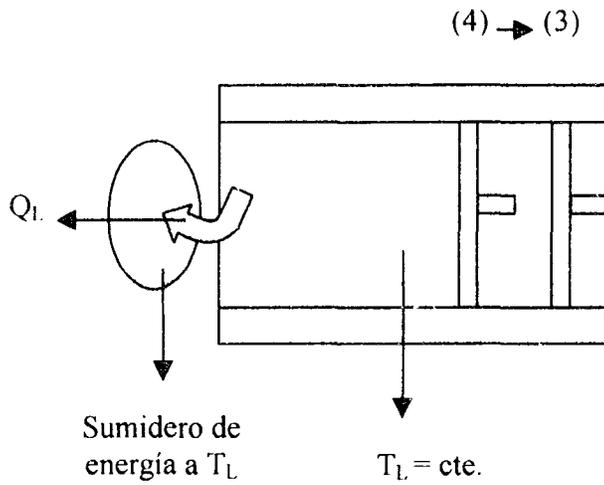
a) Proceso 1-2

Figura 2.3.1 diagrama esquemático que representa el proceso de expansión isotérmica reversible del ciclo de Carnot



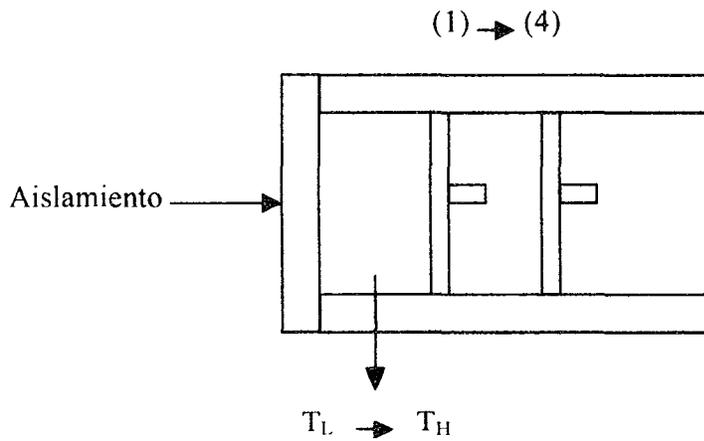
b) Proceso 2-3

Figura 2.3.2 diagrama esquemático que representa el proceso de expansión adiabática reversible del ciclo de Carnot



c) Proceso 3-4

Figura 2.3.3 diagrama esquemático que representa el proceso de compresión isotérmica reversible del ciclo de Carnot



d) Proceso 4-1

Figura 2.3.4 diagrama esquemático que representa el proceso de compresión adiabática reversible del ciclo de Carnot

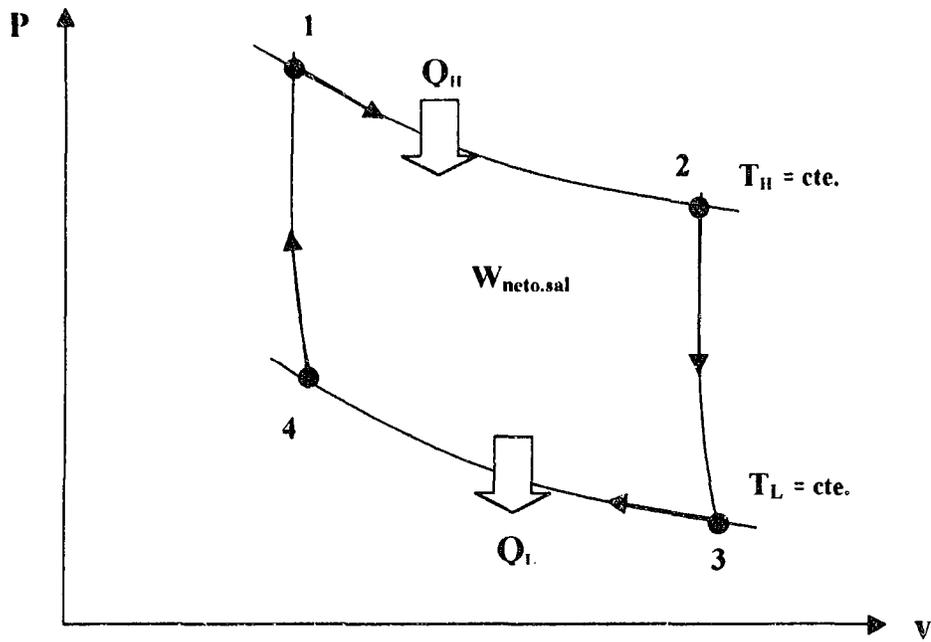


Figura 2.3.5 diagrama P-v del ciclo de Carnot

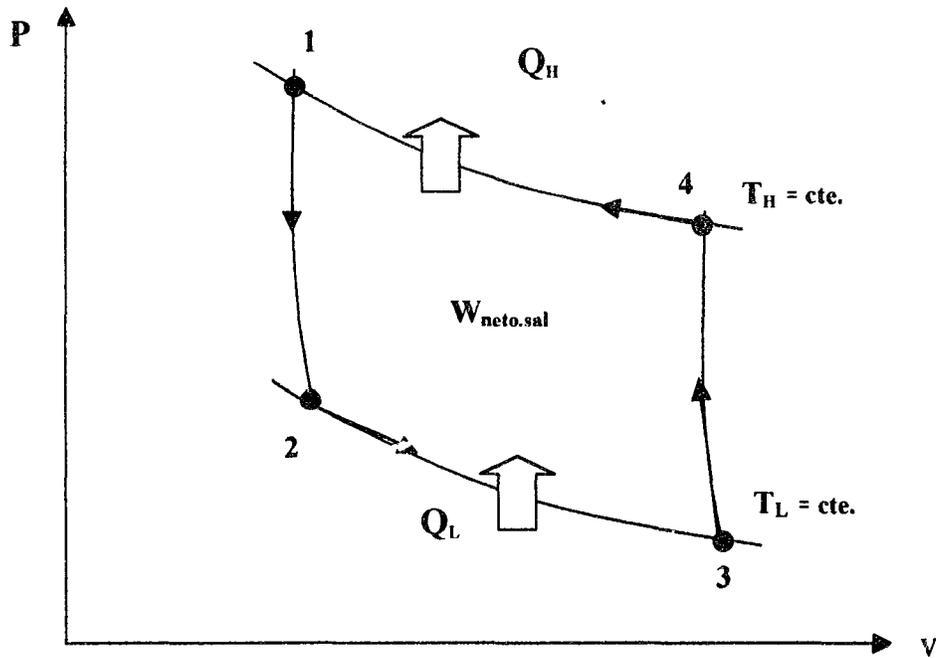


Figura 2.3.6 diagrama P-v del ciclo de Carnot inverso

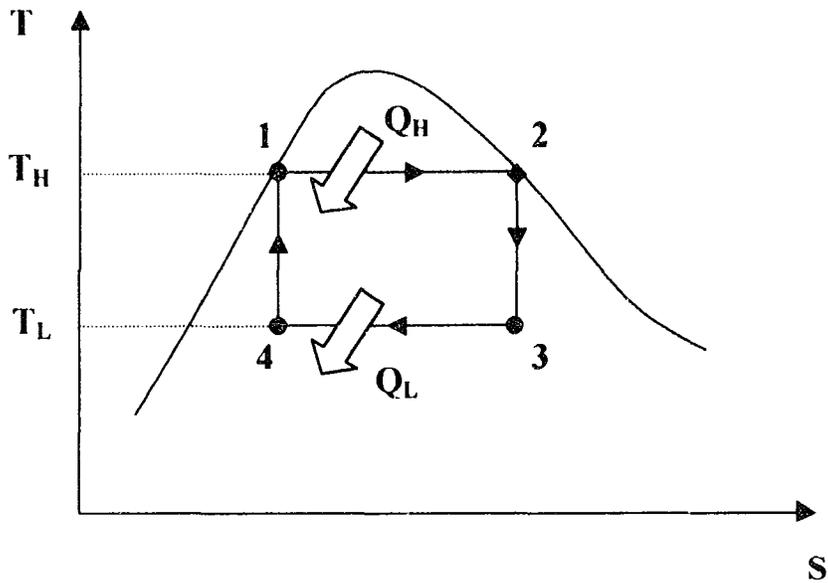


Figura 2.3.7 - Diagrama T-S del ciclo de Carnot

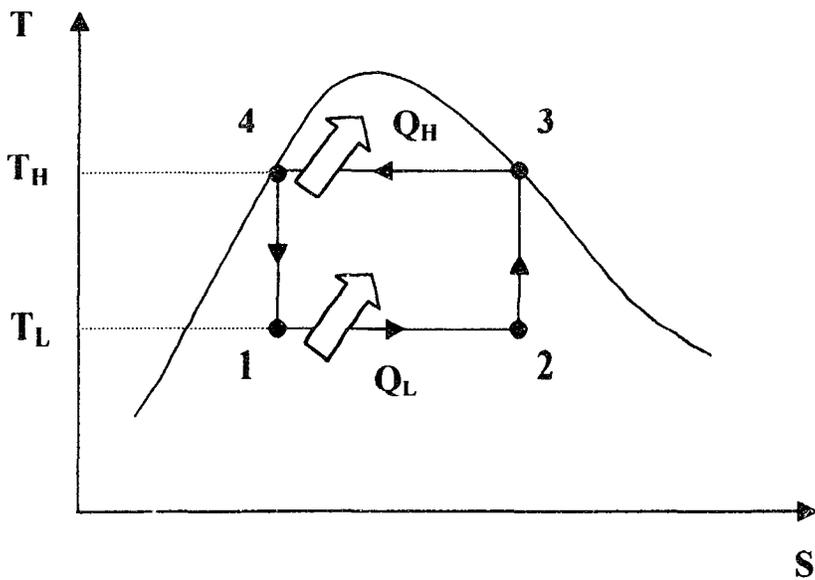


Figura 2.3.8 - Diagrama T-S del ciclo de Carnot inverso

## **2.4 BOMBAS DE CALOR**

Una bomba de calor es un dispositivo que transfiere calor de un medio de baja temperatura a uno de alta temperatura. Las bombas de calor para enfriamiento y las de calentamiento operan en el mismo ciclo, aunque difieren en objetivos. El objetivo de un refrigerador es el de mantener el espacio refrigerado a baja temperatura quitándole calor. La descarga de este calor a un medio de alta temperatura es sólo una parte de la operación, no el propósito. El objetivo de una bomba de calor para calentamiento es mantener un espacio calentado a alta temperatura. Lo cual consigue al absorber el calor de una fuente de baja temperatura como el agua de un pozo, y suministrándolo a un medio de alta temperatura como una casa.

A las bombas de calor empleadas para enfriamiento se les conoce comúnmente como refrigeradores, mientras que a las utilizadas para calentamiento se les conoce como bombas de calor, por lo que en adelante se emplea el término bomba de calor específicamente para sistemas de calentamiento.

Las bombas de calor han tenido una gran aceptación en la actualidad, debido a que ayudan a reducir los costos de energía de los procesos productivos, mediante la optimización de los mismos al aprovechar la carga térmica que llevan las corrientes de proceso, lo cual puede generar ganancias económicas que favorablemente van de la mano con la disminución de contaminantes que arrojan las industrias al medio ambiente debido al consumo excesivo de combustibles fósiles.

El objetivo primordial de las bombas de calor para calentamiento, es el de revalorizar la energía de desecho, para su posterior uso, esto se logra aumentando la temperatura de la energía que se va a transformar, y puede lograrse por diversos caminos, dependiendo del tipo de bomba empleada.

El transformador de calor es uno de los tipos de las bombas de calor, que nos sirve precisamente para aprovechar la energía de baja calidad incrementando la temperatura de suministro para ser aprovechada en algún proceso.

## **2.5 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE CALOR**

Hay varias formas de clasificar a las bombas de calor, una de las más usuales es debido a su funcionamiento, de las más importantes gracias a su desarrollo y a su potencial de aplicación son las siguientes:

1. Bomba de calor por compresión mecánica de vapor.
2. Bomba de calor por absorción.
3. Bomba de calor por compresión absorción.

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

Es la bomba de calor de mayor uso, la energía que utiliza para la compresión del vapor es generalmente de tipo eléctrica, y puede ser empleada tanto para calentamiento como para enfriamiento, su funcionamiento es bastante conocido lo que hace de su empleo, el más común.

La figura 2.5.1.1 muestra los componentes básicos de una bomba de calor por compresión mecánica de vapor, siendo los que a continuación se mencionan:

- Compresor,
- Condensador,
- Válvula de expansión,
- Evaporador y,
- Fluido de trabajo.

En la bomba de calor por compresión mecánica de vapor, el fluido de trabajo en forma de vapor saturado llega al compresor, sufriendo un incremento de presión y temperatura, después pasa al condensador donde se licúa a presión constante retirándosele una cantidad de calor  $Q_{CO}$ , a continuación pasa a través de una válvula de expansión, disminuyendo su presión y su temperatura, y coexistiendo como una mezcla de líquido y vapor, llega finalmente al evaporador donde gana una cantidad de calor  $Q_{EV}$  regresando al estado de vapor saturado e iniciándose nuevamente el ciclo.

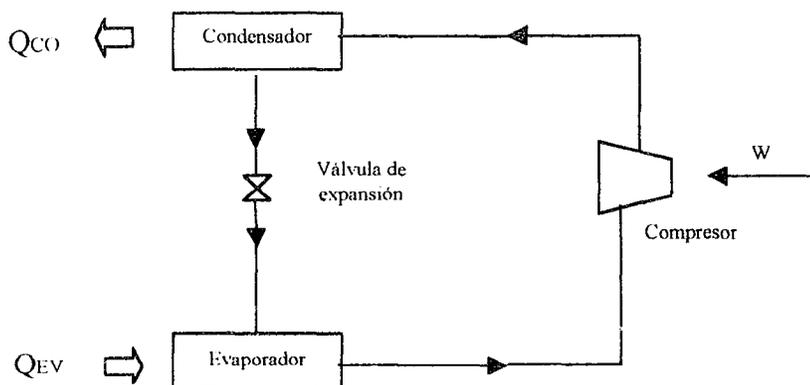


Figura 2.5.1.1 diagrama esquemático de una Bomba de Calor por compresión mecánica de vapor

En la gráfica 2.5.1.2 se presenta el ciclo termodinámico de la bomba de calor por compresión mecánica de vapor en un diagrama de Presión-entalpía. En la línea 1-2 el fluido de trabajo se evapora a la temperatura  $T_{EV}$  extrayendo una cantidad de calor  $Q_{EV}$  del medio que puede estar en estado sólido, líquido o gaseoso. En la línea 2-3 el fluido de trabajo se comprime y cede calor latente  $Q_{CO}$  en la condensación, que se da en la línea 3-4. En la línea 4-1 el fluido de trabajo en estado líquido se expande para posteriormente evaporarse, completándose de esta manera el ciclo.

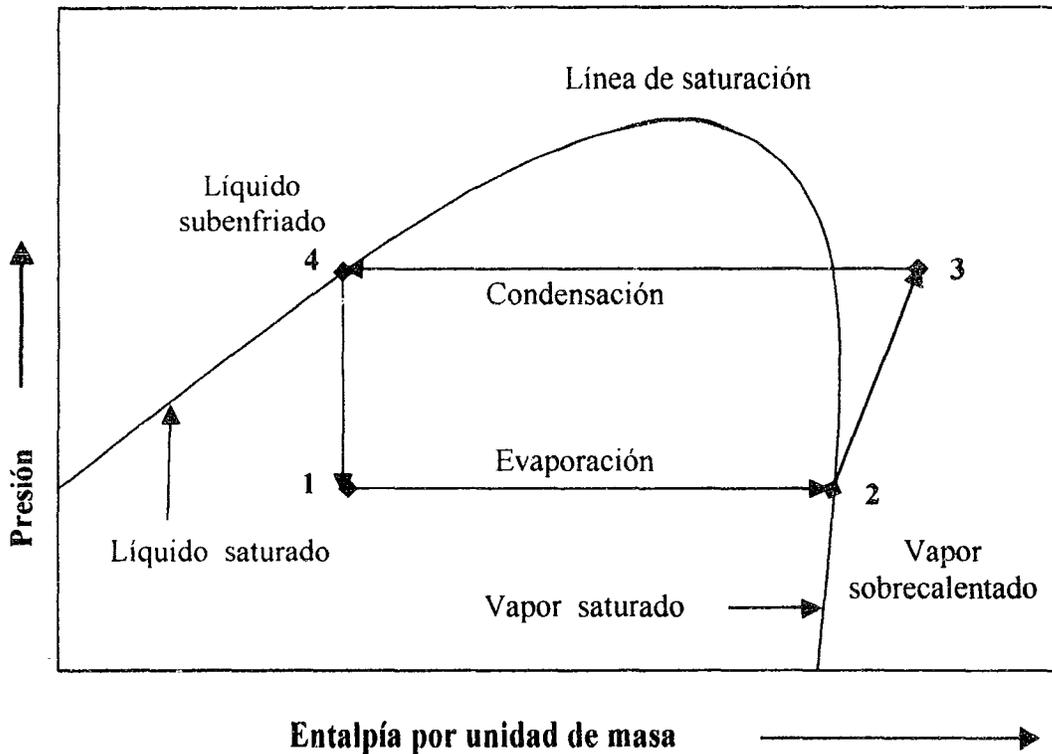


Figura 2.5.1.2 diagrama esquemático del ciclo de una Bomba de Calor por compresión

## 2.5.2 Bomba de calor por absorción

Aunque las bombas de calor han sido empleadas desde hace ya más de un siglo, el desarrollo de las bombas de calor por absorción no ha sido tan rápido, como lo ha sido el de las bombas de calor por compresión, que tienen un rendimiento mayor. Sin embargo, actualmente se está tomando interés en este tipo de bombas para ser aplicadas en los lugares más remotos, donde se carece de energía eléctrica, gracias a que pueden funcionar con energía solar o energía geotérmica, otra de las características que han hecho tomar interés sobre este tipo de bombas es que pueden ser utilizadas como transformadores térmicos, y no sólo para enfriamiento y calentamiento. Al ser empleadas como transformadores térmicos ayudan al ahorro de energía dentro de las plantas de proceso, revalorizando la energía que comúnmente es desechada.

Los elementos principales de una bomba de calor por absorción se presentan en la figura 2.5.2, y son los siguientes:

- Un generador,
- Un condensador,
- Un evaporador,
- Un absorbedor,
- Una bomba,
- Una válvula de expansión y,
- Una mezcla fluido de trabajo-absorbente.

El ciclo de funcionamiento de la bomba de calor por absorción, se inicia cuando se suministra calor  $Q_{GE}$  a la mezcla fluido de trabajo-absorbente, en el generador, donde se separa el fluido de trabajo en forma de vapor que después fluye hacia el condensador para ser licuado al retirarle una cantidad de calor  $Q_{CO}$ , una vez en estado líquido el fluido de trabajo pasa a través de una válvula de expansión y después al evaporador, donde absorbe una cantidad de calor  $Q_{EV}$  para convertirse en vapor. Finalmente, los vapores del fluido de trabajo son absorbidos por la solución proveniente del generador, en el absorbedor, durante esta absorción se disipa una cantidad de calor  $Q_{AB}$ , a una temperatura mayor que la del generador. La mezcla formada en el absorbedor, regresa al generador, para iniciar el ciclo.

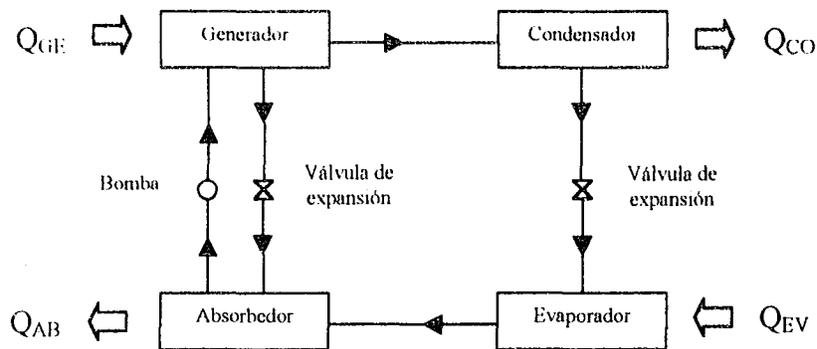


Figura 2.5.2 diagrama esquemático de una Bomba de Calor por absorción.

Existen dos características principales para las bombas de calor por absorción, que las hacen distintas a las demás siendo estas las siguientes:

- 1) Trabajan con un par de sustancias, llamadas fluido de trabajo y absorbente, las cuales deben de tener una afinidad química, dónde el absorbente tiene la función de llevar al fluido de trabajo de la zona de absorción a la zona de generación.
- 2) Trabajan principalmente con energía calorífica, por lo que se consideran sistemas que operan térmicamente.

### 2.5.3 Bombas de Calor por Compresión-Absorción

Este tipo de bomba es una combinación de una bomba por Compresión y una por Absorción, combinando las mejores características de las dos en un ciclo de trabajo.

En la figura 2.5.3, se muestran los componentes básicos para este tipo de bomba, que son los siguientes:

- Un generador,
- Un absorbedor,
- Un compresor,
- Una bomba y,
- Una válvula de expansión.

Para el ciclo de funcionamiento de éste tipo de bombas, primero se suministra una cantidad de calor  $Q_{G1}$  al generador, para separar el fluido de trabajo en forma de vapor, del absorbente. El fluido de trabajo se comprime para aumentar su presión al entrar al absorbedor. La solución diluida en el componente más volátil, es bombeada del generador al absorbedor, para absorber el fluido de trabajo proveniente del compresor, disipando una cantidad de calor  $Q_{AB}$  superior a la del generador, finalmente la solución concentrada en el componente más volátil, pasa por la válvula de expansión llegando al generador, para que se inicie otra vez el ciclo.

Se ha encontrado teóricamente que en éste tipo de ciclos se pueden obtener coeficientes de operación mayores que en las bombas de calor por absorción, así mismo se puede trabajar en un rango de temperaturas más amplio que en las bombas de calor por compresión.

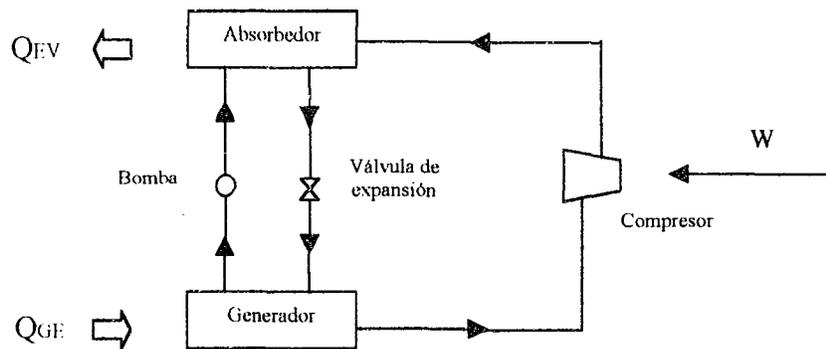


Figura 2.5.3 diagrama esquemático de una Bomba de Calor por Compresión-Absorción.

## 2.6 TRANSFORMADORES DE CALOR POR ABSORCIÓN

Se puede definir a un transformador térmico o transformador de calor como un sistema capaz de utilizar energía de baja calidad de una fuente de energía, e incrementar la calidad de la misma.

También se debe mencionar que un transformador térmico, a diferencia de la bomba de calor para calentamiento, no requiere de energía de alta calidad aún en su operación.

Cabe señalar que el transformador térmico por absorción aprovecha la energía que comúnmente se desecha al medio ambiente por su bajo potencial de trabajo, aumentando su calidad para ser empleada en trabajos subsecuentes, lo que permite un ahorro de energía primaria en los procesos de producción. Este tipo de sistemas es considerado un sistema térmico, por que emplea energía térmica, tiene la ventaja de que puede ser instalado en los lugares remotos, dónde no haya energía eléctrica, puesto que puede funcionar con energía solar, o geotérmica. Esta característica aunada

al potencial de ahorro energético que son capaces de producir, ha ocasionado que actualmente tengan un amplio desarrollo.

A continuación se describen los transformadores de calor por absorción más empleados.

### **2.6.1 Transformador de calor por absorción de una etapa (SSHT)**

Los transformadores de calor por absorción de una etapa, también denominados SSHT, por sus siglas en inglés de Single Stage Heat Transformer, son llamados de una etapa por realizar el proceso de absorción en un solo componente. Sus elementos principales se presentan en la figura. 2.6.1, y son los siguientes:

- Un generador,
- Un condensador,
- Un intercambiador de calor,
- Un evaporador y,
- Un absorbedor.

El ciclo de operación de un transformador térmico se inicia proporcionándole una cantidad de calor  $Q_{GE}$ , a la mezcla fluido de trabajo-absorbente contenida en el generador, de esta forma es posible separar una cantidad de fluido de trabajo en forma de vapor que fluye luego hacia el condensador donde se le retira una cantidad de calor  $Q_{CO}$ , para regresar al fluido de trabajo al estado líquido. A continuación se bombea hacia el evaporador donde al ganar una cantidad de calor  $Q_{EV}$  se convierte nuevamente en vapor para ser absorbido finalmente en el absorbedor, por la solución proveniente del generador, en esta última etapa se disipa una cantidad de calor  $Q_{AB}$ , que se encuentra a una temperatura más elevada que la temperatura de generación. También es importante señalar que la solución bombeada del generador al absorbedor, es precalentada por la solución que sale del absorbedor, a través de un intercambiador de calor.

La energía que se requiere para bombear los líquidos dentro de este tipo de sistemas es pequeña en comparación con la requerida para la generación de fluido de trabajo.

Los transformadores de calor trabajan con dos sustancias afines químicamente, que se denominan fluido de trabajo y absorbente. El absorbente circula en el generador y el absorbedor, así como en el intercambiador de calor, mientras que el fluido de trabajo circula en todo el equipo, en forma de líquido o en forma de vapor.

Las condiciones de operación del transformador de calor por absorción las fijan los componentes empleados para la absorción, ya que es en ésta en la que se fundamenta de operación del equipo, por lo cual es necesario seleccionar la mezcla más idónea

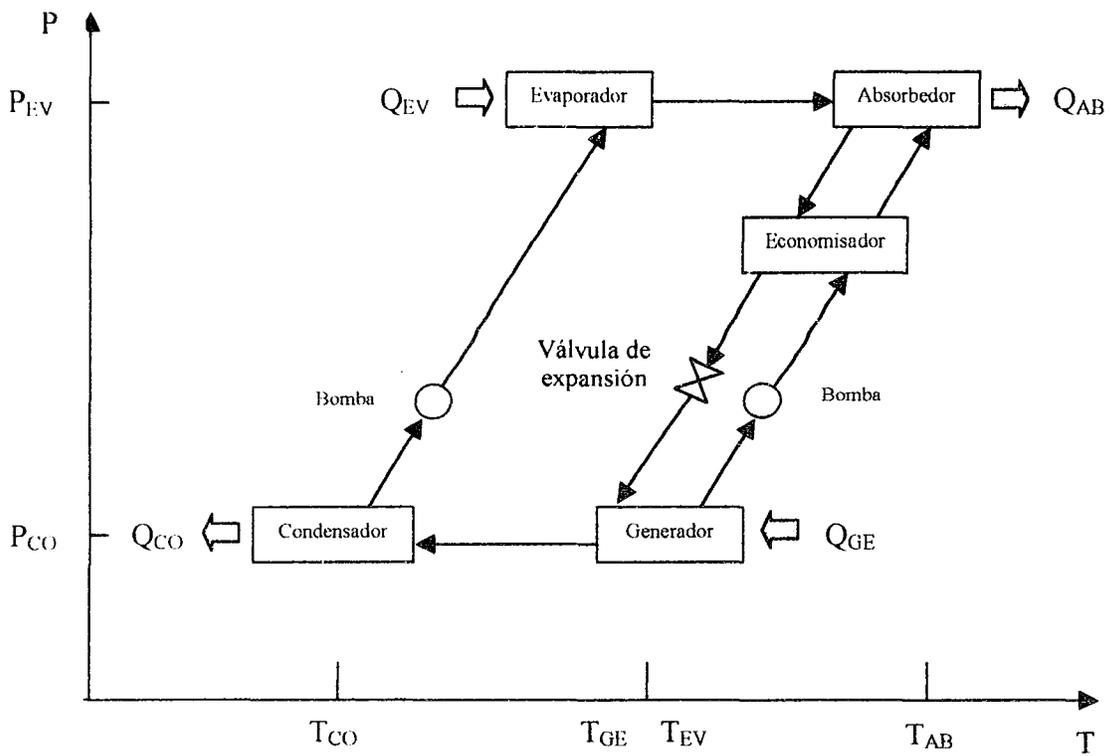


Figura 2.6.1. diagrama esquemático de un Transformador Térmico por absorción de una etapa con tres niveles de temperatura y dos niveles de presión.

En la figura 2.6.1 puede verse que el transformador de calor opera con dos niveles de presión y tres niveles de temperatura, cuando el calor que se le suministra al generador y al evaporador proviene de la energía de desecho. También se puede observar que la temperatura más alta es la del absorbedor, mientras que la más baja es la del condensador, y la temperatura intermedia la del generador y el evaporador. También se puede observar claramente que la presión más elevada está en la zona de absorción y la presión más baja en la zona de condensación.

### **2.6.2 Transformador de calor de doble etapa (TSHT)**

Un transformador de calor de doble etapa es el resultado de la unión de dos transformadores de calor de una etapa, conectados en serie, se utilizan para producir una carga térmica útil, a mayor temperatura.

La figura 2.6.2 nos muestra de manera esquemática los componentes principales de un transformador térmico por absorción de doble etapa, que son el doble de los requeridos en una etapa, aumentando únicamente las líneas de unión.

El ciclo de funcionamiento es un ciclo compuesto, es decir se aprovecha el calor de salida del absorbedor de la primera etapa, para calentar la mezcla del generador de la segunda etapa, lo que da como resultado que el calor de la mezcla obtenida en el segundo absorbedor, tenga una mayor temperatura que en el primero.

Sin embargo, las formas en las que se puede aprovechar el calor generado por el transformador térmico en la primera etapa, pueden variar de la siguiente manera, suministrándose directamente al generador y al evaporador, al evaporador solamente, o solamente al generador, esto puede incidir en el incremento o ahorro en el costo de fabricación, así como a la variación en la eficiencia del equipo, lo que debe ser considerado al momento del diseño.

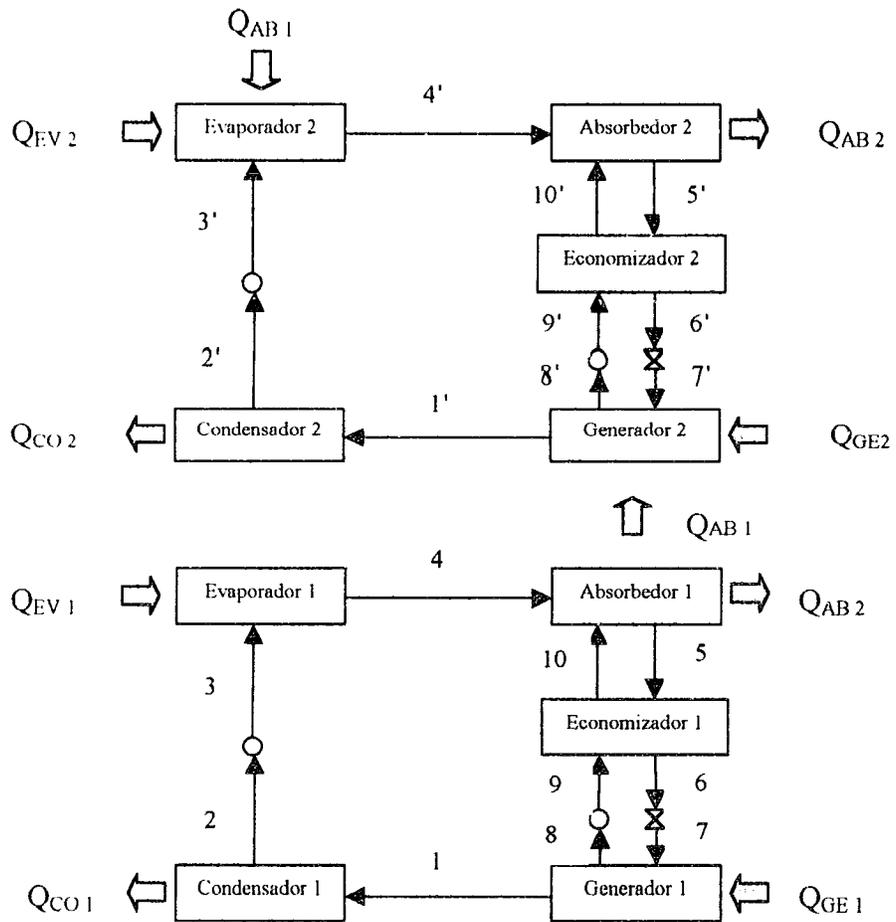


Figura 2.6.2 diagrama esquemático de un transformador de calor por absorción de doble etapa.

### 2.6.3 Transformador de calor de doble absorción (DAHT)

Un transformador de calor de doble absorción está constituido por los componentes que se muestran en la fig. 2.6.3, y que son los siguientes:

- Un absorbedor,
- Un condensador,
- Un evaporador,
- Un absorbedor-evaporador,
- Un intercambiador de calor y,
- Un generador.

El ciclo de funcionamiento de un transformador térmico de doble absorción se inicia con el calentamiento de la mezcla fluido de trabajo-absorbente, en el generador, ganado una cantidad de calor  $Q_{GE}$ , para separar el fluido de trabajo en forma de vapor y pasarlo después al condensador, donde se libera una cantidad de calor  $Q_{CO}$ . El fluido de trabajo se divide en dos líneas una de las cuales se bombea hacia el absorbedor-evaporador donde disipa una cantidad de calor  $Q_{AE}$ , al evaporarse, mientras que la otra parte pasa al evaporador donde se le adiciona una cantidad de calor  $Q_{EV}$  para evaporarlo. El fluido de trabajo en forma de vapor, proveniente del absorbedor-evaporador pasa al absorbedor, donde es absorbido por la solución proveniente del generador, liberando una cantidad de calor  $Q_{AB}$ . La solución del absorbedor se divide en dos flujos uno de los cuales se va al generador, mientras que el otro pasa al absorbedor-evaporador, y absorbe al vapor de agua proveniente del evaporador disipando una cantidad de calor  $Q_{AB}$ , finalmente esta solución ya diluida llega al generador para iniciar el ciclo nuevamente.

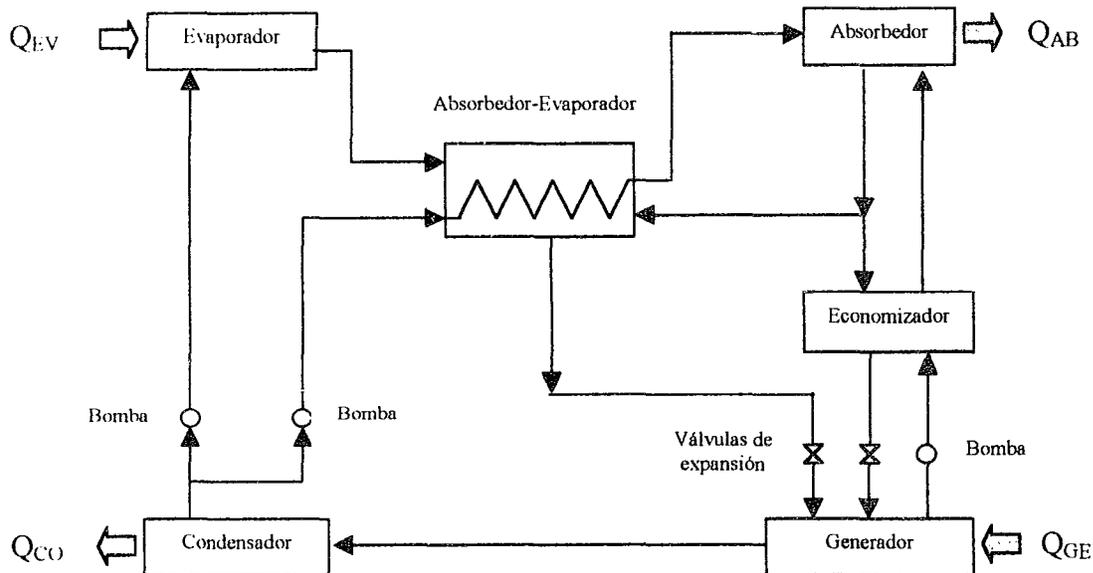


Figura 2.6.3 diagrama esquemático de un transformador de calor de doble absorción

## 2.7 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE TRABAJO Y DE LOS ABSORBENTES

Se pueden emplear diferentes mezclas para el trabajo con los transformadores térmicos, en esencia debe de ser un par compatible químicamente, sin embargo, dadas las necesidades que se tienen tanto para su manejo como para los resultados requeridos se debe garantizar el resultado final aproximando el par de trabajo a ciertas características óptimas, a continuación se da una serie de propiedades que deben tener el fluido de trabajo y el absorbente que se emplearan en un transformador térmico.

### 2.7.1 Fluido de trabajo

**Calor latente de vaporización.** Debe ser tan alto como sea posible para disminuir la cantidad de flujo másico requerido por unidad de calor absorbido en el evaporador, lo que favorece las dimensiones de diseño del equipo, dando como consecuencia equipos más pequeños y más baratos.

**Presión de vapor.** Debe estar dentro de los valores fijados por la temperatura de condensación, para evitar problemas de cavitación en las bombas o fracturas en el equipo.

**Punto de congelación.** Debe estar por debajo de la temperatura ambiente y de cualquier temperatura de operación del sistema, para evitar que se ocasionen daños en el equipo, debido al congelamiento.

**Punto crítico.** Debe ser mayor que las temperaturas de operación del sistema, ya que a temperaturas mayores que la crítica no es posible lograr los cambios de fase requeridos.

### 2.7.2 Absorbente

El absorbente a utilizarse debe ser elegido tomando en cuenta las siguientes características:

**Punto de ebullición.** Debe ser mayor al del fluido de trabajo y relativamente grande comparado con la temperatura de generación, para evitar vaporización del mismo.

**Presión de vapor.** Debe ser mínima a la temperatura de generación para evitar que los vapores de absorbente contaminen el fluido de trabajo en el condensador.

**Solubilidad.** Debe ser lo suficientemente amplia en un intervalo de concentraciones, para evitar problemas de cristalización, el punto de cristalización debe estar abajo de la temperatura de operación del absorbedor y generador.

**Absorción.** La presión de vapor del absorbente debe ser menor a la del fluido de trabajo a la temperatura del absorbedor, para que el fluido de trabajo sea absorbido.

### **2.7.3 Otras propiedades para todos los fluidos**

Además de las propiedades que se señalaron anteriormente es necesario considerar otras que son propias de todos los fluidos, para ser empleados en el transformador térmico por absorción:

- Deberán ser químicamente estables a las condiciones de trabajo.
- No deberán ser flamables.
- No deberán de ser explosivos.
- No deberán ser corrosivos.
- No deberán ser tóxicos.
- La viscosidad debe ser lo suficientemente baja para favorecer la transferencia de masa y de calor, sin que llegue a inhibir la formación de gotas durante la condensación.
- La conductividad térmica debe ser alta para favorecer la transferencia de calor en los distintos componentes.
- Los fluidos deben de estar disponibles.
- El costo de los fluidos debe ser bajo.

Es difícil que una mezcla cumpla con todas las características anteriormente señaladas, por lo que se han experimentado diversas mezclas de trabajo, algunas presentan ciertas ventajas con respecto a otras, pero se puede decir sin temor a equivocarse que la mezcla de fluido de trabajo-absorbente más adecuada, sigue en proceso de investigación. A continuación se describen algunas mezclas empleadas en los transformadores de calor por absorción.

## **2.8 PRINCIPALES MEZCLAS FLUIDO DE TRABAJO-ABSORBENTE UTILIZADAS EN LOS TRANSFORMADORES TÉRMICOS POR ABSORCIÓN**

En la operación de los transformadores de calor por absorción han sido empleadas diversas mezclas de trabajo, se ha buscado en esencia que el absorbente que se está empleando no sea demasiado corrosivo, como el nitrato de litio, el cloruro de calcio, el cloruro de litio y varios compuestos orgánicos, sin embargo existen algunas mezclas que por ser muy comerciales se usan comúnmente, debido a que cumplen con varios de los requisitos para ser empleadas en los transformadores térmicos por absorción.

En la actualidad existen dos mezclas comerciales que son las más utilizadas, el Amoniaco-Agua y el Bromuro de Litio-Agua, siendo esta última la mezcla con la que se realizaron las corridas experimentales del presente trabajo. A continuación se describen las mezclas mencionadas así como algunas de sus ventajas y desventajas.

### **2.8.1 Amoniaco-Agua**

En la mezcla Amoniaco-Agua, el fluido de trabajo es el amoniaco, y el absorbente es el agua, y presenta las siguientes ventajas y desventajas en su uso:

Ventajas:

- Tiene un elevado calor de vaporización.
- Tiene un bajo costo.
- Tiene una alta disponibilidad.
- Es químicamente estable a temperaturas menores a 180 °C.

Desventajas:

- Se requiere de un rectificador, ya que la presión de vapor del agua, es relativamente más alta que la del amoniaco.
- El costo del equipo es grande, por las presiones de operación.
- El amoniaco es altamente corrosivo al cobre, además de ser tóxico.
- La temperatura máxima a la que se puede trabajar con el amoniaco es de 180 °C, ya que después de esta se degrada.

### **2.8.2 Bromuro de Litio-Agua**

En la mezcla Bromuro de Litio-Agua el fluido de trabajo es el agua, y el absorbente es el bromuro de litio, a continuación se listan sus ventajas y desventajas:

Ventajas:

- Se obtienen coeficientes de operación más altos que con la mezcla Amoniaco-Agua, debido al calor latente de vaporización del agua, que es más alto.
- El punto crítico del agua es relativamente alto, por lo que se puede trabajar a temperaturas mayores que con la mezcla de Amoniaco-Agua.
- No se requiere de un rectificador, ya que el bromuro de litio tiene un punto de ebullición y una presión de vapor despreciable en comparación con el agua.
- Es químicamente estable a las temperaturas de operación.

Desventajas:

- El fluido de trabajo no puede ser utilizado a temperaturas menores a 0 °C, debido a que puede cristalizar y dañar el equipo.
- Es altamente corrosivo al acero, a temperaturas elevadas por lo que requiere generalmente el uso de inhibidores.
- Las presiones de operación son muy bajas, lo que puede ocasionar la entrada de aire al equipo.
- Se puede cristalizar a elevadas concentraciones.

Para el presente trabajo se empleo la mezcla de Bromuro de Litio-Agua, ya que es la que más cumple con los requisitos anteriormente señalados para el empleo de una mezcla en un transformador de calor por absorción.

Cabe señalar que dentro del CIE-UNAM, se ha propuesto como fluido de trabajo una mezcla denominada Carrol-Agua, con esta mezcla se pretenden solucionar las desventajas que presenta el Bromuro de Litio-Agua, ya que esta mezcla tiene mayor solubilidad, disminuyendo con esto la posibilidad de cristalización y logrando temperaturas más elevadas, también se busca una disminución en el grado de corrosividad, y en el costo, comparados desde luego con la mezcla Bromuro de Litio-Agua. La mezcla Carrol-Agua está formada por los compuestos químicos bromuro de litio y un compuesto orgánico (etilen glicol) como aditivo, en una relación de 4.5/1 en peso, esta mezcla ha sido empleada por primera vez en un transformador de calor por absorción, y está en etapa de investigación.

Las figuras 2.7.1 y 2.7.2 muestran algunas de las propiedades de la mezcla de trabajo Bromuro de Litio-Agua.

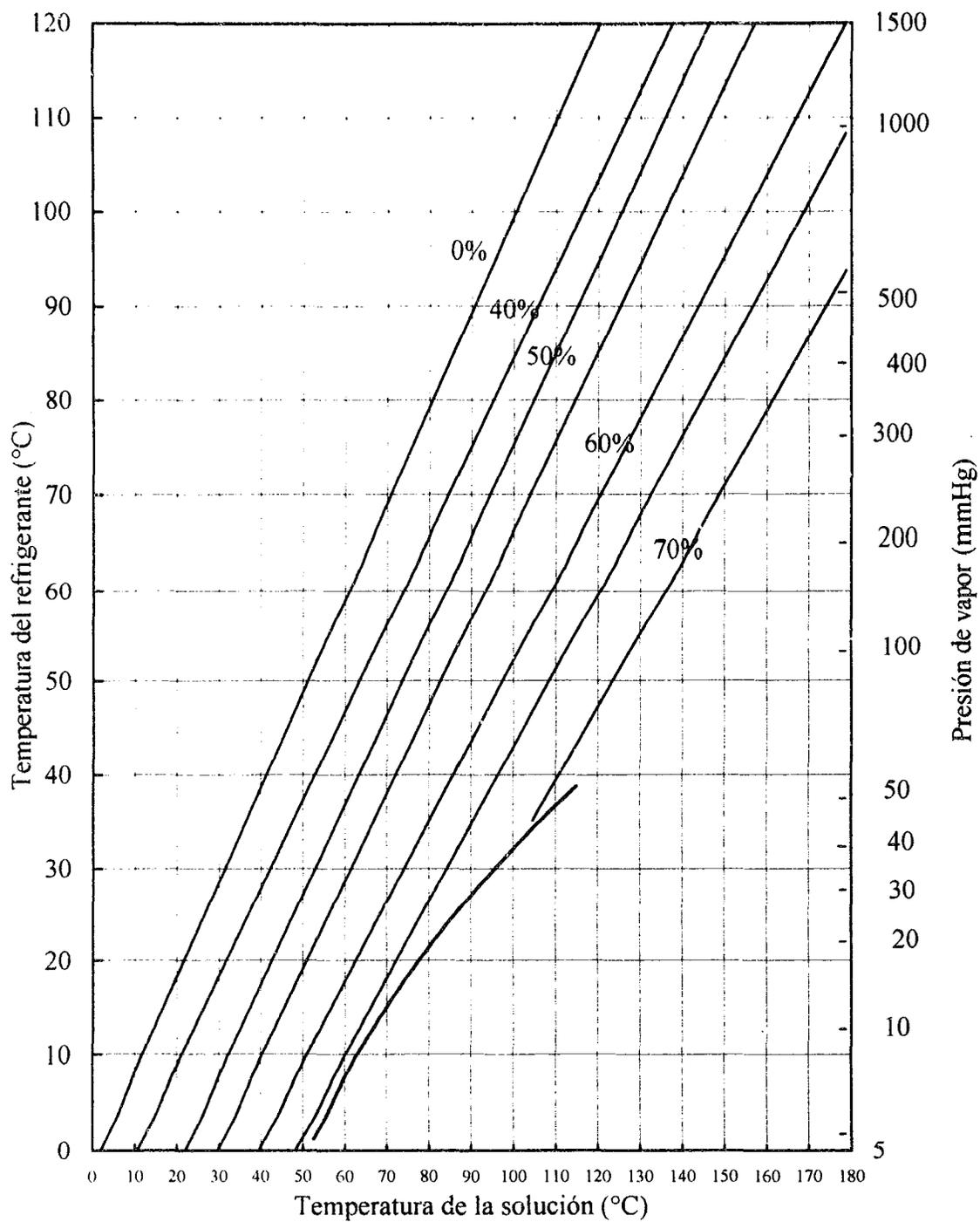


Fig. 2.7.1 diagrama de presión, temperatura y concentración para la mezcla Bromuro de Litio-Agua, tomada de McNeely

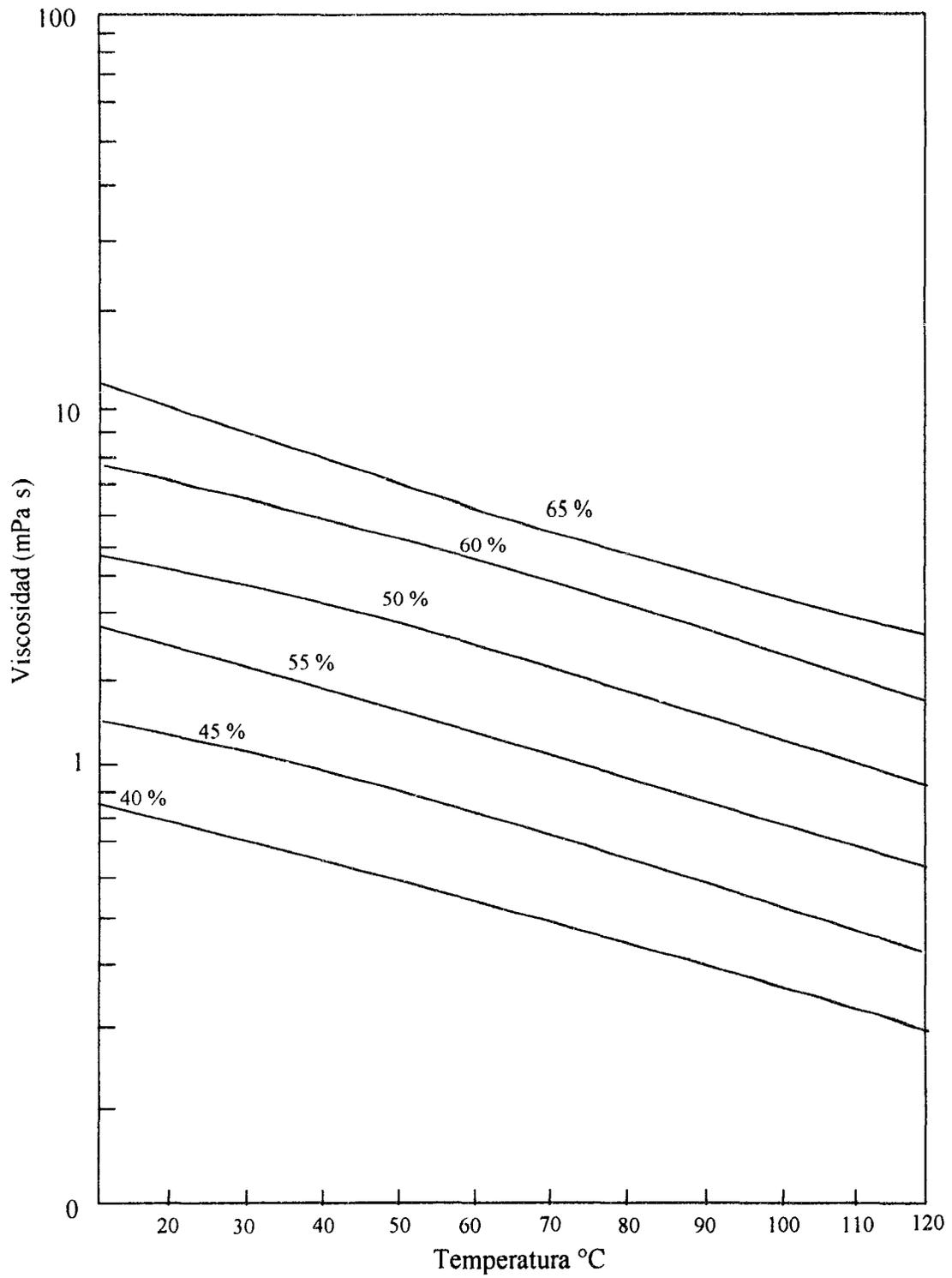


Figura 2.7.2 diagrama de viscosidad, temperatura y concentración para la mezcla Bromuro de Litio-Agua. Tomado de ASHRAE.

## 2.9 APLICACIONES INDUSTRIALES DE LOS TRANSFORMADORES DE CALOR

Los transformadores de calor por absorción tienen una amplia posibilidad de aplicación en los procesos de elaboración y transformación de productos diversos, el objetivo de su empleo es básicamente el de optimizar los procesos industriales mediante el aprovechamiento eficiente de la carga térmica que llevan las corrientes de proceso. La literatura reporta por ejemplo, el empleo de transformadores de calor en industrias como destiladoras de alcohol e industrias de fabricación de caucho sintético en Japón, e Industrias de acero en Holanda [Mashimo, 1981 ; Krom y Oestendorp, 1993].

Es importante señalar que debido a lo reciente del desarrollo de los transformadores de calor, las investigaciones sobre las mezclas de trabajo así como el de las condiciones de operación apropiadas para el óptimo empleo de estas unidades, tiene en estos momentos ocupados a una gran cantidad de investigadores en el mundo.

La figura 2.9.1 muestra la forma en que se puede acoplar un transformador de calor por absorción de una etapa a una columna de destilación de petróleo de la planta isomeradora de pentanos y hexanos instalada en Tula, Hidalgo, propuesta por Cerezo en 2001, donde concluye después de una simulación basada en las condiciones de trabajo del condensador y de la caldera de la columna de destilación de petróleo, que manteniendo la temperatura de generación y evaporación constantes a 74.1 °C es posible ahorrar hasta un 46 % de la energía suministrada a la caldera.

En la figura 2.9.1 se puede observar que se extrae calor del condensador de la columna para suministrar energía al generador y evaporador del transformador de calor, y que el calor que se obtiene en el absorbedor y que se encuentra a mayor temperatura que la corriente de suministro sirve para precalentar la corriente del reflujo de los fondos antes de entrar a la caldera de la columna, disminuyendo de esta manera la cantidad de energía suministrada a la caldera.



## **2.10 CONSIDERACIONES TERMODINÁMICAS Y PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES DE CALOR POR ABSORCIÓN**

### **2.10.1 Consideraciones termodinámicas**

Rivera en 1991, presentó un modelo matemático para un transformador térmico por absorción de una etapa operando con la mezcla de trabajo Bromuro de Litio-Agua, donde se hacen las siguientes consideraciones termodinámicas:

1. Existen condiciones de equilibrio termodinámico en todo el sistema.
2. El transformador de calor opera en estado estacionario.
3. El absorbente no se evapora en el rango de temperaturas de operación de modo que no se necesita el uso de rectificador.
4. La solución está en estado de saturación a la salida del generador y el absorbedor, mientras que el fluido de trabajo se encuentra en saturación a la salida del condensador y el evaporador.
5. Se desprecian pérdidas y ganancias de calor a través de los diferentes componentes del sistema y de la tubería.
6. Se desprecian las pérdidas de presión a lo largo de todo el sistema.
7. El trabajo efectuado por las bombas es isentrópico.
8. El proceso a través de las válvulas es isentálpico.

Bajo estas consideraciones y mediante la solución del algoritmo desarrollado por Rivera es posible el cálculo de las propiedades del sistema y el análisis teórico del mismo.

### **2.10.2 Parámetros de evaluación**

Para la evaluación de este tipo de transformadores de calor, hay tres parámetros que son fundamentales tanto en el análisis como en el diseño de los mismos, estos parámetros son la relación de flujo (FR), el coeficiente de operación (COP), y el incremento de temperatura ( $\Delta T$ ).

#### **2.10.2.1 Relación de flujo (RF)**

La relación de flujo resulta ser un parámetro muy importante ya que nos ayuda a determinar el tamaño y así mismo los costos de los equipos, tales como el del generador, el absorbedor, el evaporador o el de las bombas para la solución. La relación de flujo, se define como la razón de flujo másico que va del absorbedor al generador, entre el flujo másico del fluido de trabajo.

$$FR = \frac{M_{AB}}{M_{WF}} \quad (2.1)$$

Donde FR es la relación de flujo,  $M_{AB}$  es el flujo másico del absorbedor al generador y  $M_{WF}$  es el flujo másico del fluido de trabajo.

La relación de flujo también puede expresarse en función de las concentraciones, de la siguiente manera:

$$FR = \frac{X_{EV} - X_{GF}}{X_{AB} - X_{GE}} \quad (2.2)$$

Donde  $X_{EV}$  es la concentración de la solución en el evaporador,  $X_{GF}$  es la concentración de la solución en el generador,  $X_{AB}$  es la concentración de la solución en el absorbedor y  $X_{GE}$  es la concentración de la solución en el generador.

### 2.10.2 Coeficiente de Operación (COP)

La medida del rendimiento de una bomba de calor se expresa, en términos del coeficiente de operación  $COP_{BC}$ , definido como:

$$COP = \frac{\text{Salida, deseada}}{\text{Entrada, requerida}} = \frac{Q_H}{W_{\text{neto, en.}}} \quad (2.3)$$

Para el transformador térmico que se emplea en el trabajo de la presente tesis, el COP del transformador se define de la siguiente manera:

$$COP_{HT} = \frac{Q_{AB}}{Q_{GF} + Q_{EV} + W_{\text{Bombas}}} \quad (2.4)$$

Donde  $COP_{HT}$  es el Coeficiente de Operación del transformador térmico,  $Q_{AB}$  es el calor obtenido en el absorbedor,  $Q_{GF}$  es el calor suministrado al generador,  $Q_{EV}$  es el calor suministrado al evaporador y  $W_{\text{Bombas}}$  es el trabajo efectuado por las bombas, el cual es despreciable, en comparación con la potencia suministrada en el generador, absorbedor y evaporador, por lo que se puede expresar solamente como:

$$COP_{HT} = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE} + Q_{EV}} \quad (2.5)$$

### 2.10.2.3 Incremento de temperatura ( $\Delta T$ )

El incremento de temperatura es una característica de los sistemas de absorción, que está relacionada con la temperatura a la que se suministra la energía y la temperatura de salida de la energía obtenida, de tal manera que es definida como la diferencia de la temperatura obtenida en el absorbedor menos la temperatura del evaporador. Este parámetro nos indica la calidad con la que podemos recuperar la energía empleada en el funcionamiento del transformador térmico y se expresa como:

$$\Delta T = T_{AB} - T_{EV} \quad (2.6)$$

Donde  $\Delta T$  es el incremento de temperatura,  $T_{AB}$  es la temperatura del absorbedor y  $T_{EV}$  es la temperatura del evaporador.

## **CAPITULO 3**

### **DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO**

#### **3.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se hace una descripción del funcionamiento del transformador térmico empleado en la experimentación de la presente tesis y después se da una descripción de cada uno de sus componentes, de la instrumentación, conexiones y aislantes, que utiliza, así como de los sistemas auxiliares, haciendo énfasis en el tipo de materiales empleados, ya que la mezcla Bromuro de Litio-Agua se caracteriza por ser corrosiva, sobre todo a temperaturas elevadas.

#### **3.2 DESCRIPCIÓN DEL TRANSFORMADOR DE CALOR EXPERIMENTAL**

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó en la experimentación el transformador térmico por absorción de una etapa de 2 kW de potencia instalado en el Laboratorio de Termodinámica Aplicada de la Coordinación de Refrigeración y Bombas de Calor del Centro de Investigación en Energía de la Universidad Nacional Autónoma de México, empleando la mezcla de trabajo Bromuro de Litio-Agua. En la figura 3.2.1, se muestra un diagrama del transformador de calor utilizado.

El ciclo de funcionamiento para el transformador de calor empleado es el siguiente: Como primer paso se llena el equipo con la mezcla de trabajo, conforme a la metodología descrita en el presente capítulo. Se hace vacío en el equipo hasta alcanzar una presión barométrica de 27 plg de Hg, posteriormente se calienta la solución contenida en el generador alimentando una cantidad de calor  $Q_{GE}$  necesaria para lograr la separación del fluido de trabajo de la mezcla. En forma de vapor el fluido de trabajo pasa al condensador donde se le retira una cantidad de calor  $Q_{CO}$  para condensarlo, una vez en estado líquido, es bombeado hacia el evaporador donde se le suministra una cantidad de calor  $Q_{EV}$  para evaporarlo. Los vapores del fluido de trabajo llegan al absorbedor donde la solución concentrada proveniente del generador los absorbe, durante la etapa de absorción se libera una cantidad de calor  $Q_{AB}$ , que tiene una temperatura mayor a la del generador y el evaporador. Finalmente la solución que sale del absorbedor y que está diluida en absorbente, se bombea hacia el intercambiador de calor para precalentar la solución proveniente del generador y después dividirse en dos líneas, una de ellas se manda de reflujo al absorbedor, mientras que la otra se va al generador, para dar inicio nuevamente al ciclo.

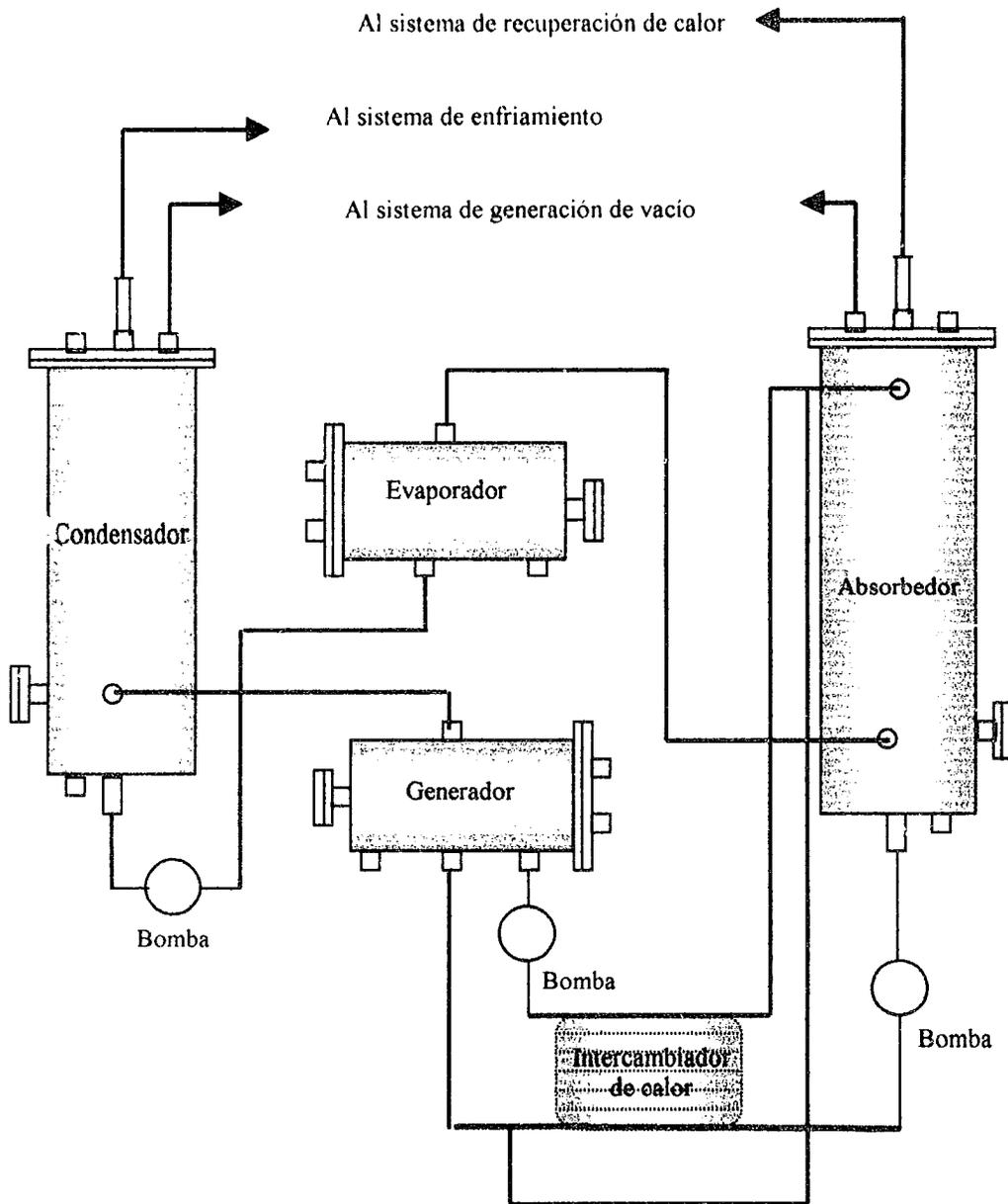


Figura 3.2.1 diagrama esquemático del Transformador Térmico por absorción empleado en el presente trabajo

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

La figura.3.2.2, es una fotografía del transformador de calor utilizado durante la experimentación, en donde pueden distinguirse los componentes del sistema y algunos de los instrumentos utilizados.

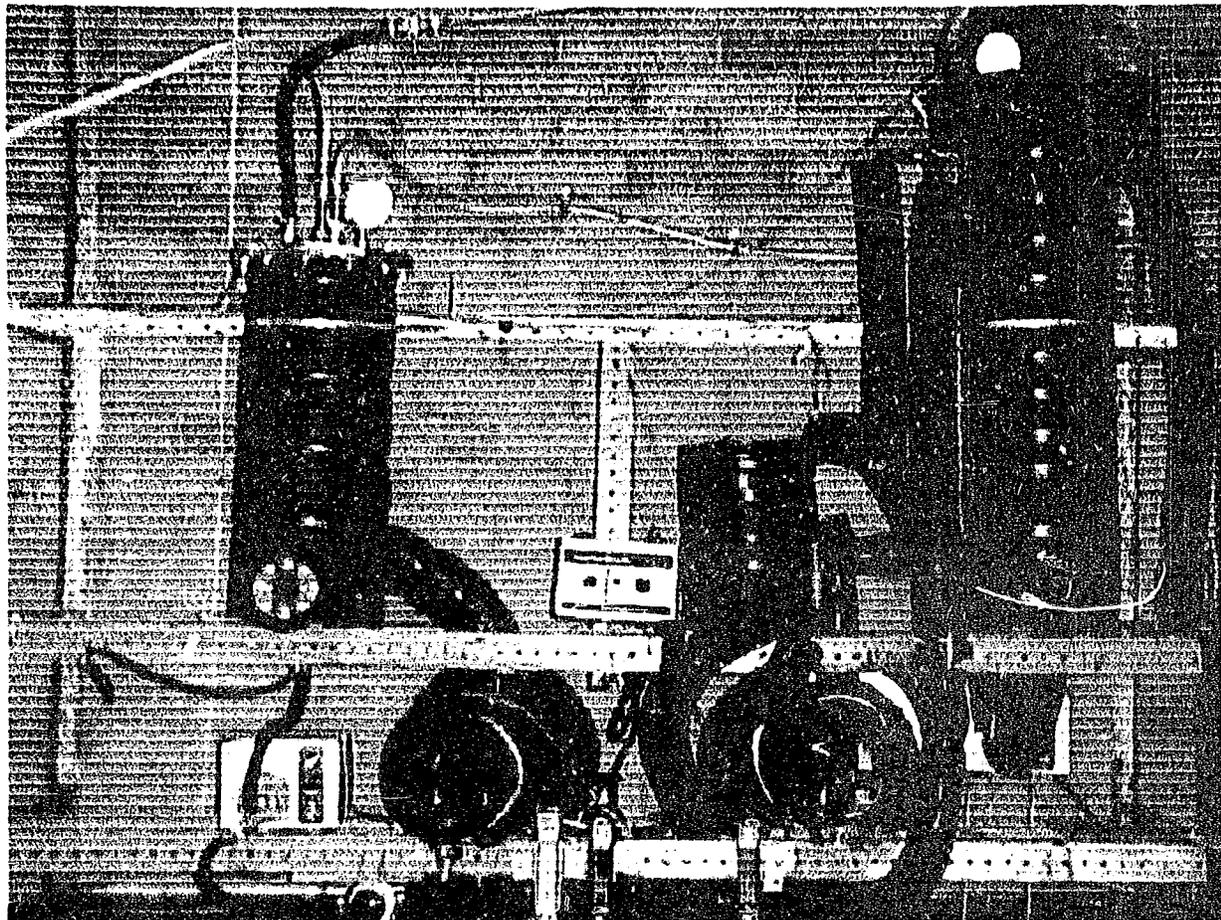


Figura 3.2.2 fotografía del Transformador de Calor por absorción de una etapa que se encuentra en el CIE-UNAM

### 3.3 DESCRIPCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL TRANSFORMADOR TÉRMICO

A continuación se presenta la descripción de los componentes que integran al transformador térmico por absorción de una etapa que se mencionó en el punto anterior, la descripción implica sobre todo las dimensiones y las características físicas de los equipos así como de los accesorios y sistemas auxiliares, cabe señalar que el equipo fue diseñado para operar en un principio con la mezcla de trabajo Bromuro de Litio-Agua, lo que hace que los materiales empleados para tal efecto deban de cumplir con las propiedades adecuadas para el manejo de esta solución, que como ya se ha mencionado es bastante corrosiva, sobre todo a temperaturas elevadas.

### 3.3.1. Generador

La función del generador es la de separar al fluido de trabajo de la mezcla original, mediante la adición de energía calorífica. Esta separación nos genera fluido de trabajo en forma de vapor, que después deberá ser conducida hasta el condensador (figura 3.3.1).

El generador es de tipo inundado, la solución dentro, se calienta por medio de resistencias eléctricas tipo cartucho. Este equipo es un recipiente horizontal con un diámetro externo de 16.7 cm y una longitud de 30 cm, con una brida en la parte posterior y una tapa en la parte frontal. El volumen del recipiente es de 0.0061 m<sup>3</sup>. Hay cuatro conectores para tubería en el cuerpo cilíndrico. Dos de ellos son para conducir la solución diluida y concentrada de absorbente respectivamente. El tercero sirve para el llenado y drenado de la solución componente y el último conector permite el paso del fluido de trabajo en forma de vapor, hacia el condensador. En la tapa delantera, hay una mirilla para observar el nivel de la solución. El cuerpo de la mirilla está fabricado en acero inoxidable y bridado al frente. En la tapa delantera hay dos termopozos a diferentes alturas a fin de poder realizar las medidas de temperatura y un conector sellado tipo cromatógrafo que permite la extracción de la solución para medir la concentración. En la brida ciega hay cuatro conectores para tubería. Dos de ellos son para las dos resistencias eléctricas de 1.0 kW, colocados a la altura de la mirilla frontal. Los otros dos conectores para tubería pueden usarse para conducir solución diluida por tubería y aspersar la solución sobre las resistencias en el caso de que el sistema operara sin que las resistencias estuvieran sumergidas.

Este componente puede operar con una potencia térmica máxima  $Q_{GE}$ , de 1.8 kW y tiene una capacidad máxima de almacenamiento de solución de 1 l kg. a las condiciones de diseño.

El calor de las resistencias puede ser controlado por reguladores de corriente alterna (variac) conectado a ellas.

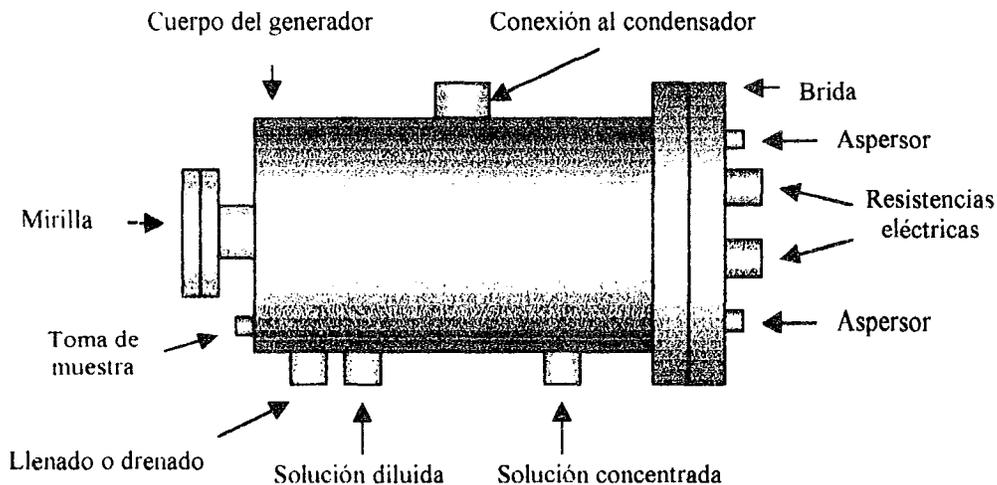


Figura 3.3.1 diagrama esquemático del Generador

### 3.3.2 Condensador

La función del condensador, es la de cambiar de vapor a líquido el fluido de trabajo proveniente del generador, para lo anterior es necesario retirar una cantidad de calor al ambiente a una temperatura relativamente baja. esto se logra mediante un serpentín interno, en el cual circula agua, a una temperatura menor que la que se encuentra el fluido de trabajo a la salida del generador (Figura 3.3.2).

El condensador está compuesto por un recipiente 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 cilindro hay un tubo enrollado con un área de transferencia de calor total de  $0.21 \text{ m}^2$ , en la parte inferior lateral del cilindro hay un tubo que conecta con el generador, para recibir el fluido de trabajo, en fase vapor. De forma similar que los componentes anteriores, cuenta con dos termopozos a diferente altura, para efectuar la medida de temperatura. También cuenta con una mirilla para observar el nivel del fluido de trabajo que se condensa. Este componente está construido en acero inoxidable 316.

En la parte de arriba del cilindro, que es una brida ciega, hay cuatro conectores, dos de ellos sujetan al serpentín a la entrada y a la salida, otro más sirve para conectar un manómetro que registra la presión interna del componente, y el último sirve para conectar una válvula que conduce a las líneas de vacío.

La parte inferior del cilindro tiene dos conectores para tubería. Uno conecta con el evaporador, para circular al fluido de trabajo ya condensado, el segundo tiene una válvula de aguja que sirve para efectuar tomas de muestra, así como para el llenado de fluido de trabajo en el equipo.

Este componente opera 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.

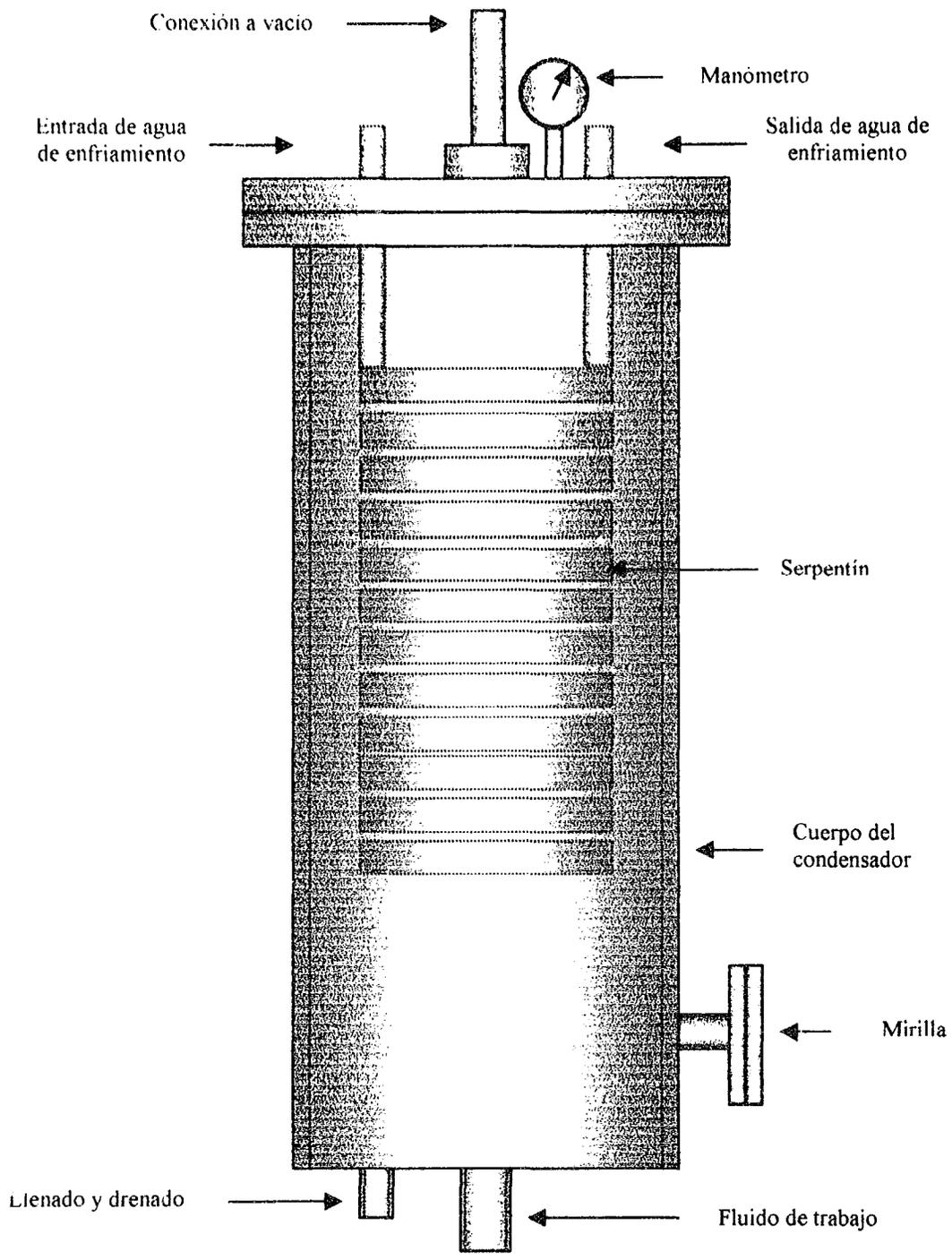


Figura 3.3.2 diagrama esquemático del Condensador

### 3.3.3 Evaporador

El evaporador es el componente donde el fluido de trabajo es cambiado de fase, de líquido a vapor saturado, para esto se requiere un suministro de calor a una temperatura intermedia (figura 3.3.3).

Para calentar el fluido de trabajo se utilizan dos resistencias eléctricas sumergidas en dicho fluido, por lo que el evaporador es de tipo inundado.

El evaporador al igual que los demás componentes esta fabricado en acero inoxidable 316.

Las características del evaporador son similares a las del generador, con la diferencia de que este componente tiene sólo tres conectores para tubería en el cuerpo del cilindro, mientras que el generador tiene cuatro. Uno de los conectores se utiliza para drenar el fluido durante su mantenimiento, otro de ellos comunica al condensador con el evaporador, y es por donde este último recibe del primero el fluido de trabajo, en fase líquida. El tercer conector se utiliza para alimentar al absorbedor del fluido de trabajo en fase vapor, a mayor presión que en el caso del generador.

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

La potencia suministrada a las resistencias eléctricas, se controla a través de un regulador de corriente (variac), cómo en el caso del generador.

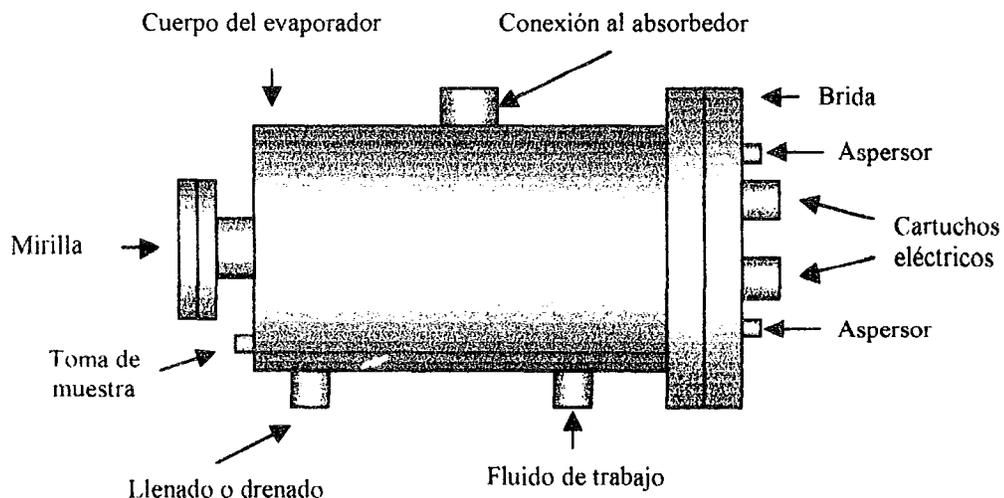


Figura 3.3.3 diagrama esquemático del Evaporador

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.3.4 Absorbedor

En este componente el fluido de trabajo que proviene del evaporador se absorbe en la solución concentrada que llega del generador. Durante la absorción se desprende una cantidad de calor  $Q_{AB}$ , la cual tiene un nivel de temperatura mayor que la suministrada al generador y al evaporador (Figura 3.3.4).

En éste componente como en los otros, se empleó para su fabricación acero inoxidable 316, y consiste básicamente en un cilindro 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 el fondo. Dentro del cuerpo hay un serpentín con un área de transferencia de calor total de  $0.39 \text{ m}^2$ , dentro de este serpentín fluye el aceite que retira el calor útil. Hay un distribuidor de solución con una abertura cilíndrica de 3mm de ancho sobre el rollo para formar una película delgada de la solución concentrada de absorbente sobre la superficie del serpentín. El distribuidor está conectado sobre el serpentín. Se recibe la solución concentrada de absorbente del generador, y otro conector lateral en la parte baja, recibe el fluido de trabajo en forma de vapor del evaporador precisamente. Este componente cuenta con una mirilla para verificar el nivel de solución diluida producida. Existen 2 termopozos a diferentes niveles para la toma de temperaturas. En la parte inferior hay dos conectores para tubería, uno de ellos comunica con el generador, a través de un economizador por donde circula la solución diluida en forma de líquido, el otro conector tiene un sello tipo cromatógrafo para realizar tomas de muestra. En la brida de la parte superior, que es una brida ciega, existen cuatro conectores para tubería, dos de los cuales sostienen al serpentín, uno más tiene conectado un manómetro para medir la presión interna y el último tiene acoplada una válvula que conecta a la línea de vacío.

Este componente ha sido diseñado para operar con una recuperación de calor máxima de 1.8 kW y para almacenar hasta 3.5 kg máximo de solución diluida, a las condiciones de diseño.

### 3.3.4 Absorbedor

En este componente el fluido de trabajo que proviene del evaporador se absorbe en la solución concentrada que llega del generador. Durante la absorción se desprende una cantidad de calor  $Q_{AB}$ , la cual tiene un nivel de temperatura mayor que la suministrada al generador y al evaporador (Figura 3.3.4).

En éste componente como en los otros, se empleó para su fabricación acero inoxidable 316, y consiste básicamente en un cilindro 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 el fondo. Dentro del cuerpo hay un serpentín con un área de transferencia de calor total de  $0.39 \text{ m}^2$ , dentro de este serpentín fluye el aceite que retira el calor útil. Hay un distribuidor de solución con una abertura cilíndrica de 3mm de ancho sobre el rollo para formar una película delgada de la solución concentrada de absorbente sobre la superficie del serpentín. El distribuidor está conectado sobre el serpentín. Se recibe la solución concentrada de absorbente del generador, y otro conector lateral en la parte baja, recibe el fluido de trabajo en forma de vapor del evaporador precisamente. Este componente cuenta con una mirilla para verificar el nivel de solución diluida producida. Existen 2 termopozos a diferentes niveles para la toma de temperaturas. En la parte inferior hay dos conectores para tubería, uno de ellos comunica con el generador, a través de un economizador por donde circula la solución diluida en forma de líquido, el otro conector tiene un sello tipo cromatógrafo para realizar tomas de muestra. En la brida de la parte superior, que es una brida ciega, existen cuatro conectores para tubería, dos de los cuales sostienen al serpentín, uno más tiene conectado un manómetro para medir la presión interna y el último tiene acoplada una válvula que conecta a la línea de vacío.

Este componente ha sido diseñado para operar con una recuperación de calor máxima de 1.8 kW y para almacenar hasta 3.5 kg máximo de solución diluida, a las condiciones de diseño.

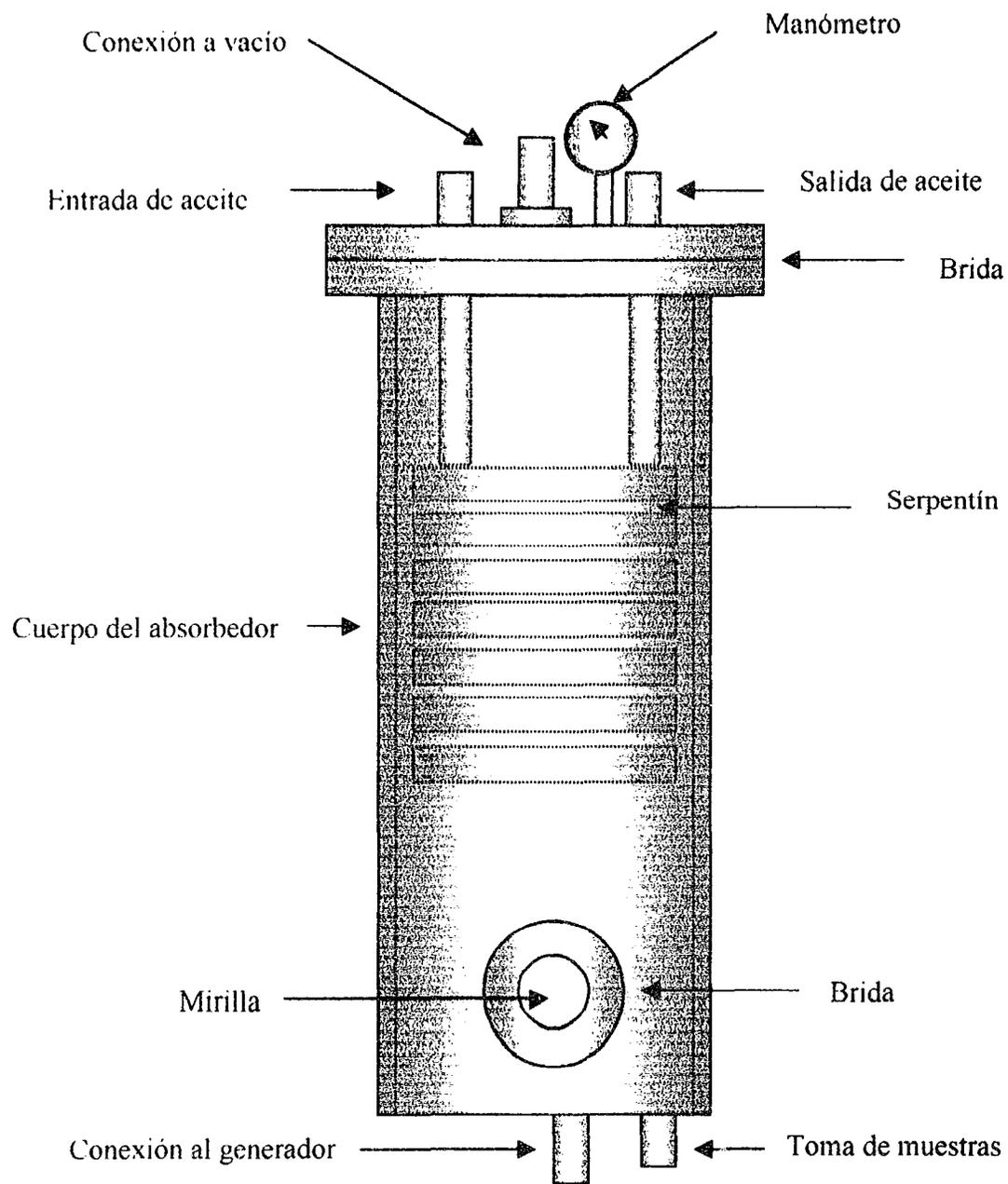


Figura 3.3.4 diagrama esquemático del Absorbedor

### 3.3.5. Economizador

La función del economizador es precalentar la solución concentrada que va del generador al absorbedor, utilizando calor de la solución diluida que va del absorbedor al generador. Es básicamente un intercambiador de calor de tubos concéntricos en el que la solución diluida fluye en el tubo interno, mientras que la solución concentrada en absorbente fluye a través de la sección anular (fig. 3.3.5).

El diámetro externo de la sección anular es de 12.7 mm, mientras que el tubo interno tiene un diámetro externo de 9.5 mm.

Este componente opera con una potencia máxima  $Q_{FC}$  de 850 W y está fabricado en acero inoxidable 316.

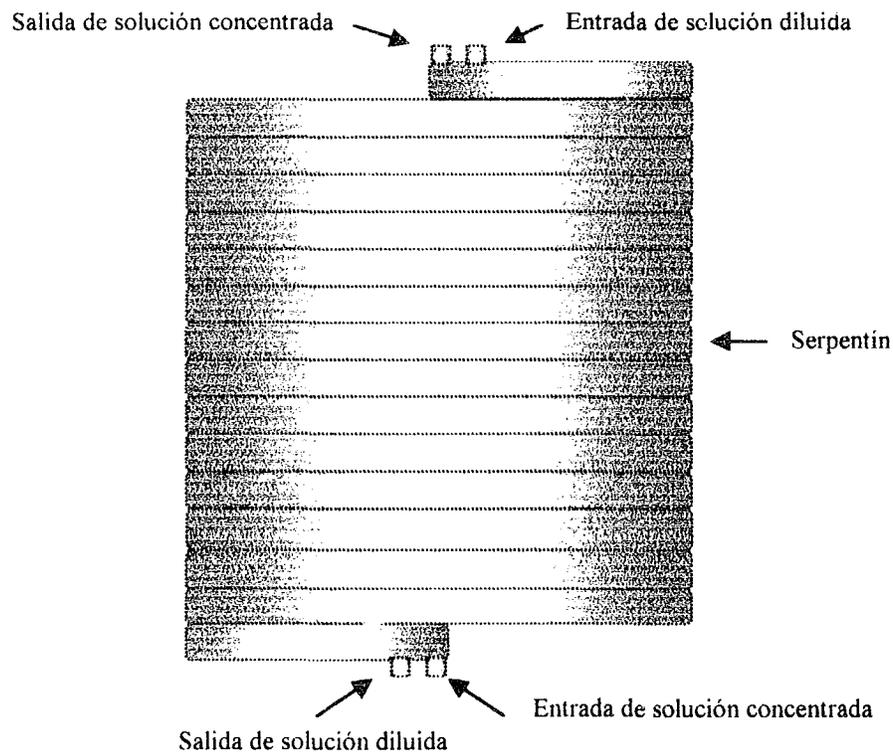


Figura 3.3.5 diagrama esquemático del Economizador

### **3.4 VÁLVULAS Y TUBERÍA**

Para la conexión entre los diversos componentes se utilizaron mangueras para coples y nipples, tubería y tubings. El tubing utilizado es de 3/16", ya que los flujos máxicos de solución son menores a 1000g/min y dada la corrosividad de la solución se utilizaron estos tubing en acero inoxidable 316.

Las válvulas con que cuenta el equipo, son 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 presión máxima de 3 kg/cm<sup>2</sup>, provistos de conectores a la entrada y salida para tubing de 9.5mm (3/8").

Las mangueras de conexión para los diversos componentes son del tipo Aeroquip para baja presión. Las cuales tienen un tubo interior de caucho sintético, un refuerzo de una trenza textil y una cubierta de caucho sintético (para evitar la deformación a presiones menores a la atmosférica). Estas mangueras se acoplan a las tuberías mediante abrazaderas de acero al carbón. El rango de temperatura que soportan estas mangueras es de -40 a 93 °C y la presión máxima de 18 kg/cm<sup>2</sup>.

### **3.5 MATERIALES Y AISLANTES**

Para evitar problemas de corrosión, los componentes principales, las tuberías válvulas y conexiones, están fabricados con acero inoxidable 316.

La mayoría de las uniones están soldadas, sin embargo, las partes que tienen bridas tienen sellos hechos de viton para resistir altas temperaturas.

El vidrio utilizado en las mirillas es de tipo templado.

En lo que corresponde al sistema auxiliar de vacío, las tuberías y las válvulas son de cobre, ya que no están expuestas a la solución de trabajo.

En las líneas de enfriamiento hay manguera para agua.

Las líneas de conexión del sistema auxiliar de recuperación de calor son de acero inoxidable tipo 316 de 9.5mm de diámetro externo y manguera de neopreno para altas temperaturas.

La tubería y los componentes están aislados térmicamente con aislante compuesto de elastómero expandido, para un rango de temperaturas de operación de 57 a 104 °C, tiene un espesor de 19mm y una conductividad térmica de 0.039 W/m K a temperatura ambiente (32 °C). El aislante esta sujeto a los componentes y accesorios con cinta aislante 3M resistente a las temperaturas de operación del equipo.

### 3.6 SISTEMAS AUXILIARES

Hay tres sistemas auxiliares básicos en la operación del transformador de calor, que son los siguientes:

- Sistema de enfriamiento,
- Sistema de recuperación de calor, y
- Sistema de vacío.

#### 3.6.1 Sistema de enfriamiento

Este sistema se utiliza para condensar el vapor de fluido de trabajo, que llega al condensador. Consiste en dos cisternas (fuera del lugar de instalación del transformador térmico), una de las cisternas puede almacenar 12 m<sup>3</sup> y la otra 36m<sup>3</sup> de agua. Estas cisternas están acopladas a un sistema hidroneumático, un rotámetro, válvulas, tubería y mangueras (figura 3.6.1).

El agua fluye de la cisterna de menor capacidad mediante el sistema hidroneumático, a través de la tubería y las válvulas, pasa por un rotámetro, que nos permite conocer el flujo de agua de enfriamiento que retirará el calor producido por la condensación de vapor del fluido de trabajo. El agua circula en el interior del serpentín del condensador, sin estar en contacto con el fluido de trabajo, llegando a la salida del condensador a una temperatura mayor a la que entro, posteriormente fluye al depósito de mayor capacidad. El flujo de agua se regula a través de una válvula de compuerta de bronce de 1/2" para presiones menores de 13 kg/cm<sup>2</sup>.

#### 3.6.2 Sistema de recuperación de calor

Los componentes del sistema de recuperación de calor son los siguientes:

- Un tanque de calentamiento con regulación de temperatura para un fluido térmico.
- Un serpentín en la parte interior del absorbedor.
- Una válvula.
- Tubería de acero inoxidable.
- Mangueras para altas temperaturas.
- Un serpentín de acero inoxidable externo al absorbedor.

El tanque de calentamiento mantiene constante la temperatura del fluido térmico mediante un control de temperatura de  $\pm 0.5$  °C y cuenta con una bomba integrada marca polystat, de acuerdo a las especificaciones del catálogo Cole-Parmer 1999-2000 modelo E-12105-30. El fluido que se calienta no puede ser agua, debido al intervalo de temperaturas de operación y al consecuente cambio de fase, por lo que se emplea 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 se calienta dentro del tanque y después se bombea hacia el serpentín del absorbedor a un flujo que va a depender de la temperatura a la cual ingresa a la bomba.

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

El aceite térmico pasa a través del serpentín, donde retira el calor generado durante la absorción, este calor útil está a mayor temperatura que el aceite térmico, por lo que incrementa la temperatura de éste, al salir del absorbedor.

Después de salir el aceite del serpentín, es conducido mediante una manguera construida con elastómero AQP para alta temperatura, refuerzo de dos trenzas de alambre y cubierta de hule sintético, para presiones hasta de  $404 \text{ kg/cm}^2$  y temperaturas de operación de  $-40$  a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$ , hacia la tubería de acero inoxidable que lo ingresa al tanque de calentamiento.

El tanque de calentamiento tiene un serpentín externo al absorbedor, sumergido en el aceite térmico, el cual tiene un área de intercambio de  $0.03 \text{ m}^2$ , construido en tubing de acero inoxidable 316 sin costura de  $3/8$ " de diámetro, a través de este serpentín circula agua de enfriamiento que proviene de la salida del serpentín del condensador y que ayuda a mantener la temperatura dentro del tanque, ya que el calor útil retirado del absorbedor está a mayor temperatura que la temperatura controlada del aceite térmico en el tanque de calentamiento (figura 3.6.2).

### 3.6.3 Sistema de vacío

Este sistema se utiliza para generar el vacío en los componentes y tuberías del transformador térmico por absorción de una etapa y consta de los siguientes componentes:

- 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 el absorbedor a la bomba de vacío.

El sistema de vacío nos permite retirar el aire del equipo. Este sistema se acciona con el fin de hacer vacío para introducir los fluidos de trabajo a los componentes, así como para hacer vacío al inicio de cada corrida. Una vez realizada la operación correcta del equipo éste sistema no debe de estar en operación, ya que variaría la presión en los componentes, lo que ocasionaría que no se alcance un equilibrio termodinámico (figura 3.6.3).

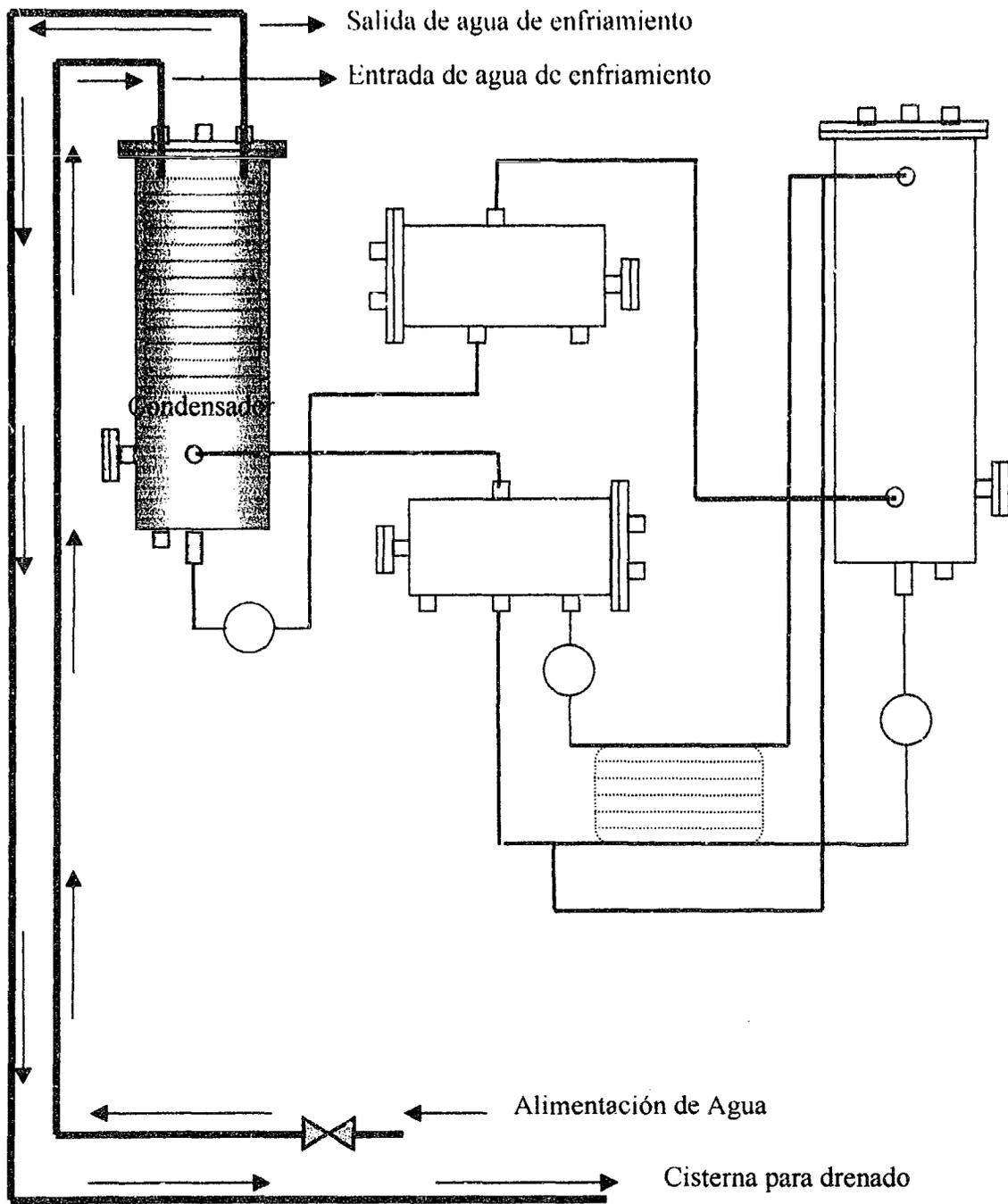


Figura 3.6.1 diagrama esquemático del Sistema de Enfriamiento, acoplado al Transformador Térmico

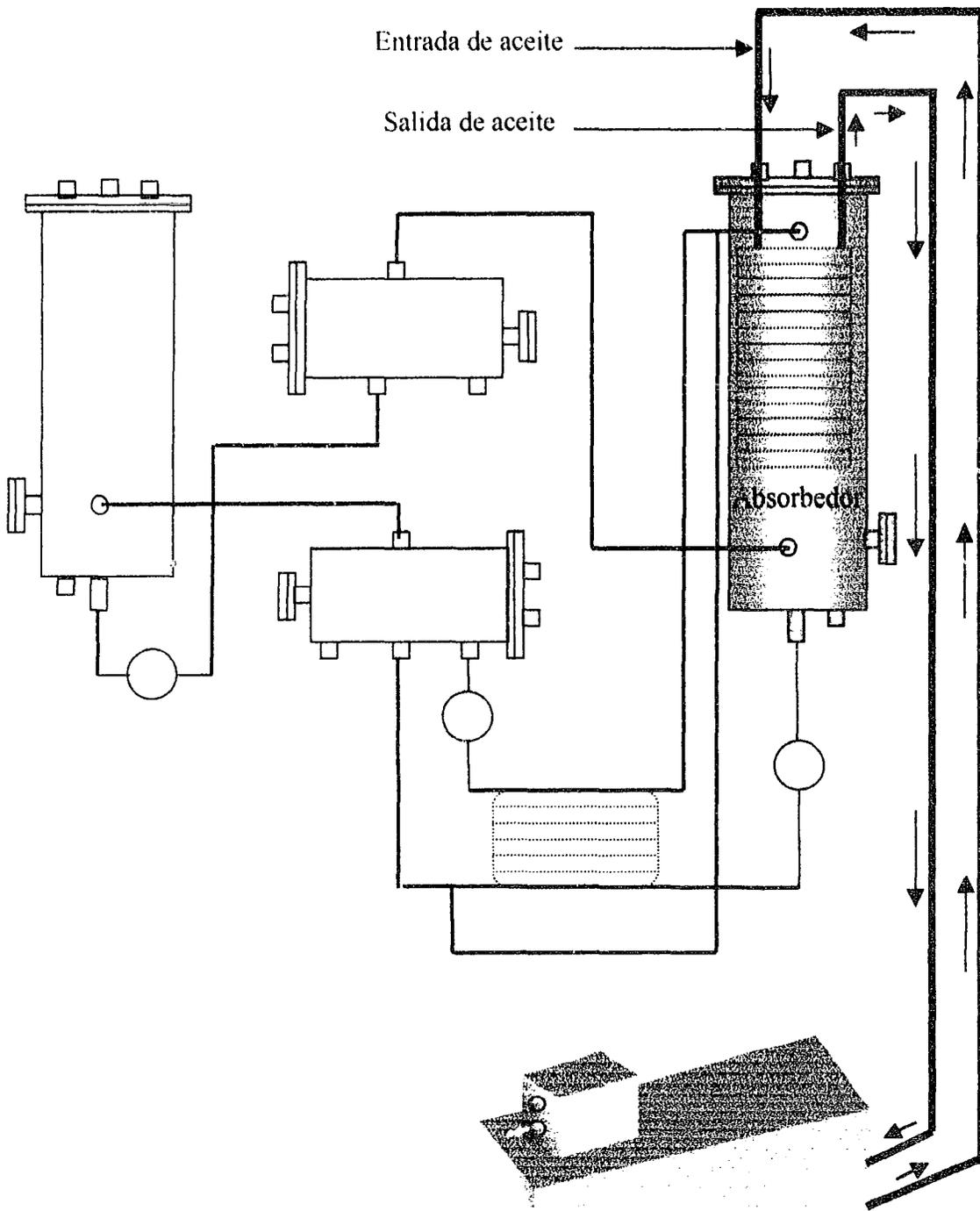


Figura 3.6.2 diagrama esquemático del Sistema de Recuperación de Calor, acoplado al Transformador Térmico

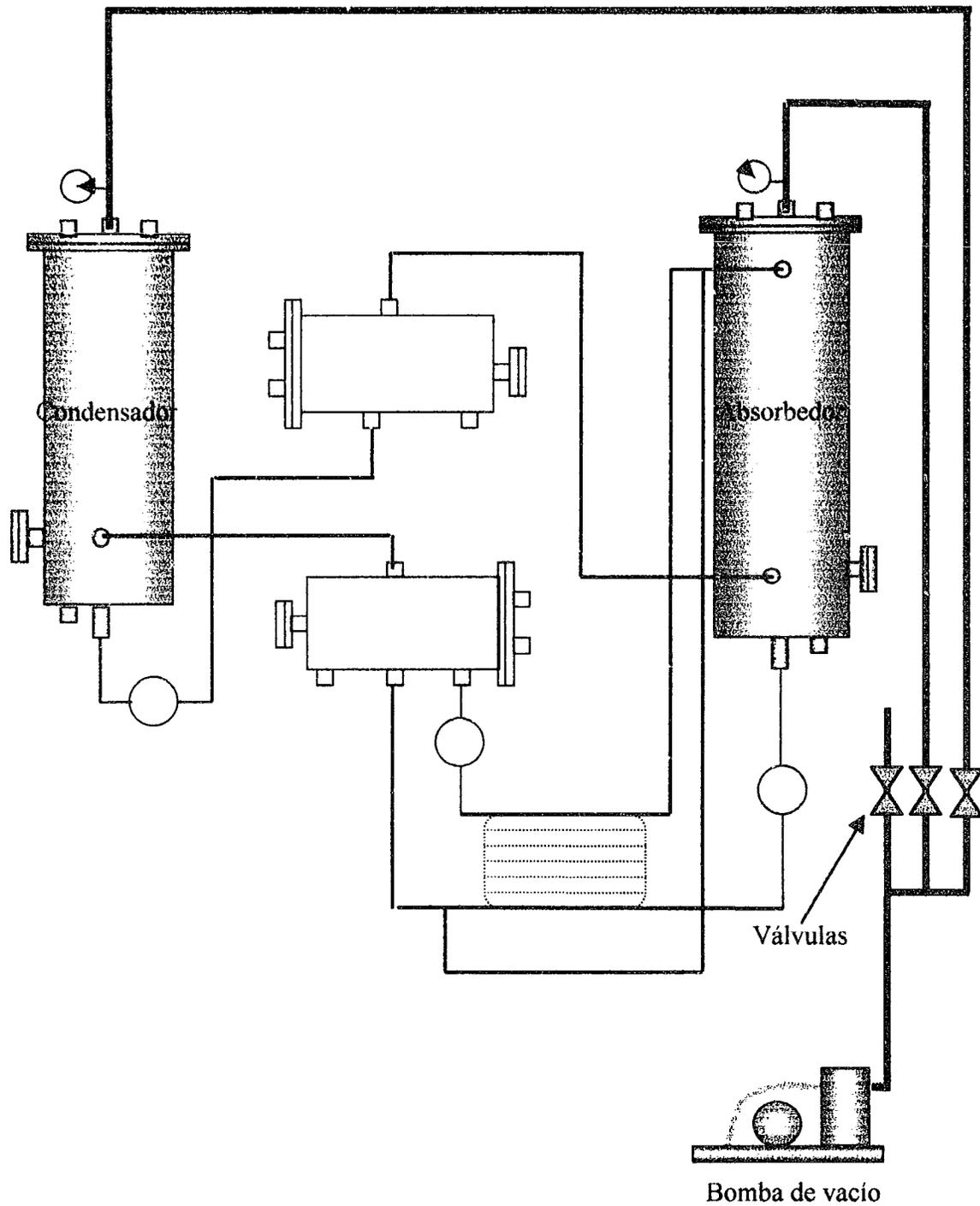


Figura 3.6.3 diagrama esquemático del Sistema de Vacío, acoplado al Transformador Térmico

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

### 3.7 INSTRUMENTACIÓN

A continuación se presentan las características de cada uno de los instrumentos empleados durante la experimentación, estos instrumentos posibilitaron el control de los distintos parámetros involucrados en el desarrollo de las corridas experimentales, así como el registro de los datos obtenidos al final de ellas, tales parámetros fueron la temperatura, la presión, la potencia, el flujo y la concentración.

#### 3.7.1 Medición de la temperatura

La medición de la temperatura es posible, mediante la utilización de termopares inmersos en los termopozos de los componentes del transformador térmico por absorción de una etapa.

Los termopozos utilizan aceite térmico para facilitar la transferencia de calor.

Los termopares son de tipo T (Cobre-Constantan) calibre 24, con un rango de operación de -250 a 400 °C con un error máximo de  $\pm 0.4\%$  para temperaturas mayores a 0°C.

Los termopares no tienen contacto físico con las soluciones, ya que la conductividad del metal y el aceite a su alrededor permiten determinar variaciones de temperatura menores a 0.1 °C.

Para tomar y registrar las temperaturas de cada uno de los equipos, se empleó un sistema de monitoreo llamado también adquisitor de datos Hewlett Packard modelo 1301-A, el cual se conecta a una computadora personal. El adquisitor de datos maneja un lenguaje llamado HPVEE (Hewlett-Packard Visual Engineering Environment) versión 5.0, desarrollado por la misma compañía, para el ahorro de tiempo en la evaluación de equipos, y que permite la lectura y el almacenamiento de los datos de temperatura obtenidos durante la experimentación.

La figura 3.7.1.1 muestra la secuencia en que opera el programa al momento en que se dispone para efectuar el monitoreo de las temperaturas, a continuación se explica en forma breve la función de cada uno de los iconos que aparecen en la pantalla.

- Inicio. Este icono se emplea para dar inicio al programa de registro de temperaturas del adquisitor de datos.
- Ciclo. Este icono es empleado para establecer el ciclo de tiempo de registro de los datos de temperatura de los equipos, por lo que determina el tiempo para la toma de las lecturas.
- Toma de lecturas. El icono de toma de lecturas permite enviar la señal del adquisitor para que se registren las temperaturas de los instrumentos de medición que están conectados.
- Diagramas de temperaturas. Este icono permite que se desplieguen de manera gráfica los datos de temperatura obtenidos durante cada ciclo de tiempo, facilitando un análisis de la variación de la temperatura en el equipo.

- Archivo. Este icono permite el almacenamiento en un archivo de los datos de temperatura obtenidas durante cada ciclo.

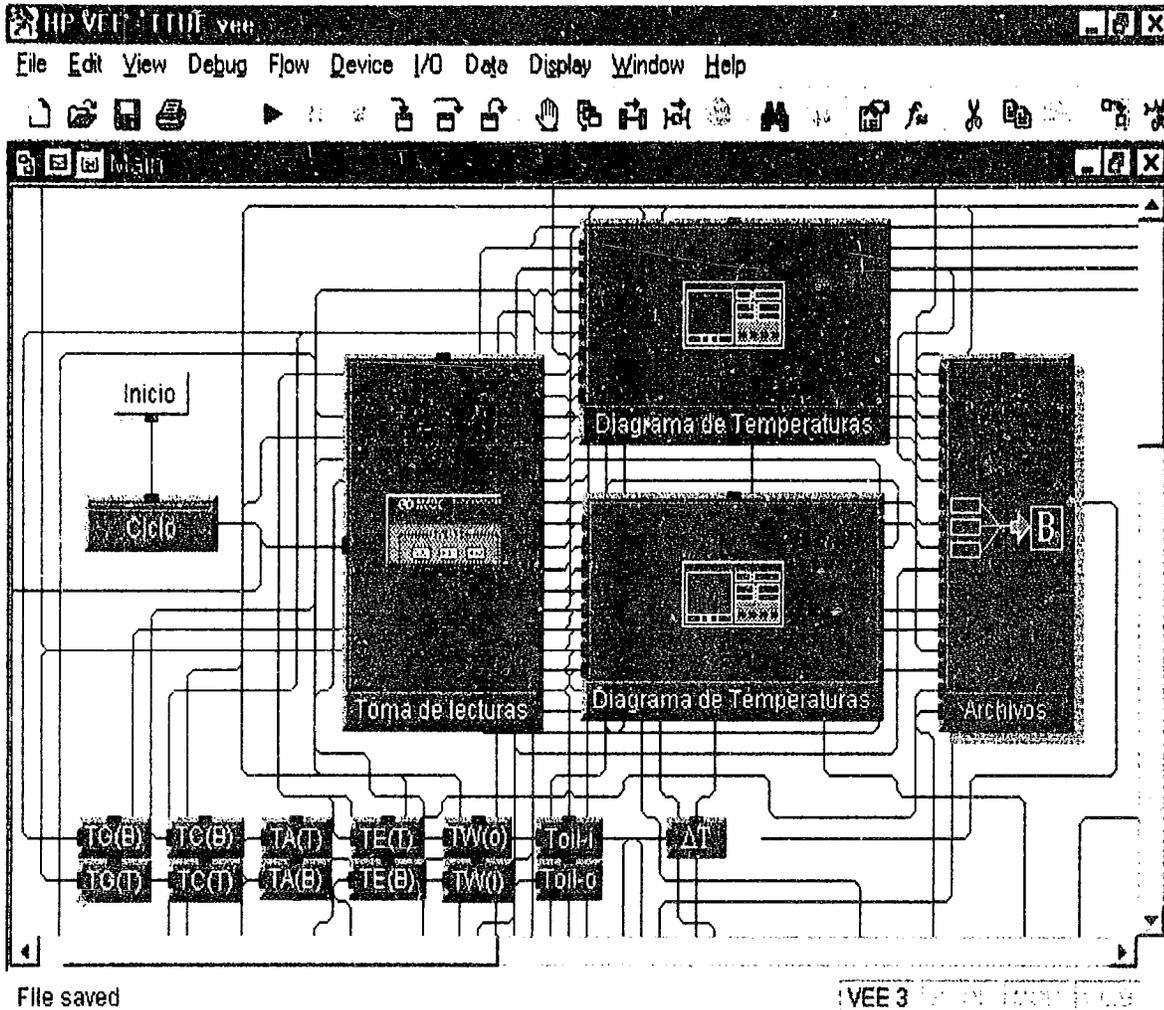


Figura 3.7.1.1 diagrama esquemático del programa para la adquisición de datos empleando el lenguaje HPVEE de Hewlett Packard.

En la figura 3.7.1.2 se puede observar la manera gráfica en que se presentan los datos de temperatura registrados en cada ciclo de tiempo durante la experimentación, cabe señalar que el lapso para cada toma de lecturas se fijo en 5 segundos. También se puede destacar que en la pantalla se registran además de la temperatura de los equipos la temperatura de los sistemas auxiliares de enfriamiento y recuperación de calor, así como parámetros importantes como el incremento de temperatura del aceite térmico del sistema de recuperación de calor y el incremento de temperatura definido para el equipo.

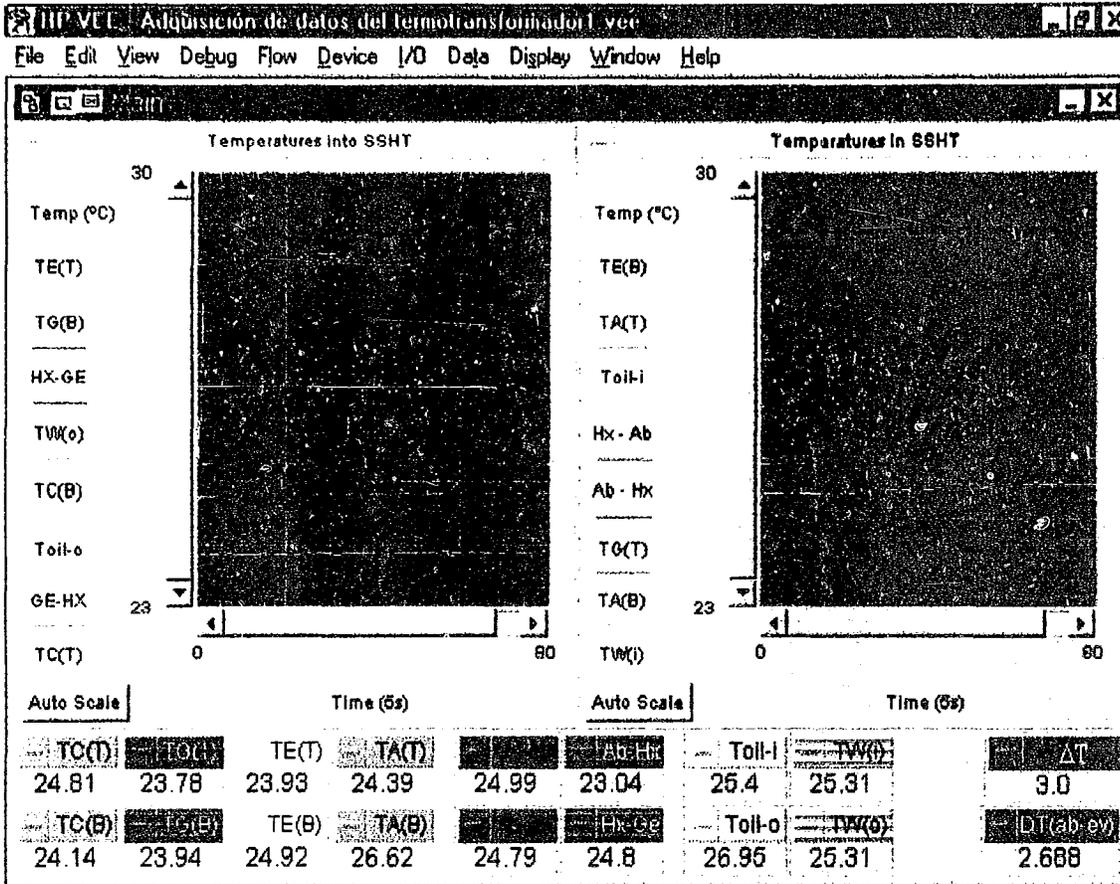


Figura 3.7.1.2 diagrama esquemático de la pantalla desplegada en el monitor de la PC durante la experimentación, empleando el adquirente de datos Hewlett Packard modelo 1301-A.

### 3.7.2 Medidores de presión

Para medir la presión dentro de los equipos, hay dos manómetros de 2 1/2", instalados, uno en el condensador y otro en el absorbente, los manómetros son del tipo Bourdon de alta presión, inundados con glicerina, y fabricados en acero inoxidable 316, marca Ashcroft modelo E-68022-01, con una variación de registro de  $\pm 1\%$  en el intervalo de 30" Hg a 30 psi.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

### 3.7.3 Reguladores de flujo

Para la medición de flujos, tanto en el transformador de calor por absorción de una etapa, como en los sistemas auxiliares, se utilizaron los siguientes rotámetros:

- Rotámetro de la solución diluida: marca Gilmont modelo GF-4341-1125 con las siguientes características: 65 mm de longitud, con graduaciones del 5% de la escala total, con precisión de  $\pm 0.25\%$  de la lectura, con detección del 10% del total de la escala, que mide valores entre 100 y 1500 ml/min. Diseñado para presiones hasta de 250 psi y temperaturas entre -29 y 121 °C. Construido en un marco de acero inoxidable 316, con sellos internos de viton® y flotador de acero inoxidable 316.
- Rotámetro de la solución concentrada: marca Gilmont modelo GF-4341-1125: similar al rotámetro de la solución diluida.
- Rotámetro del fluido de trabajo: marca Gilmont modelo Gf-4341-1115: difiere de los anteriores únicamente en que mide valores entre 5 y 55 ml/min.
- Rotámetro del sistema de enfriamiento: marca Omega modelo FL-710.

### 3.7.4 Bombas

Para la solución concentrada se utilizó un sistema con control y encendido, con aceleración de un segundo a partir del arranque, con regulación de  $\pm 2.0\%$  y velocidad controlada por un potenciómetro graduado, operable con temperaturas del ambiente hasta de 79°C en ciclo continuo, con revoluciones de 180 a 3600 por minuto, con una potencia de 1/10 hp, en corriente directa y requiere de suministro eléctrico de 115/230 volts de corriente directa a 50/60 Hz. Este sistema está acoplado a una cabeza de bomba para flujo máximo de 2030.4ml/min.

Para el fluido de trabajo se utilizó un sistema de control de bombas con encendido y motor integrados en una consola, con aceleración de un segundo a partir del arranque y velocidad controlada por un potenciómetro adosado en la parte frontal de la consola en donde se acopla el cabezal de la bomba. El sistema está diseñado para mantener flujo con temperaturas del ambiente entre 0 y 40 °C, con revoluciones de 25 a 5000 por minuto, con potencia de 1/7hp y requiere de suministro eléctrico de 115/230 volts de corriente directa a 50/60 Hz para utilizar 2.2 amperes, acoplado con una cabeza de flujo máximo de 151 ml/min.

Para la solución diluida se utilizó un sistema similar al del fluido de trabajo.

### 3.7.5 Controladores de potencia

Para suministrar energía al transformador térmico por absorción de una etapa, se utilizaron resistencias eléctricas tipo cartucho recubiertas de acero inoxidable 316. Suministrándoles energía a través de dos reguladores de potencia de 20 Amperes cada uno de ellos. Uno sirve para suministrar hasta 2 kW al generador, y otro con la misma capacidad para el evaporador.

### 3.7.6 Medición de la concentración

Para medir la concentración se utilizó un refractómetro tipo Abbe.

La correlación encontrada entre el índice de refracción (IR) y la solución de Bromuro de Litio-Agua, es:

$$X_{\text{LiBr-H}_2\text{O}} = -4187 + 5558(\text{IR}) - 1816(\text{IR})^2. \quad (3.1)$$

Dónde X está expresada en porcentaje en peso de Bromuro de Litio con respecto al total del peso de la solución. Los valores de IR están referidos a una temperatura de 40 °C.

Cabe señalar que para registrar las concentraciones se toman dos muestras simultaneas, una en el fondo del absorbedor y otra en el fondo del generador, posteriormente estas muestras se analizan en el refractómetro, y se encuentra la concentración con la correlación citada anteriormente.

## 3.8 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE TRABAJO

Los medidores utilizados durante la experimentación con el transformador térmico por absorción deben registrar mediciones confiables, para lograr esto es necesario calibrarlos antes de iniciar el trabajo de experimentación, la calibración se realiza mediante una metodología básica, que depende del tipo de medidor que se vaya a calibrar. A continuación se describe la metodología empleada para cada uno de ellos:

### 3.8.1 Calibración de rotámetros

En el caso de los medidores de flujo (rotámetros), se calibran preparando diferentes muestras de la solución, a las concentraciones promedio de trabajo con el equipo.

La metodología de la calibración se sustenta en la medida del peso que un rotámetro registra a un nivel constante. Para ello se efectuaron los siguientes pasos:

1. Se fija un nivel determinado en el rotámetro con le ayuda de una bomba con regulador de potencia, para evitar variaciones durante la alimentación del fluido.
2. Se pesa el fluido que pasa por el rotámetro durante un periodo de tiempo establecido ya sea de 1 min, ó 1/2 min, con la ayuda de una balanza analítica digital.
3. La lectura obtenida se registra en una hoja de cálculo.
4. Una vez obtenidos los datos se correlacionan en función del tiempo.

5. La relación existente entre el flujo másico y el nivel indicado por el rotámetro es el resultado de la correlación anterior.
6. Los pasos anteriores se repiten para otros niveles, otras temperaturas y otras concentraciones.

Las ecuaciones obtenidas para los rotámetros de la solución que son similares fueron las siguientes:

Temperatura (°C)	Ecuación	Desviación
90-110	$M = 0.0272T^2 - 4.6783T + 796$	$R^2 = 1$ (3.2)
80-100	$M = 0.0912T^2 - 15.175T + 1257.7$	$R^2 = 1$ (3.3)

Donde M corresponde al flujo másico en g/min y T es la temperatura en °C.

Para el rotámetro utilizado en la medición del flujo de agua del condensador al evaporador no se obtuvo ecuación, ya que se adquirió calibrado y sólo se verificó que las lecturas fueran las correctas.

### 3.8.2 Calibración de los termopares

Los termopares empleados para la medición de la temperatura son de tipo T (cobre-Constantan) de calibre 20, estos termopares van conectados al sistema de adquisición de datos Hewlett Packard, el cual trabaja de manera intrínseca compensando la temperatura leída con la temperatura del medio ambiente y enviando a la computadora el valor presente en cada termopar y de esta manera por compensación electrónica se obtiene el valor en °C.

De modo que para asegurarse de que los valores de las temperaturas registradas por el sistema de adquisición de datos, se verificó cada termopar empleando para ello un equipo de calibración de termopares (marca Hofra, tipo D55 SE<sup>3/4</sup>" ) el cual mantiene al termopar a una temperatura fija y constante, con una incertidumbre de 0.1°C y se checa que la temperatura del equipo de calibración coincida con la registrada por el sistema de adquisición de datos. Dado que la diferencia de temperatura entre los dos equipos no fue mayor a 0.5 °C, no hubo necesidad de utilizar ecuaciones de calibración, por lo que se tomaron directamente las temperaturas registradas por el adquirente de datos.

### 3.8.3 Calibración del flujo del aceite en el sistema de recuperación de calor

Como la potencia de la bomba del sistema de recuperación de calor es constante, hubo la necesidad de correlacionar el flujo en función de la temperatura del tanque de calentamiento, para lo cual se empleo la siguiente metodología:

1. Se fija la potencia de la bomba del tanque de calentamiento a su máxima capacidad.
2. Se fija la temperatura del tanque de calentamiento, a la temperatura mínima que se va a trabajar.
3. Se registra la cantidad de peso del aceite acumulado que pasa a través del serpentín del absorbedor en un tiempo determinado, ya sea 1min ó ½ min, auxiliándose de una balanza analítica digital.
4. Se registra la lectura del peso en una hoja de cálculo.
5. Los datos obtenidos se correlacionan en función del tiempo y la temperatura.
6. Después de efectuar los pasos anteriores, se vuelve a fijar otra temperatura y se repite el procedimiento, hasta llegar a la temperatura máxima con la que se va a trabajar en el equipo.

Mediante la metodología anterior se obtuvo la siguiente ecuación, que relaciona el flujo de aceite en función de la temperatura presente en el tanque de calentamiento del sistema de recuperación de calor:

$$M_{OIL} = 0.0043 (T_{OIL-I})^3 - 0.8808 (T_{OIL-I})^2 + 66.104 T_{OIL-I} - 1304.6 \quad R^2 = 0.993 \quad (3.4)$$

Donde  $M_{OIL}$  es el flujo másico en g/min,  $T_{OIL-I}$  es la temperatura de entrada del aceite térmico en el absorbedor y está dada en °C. Está ecuación es valida para valores de  $T_{OIL-I}$  entre 40 y 84.66 °C.

### 3.8.4 Calibración de los reguladores de voltaje

Como los reguladores de voltaje no registran automáticamente la potencia suministrada al generador y el evaporador, se calibraron para determinar el voltaje entregado por ellos en función de la corriente suministrada. Para lo cual se fija una corriente y con un amperímetro de gancho se miden los amps, mientras que con un multímetro se mide el voltaje de la corriente, entregado por el regulador para esa corriente. Se sigue el mismo procedimiento para diferentes valores de corriente y se correlacionan estas variables. Se obtuvieron las siguientes ecuaciones para cada regulador de voltaje:

**Generador:**

$$V = 8.6901 * I^2 - 3.3315 * I + 5.4000 \quad R^2 = 0.9981 \quad (3.5)$$

**Evaporador:**

$$V = 7.7063 * I^2 + 4.0352 * I - 3.3042 \quad R^2 = 0.9995 \quad (3.6)$$

Donde  $V$  es el voltaje en volts, e  $I$  es la corriente en ampers. Está ecuación tiene aplicación para un rango de 3 a 8 volts.

**3.8.5 Calibración del refractómetro de Abbe para el registro de la concentración**

Para calibrar el refractómetro de Abbe, que es el que nos garantiza que la experimentación se realice a la concentración deseada, se siguió la metodología siguiente:

1. Se preparan muestras de solución a diferentes concentraciones.
2. Se establece una temperatura para el baño térmico del refractómetro.
3. Se toman las lecturas de cada una de las muestras, y se registran en una hoja de calculo.
4. Se correlacionan los resultados de la lectura del índice de refracción con la concentración, a una temperatura establecida.

La correlación que se encontró entre el índice de refracción (IR) y la solución de Bromuro de Litio-Agua, es:

$$X_{LiBr-H_2O} = - 4187 + 5558(IR) - 1816(IR)^2. \quad (3.7)$$

Dónde X es la concentración en por ciento en peso de Litio con respecto al total del peso de la solución. Los valores de IR están referidos a una temperatura de 40 °C.

**3.9 METODOLOGIA DE OPERACIÓN DEL EQUIPO**

La operación adecuada del transformador térmico por absorción de una etapa, requiere de una metodología que nos ayude a mantener trabajando adecuado adecuadamente el equipo, y nos ayude a lograr un equilibrio termodinámico en un tiempo razonable, la metodología se ha dividido en cuatro partes esenciales que son las siguientes:

1. Metodología de llenado del equipo.
2. Metodología de arranque del equipo.
3. Operación del equipo y,
4. Metodología de paro del equipo.

### **3.9.1 Metodología de llenado del equipo**

En esta parte se describe la manera en que debe de introducirse la mezcla de trabajo en el transformador de calor, es importante señalar que los pasos a seguir son los más adecuados para la seguridad tanto del equipo, como del operador del mismo, además de que de esta forma se logra asegurar que no habrá contaminación de solución en los componentes que manejan solamente fluido de trabajo, como es el caso del condensador y del evaporador, y por otro lado se asegura también que no variará la concentración de la solución debido al contacto indeseado con fluido de trabajo.

#### **3.9.1.1 Alimentación de la solución concentrada en el generador y el absorbedor**

Para alimentar hasta un nivel adecuado (cuidando que las resistencias eléctricas estén siempre inundadas para evitar que se dañen) al generador y el absorbedor se debe llevar a cabo la metodología siguiente:

1. Se prepara la solución a la concentración que se desea.
2. Se toma el índice de refracción para corroborar que éste a la concentración deseada.
3. Se hace vacío en el equipo para poder ingresar la solución de trabajo por diferencia de presiones.
4. Se conecta una manguera en la válvula del fondo del generador, ya que a través de esta circulará la solución para ingresar al generador. En este punto cabe mencionar que debe presionarse la manguera en el extremo que no está conectado para evitar que se pierda el vacío en el equipo.
5. Se conduce la solución a través de la manguera conectada al generador, hasta alcanzar un nivel arriba del 75% del total de la mirilla. En este punto cabe mencionar que al sumergir la manguera conectada al fondo del generador en el recipiente con la solución de trabajo, esta fluirá instantáneamente debido a la diferencia de presiones entre el equipo y el recipiente que contiene la solución.
6. Una vez alcanzado el nivel adecuado se suspende el paso de solución hacia el generador.

7. Se bombea la solución concentrada hacia el absorbedor, en este caso, hasta alcanzar un nivel del 50% de la mirilla del absorbedor. Es importante señalar que este nivel se debe mantener sin variaciones cuando el equipo esté trabajando en condiciones de estabilidad.
8. Si el generador queda por abajo del nivel adecuado se debe ingresar más solución repitiendo los pasos anteriores.
9. Se detiene el procedimiento una vez que se han alcanzado los niveles deseados, tanto en el absorbedor como en el generador, cabe señalar que al ingresar solución al absorbedor queda cargado también el economizador con la solución concentrada, ya que este se encuentra entre el generador y el absorbedor, restando solamente la parte interna de ser cargada con la solución diluida cuando el absorbedor este trabajando.
10. Para evitar el regreso de la solución es necesario ajustar las presiones del generador y del absorbedor.

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

El procedimiento de llenado del condensador y evaporador con el fluido de trabajo, es muy parecido al del generador y absorbedor con la solución concentrada, la metodología es la siguiente:

1. Se hace vacío en el condensador para poder ingresar el fluido de trabajo por diferencia de presión con respecto a la presión del recipiente que contiene al fluido de trabajo y que debe ser la presión atmosférica.
2. Se conecta una manguera en la válvula del fondo del condensador, cerrando el extremo que no esta conectado para evitar que se pierda el vacío.
3. Se sumerge el extremo no conectado al condensador en el recipiente con fluido de trabajo permitiendo que circule hacia el condensador.
4. Una vez que el fluido de trabajo ocupa el 90 % aproximadamente del nivel total de la mirilla del condensador, se detiene el ingreso del fluido, obstruyendo el paso del mismo doblando la manguera o de alguna otra forma que impida la circulación, y evite la pérdida del vacío, al mismo tiempo.
5. Se bombea el fluido de trabajo hacia el evaporador.
6. Una vez que ha quedado vacío nuevamente el condensador, se repiten los pasos anteriores hasta que el nivel en el evaporador sea del 75% del total de la mirilla aproximadamente, para garantizar que las resistencias eléctricas queden inmersas dentro del fluido de trabajo, y no se dañen. Los pasos se deben repetir cuidando que el nivel final del condensador sea aproximadamente del 50% del total de la mirilla del mismo, y el del evaporador del 75% respectivamente. Cabe señalar que estos niveles deberán de vigilarse cuando el equipo alcance la estabilidad, durante su funcionamiento.

7. Una vez cargados los equipos, se ajusta la presión del condensador y del evaporador, para poder iniciar la metodología de arranque.

### 3.9.3 Metodología de arranque del equipo

Después de llenar el equipo, este queda listo para iniciar la metodología de arranque como se describe a continuación:

1. Antes de iniciar cualquier cosa debe verificarse que no hay fugas o alguna fractura en el equipo.
2. Encender la computadora, el adquirente de datos y el refractómetro.
3. Se inicia el almacenamiento de datos y el monitoreo de la temperatura en los diferentes componentes del equipo por medio de la computadora y el programa de adquisición de datos.
4. Verificar que las presiones internas en ambas zonas del equipo son las adecuadas para las condiciones adecuadas para la operación del sistema, de no ser así, ajustarlas con el sistema de vacío.
5. Iniciar la circulación de agua de enfriamiento hacia el condensador y encender el sistema de recuperación de calor, fijando en éste, la temperatura a la que se desea que el sistema controle el aceite térmico.
6. Encender los controladores de flujo acoplados a las bombas del sistema de absorción.
7. Encender el controlador de potencia para el generador aumentando la potencia gradualmente de 20% en 20% cada cinco minutos, hasta alcanzar la potencia deseada.
8. Checar la concentración del generador y del absorbente, con el refractómetro de Abbe.
9. Iniciar la circulación de la solución del generador hacia el absorbente y del absorbente hacia el generador.
10. Mediante el monitoreo de las temperaturas en la zona de condensación esperar el momento en que se inicie la condensación y la consecuente concentración de la solución en el generador.
11. Una vez iniciada la condensación del fluido de trabajo, encender la fuente de potencia del evaporador, y aumentar gradualmente de 20% en 20% del valor deseado, hasta llegar a la potencia deseada.
12. Esperar, mediante el monitoreo de la temperatura en el absorbente, el momento en que se inicie la evaporación del fluido de trabajo.
13. Una vez iniciada la evaporación del fluido de trabajo se empieza el bombeo de condensado hacia el evaporador.

14. En este momento se da por concluido el arranque del equipo.

### **3.9.4 Operación del equipo**

Una vez que el equipo a pasado la etapa de arranque, está listo para iniciar la etapa de estabilización del mismo, y así poder analizar el comportamiento del equipo con la solución o las soluciones empleadas en la experimentación. Esto lo hacemos mediante la siguiente rutina:

1. Verificar las presiones en las zonas del equipo y determinar si son las adecuadas para la operación, si no lo son será necesario detener la corrida experimental.
2. Verificar las potencias de los variacs, y ajustarlas a las deseadas, la diferencia en estas no exige el paro de la corrida experimental.
3. Mantener las concentraciones constantes mediante el muestreo continuo de la solución en el generador y el absorbedor, procurando que este muestreo se efectúe cada 5 min por lo menos. Para poder mantener la concentración constante puede ser necesario variar la potencia en el generador, ya que éste determina el grado de concentración de la solución, también se debe vigilar el nivel de solución o de fluido en los componentes del transformador para garantizar una concentración constante y para evitar la contaminación de fluido de trabajo con solución.
4. El bombeo de las soluciones del condensador, del generador y del absorbedor, debe ser constante para evitar movimientos en los niveles de los componentes del equipo, por eso es importante mantener constantes los flujos de la solución.
5. Mantener un constante monitoreo de las variables a controlar a fin de evitar variaciones que provoquen que no se logre la estabilidad en el equipo
6. Revisar los puntos anteriores durante la operación del equipo.

### **3.9.5 Metodología de paro del equipo**

Para evitar accidentes en caso de cualquier imprevisto debido a la falla en alguna de las partes del equipo, o simplemente para terminar una jornada de trabajo, debe seguirse la metodología que a continuación se describe:

1. Apagar y desconectar los controladores de potencia (variacs).
2. Cuando se presente alguna fuga en cualquier sección del equipo, es necesario evitar el paso de fluido por ésta, ya sea cerrando válvulas, deteniendo el bombeo, o deteniendo el equipo mediante la metodología de paro, a fin de evitar accidentes en el laboratorio por el derrame de la solución. En caso de fuga se debe procurar recibir la solución o el fluido de trabajo que se está derramando en algún recipiente adecuado para tal efecto, y tratar de reparar la fuga en el menor tiempo posible.

3. Mantener la circulación de fluido entre el generador y el absorbedor, y viceversa.
4. Mantener la circulación del agua de enfriamiento y bajar la temperatura del sistema auxiliar de recuperación de calor, hasta el valor con que se inicio la experimentación y cuando la temperatura del equipo disminuya razonablemente, hasta la temperatura ambiente.
5. Una vez que disminuya la temperatura del equipo razonablemente, se apagan las bombas y se cierran las válvulas para evitar paso de la solución por diferencia de presiones, ya que el absorbedor se encuentra a una presión más alta debido a las condiciones que el mismo sistema establece.
6. Se iguala la presión del equipo a la presión atmosférica.
7. Si la concentración del equipo pudiera causar problemas de cristalización, la solución debe ser diluida dentro del equipo, antes de iniciar la metodología de paro, esto se logra aumentando la potencia del evaporador y disminuyendo la del generador, cuidando que ninguno de los equipos tenga deficiencia o exceso de fluido o de solución de trabajo. Otra posibilidad es drenar la solución y el fluido de trabajo, y volverlo a cargar en la siguiente experimentación, mediante la metodología de llenado.
8. Finalmente se apaga el sistema auxiliar de recuperación de calor y el refractómetro, se respaldan los datos obtenidos por el adquisitor de datos, se apaga la computadora y el adquisitor, y se cierra la válvula que permite el suministro de agua de enfriamiento.

Después de llevar a cabo la metodología de paro, el transformador térmico por absorción de una etapa, queda listo para la siguiente experimentación.

## **CAPÍTULO 4**

### **EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL TRANSFORMADOR DE CALOR POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA OPERANDO CON LA MEZCLA DE TRABAJO BROMURO DE LITIO-AGUA**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

En el presente capítulo se describe la manera en que se realizó la experimentación del equipo utilizado durante el desarrollo de este trabajo, se presentan además los resultados obtenidos, así como la variación de los parámetros considerados para la evaluación de la mezcla Bromuro de Litio-Agua en el transformador térmico descrito en el capítulo 3. Aunado con lo anterior se presenta una tabla de resultados con los parámetros más importantes durante las corridas experimentales realizadas, se presentan también las gráficas obtenidas para el análisis comparativo a las diferentes condiciones de operación, y finalmente se hace un análisis de los resultados obtenidos.

#### **4.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Para la evaluación del transformador térmico operado con la solución Bromuro de Litio-Agua, se siguió paso a paso la metodología de llenado, arranque, operación y paro del equipo descritos en el capítulo 3.

El sistema fue evaluado aumentando gradualmente la concentración de la mezcla de trabajo en el generador, desde 50.19% a 61.45% en peso, con variaciones del 2% aproximadamente, presentándose en todos los casos una concentración ligeramente menor en el absorbedor.

Se evitó el manejo de concentraciones mayores en la experimentación con el fin de mantener un rango de seguridad para no tener formación de cristales. El trabajo se apejó en todo momento a la metodología de operación descrita en el capítulo anterior, manteniendo en cada corrida experimental los parámetros controlados dentro de un margen de variación mínima con lo que aseguramos que los resultados obtenidos son confiables.

Se realizaron 23 corridas experimentales con la mezcla Bromuro de Litio-Agua, registrando en cada una de ellas los siguientes parámetros:

1. Presión en el condensador,
2. Presión en el absorbedor,
3. Temperatura en el condensador,
4. Temperatura en el generador,
5. Temperatura en el evaporador,

6. Temperatura en el absorbedor,
7. Temperatura de entrada del aceite en el absorbedor,
8. Temperatura de salida del aceite en el absorbedor,
9. Temperatura de entrada de agua de enfriamiento en el condensador,
10. Temperatura de salida del agua de enfriamiento en el condensador,
11. Concentración de la solución en el generador
12. Concentración de la solución diluida en el absorbedor.
13. Flujo másico de la solución concentrada que va hacia el absorbedor,
14. Flujo másico de la solución diluida que va hacia el generador,
15. Flujo másico del aceite utilizado para la recuperación de calor,
16. Flujo másico de agua de enfriamiento,
17. Potencia suministrada al generador,
18. Potencia suministrada al evaporador.

Se consideró que el equipo operaba en estado estable cuando las variaciones en los distintos parámetros monitoreados eran mínimas ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ), reflejándose esto en una línea horizontal en la pantalla de la computadora, además de que los niveles en las mirillas de los componentes se mantenían constantes lo que determinaba que existía un equilibrio entre la generación de fluido de trabajo y en la absorción del mismo, por lo que los flujos másicos se mantenían constantes tanto del generador hacia el absorbedor, como del absorbedor al generador. Además, el flujo másico del agua de enfriamiento se mantenía constante.

Se realizaron variaciones de la temperatura del sistema de recuperación de calor, hasta que esta se aproximaba  $3^\circ\text{C}$  con respecto a la temperatura del absorbedor, esto era para asegurar que se estaba retirando calor del absorbedor y no calentándolo.

Las potencias de generación y de evaporación para el calentamiento de las resistencias eléctricas se variaban a través de unos variacs hasta alcanzar las temperaturas deseadas.

La presión manométrica para el arranque del equipo se fijo en 27 mm de Hg .

A continuación se presentan las ecuaciones que se utilizaron para calcular los parámetros que se monitorearon

El incremento de temperatura entre el absorbedor y el evaporador se determinó como:

$$\Delta T = T_{WR} - T_{EV} \quad (4.1)$$

La relación de flujo se calculó mediante la ecuación:

$$FR = \frac{M_{AB}}{M_{WF}} = \frac{X_{GE}}{X_{GE} - X_{AB}} \quad (4.2)$$

El flujo másico del agua de enfriamiento se obtuvo de la siguiente manera:

$$M_{WA} = M_{WH} - M_{WI} \quad (4.3)$$

La ecuación para calcular la carga térmica en el condensador es la siguiente:

$$Q_{CO} = M_{WA} C_{PWA} (T_{WA-O} - T_{WA-I}) \quad (4.4)$$

La carga térmica del absorbedor se calculó como:

$$Q_{AB} = M_{OH} C_{POH} (T_{OH-O} - T_{OH-I}) \quad (4.5)$$

La carga térmica del evaporador y generador se obtuvieron mediante las siguientes ecuaciones:

$$Q_{EV} = V_{EV} * I_{EV} \quad (4.6)$$

$$Q_{GE} = V_{GE} * I_{GE} \quad (4.7)$$

Por último el coeficiente de operación externo  $COP_{EXT}$  se obtuvo a partir de la siguiente ecuación:

$$COP_{EXT} = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE} + Q_{EV}} \quad (4.8)$$

### 4.3 RESULTADOS

La tabla 4.1 muestra los resultados obtenidos durante la experimentación para la mezcla de trabajo Bromuro de Litio-Agua, en ella se presentan las temperaturas de cada uno de los componentes (generador, condensador, evaporador y absorbedor), así como las temperaturas de entrada y de salida para el agua del sistema de enfriamiento y las temperaturas de entrada y de salida para el aceite térmico del sistema de recuperación de calor. También se reporta el incremento de temperatura entre el absorbedor y el evaporador, así como la diferencia entre la temperatura de entrada y de salida del aceite térmico, además de la temperatura del baño de aceite. En esta misma tabla se encuentran los datos de la concentración de la solución en el generador y el absorbedor, así como los valores de los flujos másicos para el aceite térmico y el agua de enfriamiento. Se reportan las presiones en la zona del condensador y en la zona del

absorbedor. En el caso de las resistencias eléctricas para el calentamiento de la solución y del fluido de trabajo, se reportan los datos de voltaje y de intensidad de corriente para el generador y el evaporador. Además, se presentan los valores de las cargas térmicas en el condensador, en el absorbedor, en el generador y el evaporador calculados con las ecuaciones reportadas en el punto anterior. Finalmente se reportan los valores obtenidos del coeficiente de operación externo para el equipo.

#### 4.4 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En las figuras 4.1 y 4.2 se presentan las gráficas del incremento de temperatura en función de la concentración en el absorbedor y en el generador respectivamente. Se puede observar que a medida que se incrementa la concentración de la solución tanto en el generador como en el absorbedor, el incremento de temperatura crece. Esto se debe a que al haber una mayor cantidad de bromuro de litio en las soluciones, aumenta la capacidad de absorción, trayendo como consecuencia directa el aumento de temperatura en el absorbedor (ver Fig. 2.7.1).

La figura 4.3 es la gráfica del incremento de temperatura en función de la temperatura de entrada del aceite térmico, a diferentes concentraciones de trabajo para la mezcla Bromuro de Litio-Agua. En esta figura se observa un ligero incremento en el  $\Delta T$  con respecto a la temperatura del aceite, para una misma concentración. Esto se debe a que al aumentar  $T_{OIL-I}$  a una misma concentración, disminuye la viscosidad de la solución (ver Fig. 2.7.2) y aumenta su conductividad térmica, incrementándose con esto la transferencia de calor lo que provoca el aumento del  $\Delta T$ . También se observa que se pueden obtener mayores incrementos de temperatura a medida que aumenta la concentración como se explicó en las figuras anteriores. Los incrementos de temperatura estuvieron en un rango entre 22 y 45 °C para las concentraciones mínimas y máximas respectivamente.

En las figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 se muestran los coeficientes de operación externos en función de la temperatura del absorbedor, de la temperatura del aceite térmico y del incremento de temperatura respectivamente, para distintas concentraciones de la solución. Se puede observar que el  $COP_{EXT}$  disminuye a medida que aumenta la temperatura del absorbedor, la  $T_{OIL-I}$  y el  $\Delta T$ . Esto se puede explicar fácilmente debido a que al aumentar estas temperaturas, disminuye la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del aceite térmico por que el calor útil obtenido en el absorbedor es menor (ver Ec. 4.5), y por lo tanto el  $COP_{EXT}$  disminuye (ver Ec. 4.8). También se puede observar que los valores del  $COP_{EXT}$  variaron entre 0.06 y 0.24.

En la figura 4.8 se presenta el  $Q_{AB}$  en función de la concentración en el generador a diferentes temperaturas del aceite térmico a la entrada. En esta figura se puede observar que al aumentar la concentración en el generador, aumenta la potencia extraída en el absorbedor, esto era de esperarse, ya que como se mencionó en figuras anteriores, al existir dentro del equipo una mayor cantidad de bromuro de litio, aumenta la capacidad de absorción de la solución y por lo tanto el calor útil extraído en el absorbedor.

En la figura 4.9 se presenta el  $Q_{AB}$  en función de la temperatura del aceite térmico para distintas concentraciones de la solución en el generador. En esta figura se observa que la tendencia es

negativa, es decir que al incrementarse la  $T_{OIL-I}$  la  $Q_{AB}$  disminuye, esto se debe a que al aumentar la temperatura de entrada del aceite térmico, la diferencia entre ésta y la temperatura de salida disminuye por lo que el calor útil obtenido es menor.

Tabla 5.1 Resultados experimentales del transformador de calor por absorción de una etapa operando con la mezcla de trabajo Bromuro de Litio-Agua

No.	T <sub>CO</sub> (°C)	T <sub>GE</sub> (°C)	T <sub>EV</sub> (°C)	T <sub>AB</sub> (°C)	T <sub>OIL-IN</sub> (°C)	T <sub>OIL-OUT</sub> (°C)	T <sub>WA-IN</sub> (°C)	T <sub>WA-OUT</sub> (°C)	T <sub>BA</sub> (°C)	ΔT (°C)	ΔT <sub>OH</sub> (°C)
1	38.5	73.7	56.1	78.0	54.3	63.7	25.5	28.4	57.9	21.9	9.4
2	39.5	76.1	58.6	81.7	60.8	67.8	25.7	29.0	64.7	23.1	7.0
3	39.4	76.2	60.3	83.7	67.6	70.9	25.8	29.3	72.4	23.4	3.3
1	35.8	76.5	53.0	77.9	57.0	68.3	25.0	27.2	60.5	24.9	11.3
2	36.5	76.9	54.5	80.5	61.7	70.1	25.0	27.3	65.8	26.0	8.4
3	37.0	77.7	56.3	82.6	66.4	72.8	24.9	27.4	70.6	26.3	6.4
4	37.2	78.3	58.2	85.1	71.3	75.0	25.0	27.5	76.1	26.8	3.8
5	37.5	77.3	59.8	87.2	76.0	78.7	25.1	27.7	81.0	27.4	2.7
1	34.7	80.6	47.1	82.3	57.1	71.0	24.8	27.1	61.0	35.2	13.9
2	34.9	80.7	48.1	83.6	61.9	72.2	24.7	26.8	65.7	35.5	10.3
3	35.3	81.4	50.4	86.0	66.6	74.7	24.7	27.3	71.1	35.7	8.1
4	35.6	83.5	52.6	89.3	71.7	76.8	24.8	27.8	76.4	36.7	5.1
5	36.0	84.6	54.5	92.3	76.1	79.2	24.9	27.6	81.3	37.8	3.1
1	35.4	86.6	56.1	89.1	61.6	73.4	25.1	27.5	65.8	33.0	11.9
2	35.8	87.6	57.7	91.3	66.0	76.5	25.4	27.8	70.6	33.6	10.5
3	36.0	88.1	58.9	92.7	71.1	77.7	25.1	27.8	76.1	33.8	6.6
4	36.3	89.0	61.0	95.9	75.9	80.4	25.6	28.3	81.1	34.9	4.5
5	36.5	89.9	62.2	99.6	80.9	84.5	25.5	28.2	86.7	37.4	3.6
1	36.2	95.5	50.4	92.9	62.5	79.3	24.7	26.5	66.8	42.5	16.9
2	36.7	95.7	51.7	94.3	66.9	81.5	24.6	27.0	71.6	42.6	14.6
3	37.7	96.8	53.3	96.4	71.1	84.3	24.7	27.2	76.1	43.1	13.1
4	37.7	96.2	54.9	98.8	76.1	86.8	24.9	27.3	82.0	44.0	10.7
5	38.0	97.1	56.7	100.1	82.7	90.3	24.8	27.2	88.9	43.4	7.0

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 5.1 Continuación

No.	X <sub>AB</sub> (% peso)	X <sub>GE</sub> (% peso)	RF (adim.)	P <sub>CO</sub> (in Hg)	P <sub>AB</sub> (in Hg)	M <sub>EV</sub> (g/s)	M <sub>GE-AB</sub> (g/s)	M <sub>AB GE</sub> (g/s)	M <sub>WA</sub> (g/s)	M <sub>OIL</sub> (g/s)	V <sub>GE</sub> (V)
1	48.7	49.9	41.6	26.0	25.2	0.13	9.98	9.94	20.80	6.3	6.4
2	49.5	50.2	71.7	25.9	25.2	0.17	9.96	9.92	20.80	7.1	7
3	49.6	50.5	56.1	25.9	24.9	0.15	9.96	9.92	20.80	7.8	7.07
1	53.2	54.0	67.5	27.0	25.9	0.17	9.96	9.94	34.00	6.6	7.3
2	53.1	53.8	76.9	27.0	25.9	0.17	9.95	9.93	34.00	7.2	7.3
3	53.2	54.0	67.5	26.9	25.9	0.17	9.95	9.92	34.00	7.7	7.4
4	53.5	54.3	67.9	27.0	25.0	0.17	9.94	9.91	34.00	8.2	7.4
5	53.5	54.3	67.9	26.9	24.9	0.17	10.07	9.91	34.00	8.7	7.2
1	56.7	57.2	114.4	27.0	26.4	0.17	9.93	9.92	34.00	6.6	8
2	56.4	57.1	81.6	27.0	26.3	0.17	9.93	9.92	34.00	7.2	7
3	56.2	56.9	81.3	27.0	26.2	0.17	9.92	9.91	34.00	7.7	7.6
4	56.7	57.2	114.4	27.0	26.2	0.17	9.92	9.92	34.00	8.2	7.9
5	56.7	57.7	57.7	27.0	26.2	0.17	9.91	9.93	34.00	8.7	7.9
1	58.4	59.2	74.0	27.1	25.4	0.18	10.49	10.22	34.00	7.2	7.6
2	58.5	59.3	74.1	27.1	25.3	0.17	10.49	10.25	34.00	7.6	7.9
3	58.6	59.4	74.3	27.1	25.1	0.17	10.50	10.31	34.00	8.1	7.9
4	58.7	59.6	66.2	27.1	24.9	0.17	10.50	10.37	34.00	8.6	7.8
5	59.0	59.7	85.3	27.1	24.3	0.17	10.51	10.40	34.00	9.2	7.8
1	60.9	61.4	122.8	26.8	26.8	0.15	9.95	9.92	34.00	7.3	8.5
2	60.8	61.4	102.3	26.8	26.8	0.15	9.96	9.92	34.00	7.7	8.5
3	60.8	61.4	102.3	26.8	26.3	0.15	9.97	9.92	34.00	8.1	8.5
4	60.8	61.4	102.3	26.8	27.3	0.15	9.96	9.93	34.00	8.7	8.5
5	60.8	61.5	87.9	26.8	26.2	0.15	9.97	9.94	34.00	9.5	8.5

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

Tabla 5.1 continuación

No.	I <sub>GE</sub> (A)	V <sub>EV</sub> (V)	I <sub>EV</sub> (A)	Q <sub>GE-EX</sub> (W)	Q <sub>EV-EX</sub> (W)	Q <sub>AB-EX</sub> (W)	Q <sub>CO-EX</sub> (W)	CP <sub>OIL</sub> (J/g°C)	CP <sub>WA</sub> (J/g°C)	COP <sub>EXT</sub> (adim.)
1	53.4	7.1	58.2	344.0	412.0	114.7	265.5	1.95	4.4	0.152
2	58.3	7.2	58.9	409.5	423.0	97.5	302.2	1.97	4.4	0.117
3	58.9	7.1	58.4	417.0	416.0	50.8	317.3	2.00	4.4	0.061
1	60.8	7.2	59.0	444.2	425.0	146.5	324.3	1.96	4.4	0.169
2	60.8	7.2	59.0	444.2	425.0	119.3	337.7	1.97	4.4	0.137
3	61.7	7.2	59.0	456.0	425.0	98.3	378.1	1.99	4.4	0.112
4	61.7	7.2	59.0	456.0	425.0	61.5	361.0	2.01	4.4	0.070
5	60.0	7.2	59.0	431.9	425.0	46.9	394.5	2.03	4.4	0.055
1	66.8	7.2	59.0	534.9	425.2	180.4	354.1	1.96	4.4	0.188
2	59.1	7.2	59.0	419.8	425.2	146.7	321.3	1.97	4.4	0.174
3	64.4	7.2	59.0	482.0	425.2	124.2	385.5	1.99	4.4	0.137
4	66.0	7.2	59.0	521.4	425.2	84.3	446.8	2.01	4.4	0.089
5	66.0	7.2	59.0	521.4	425.2	55.0	403.5	2.03	4.4	0.058
1	63.4	7.2	59.0	482.0	425.0	167.8	352.7	1.97	4.4	0.185
2	66.0	7.2	59.0	521.0	425.0	159.5	369.1	1.99	4.4	0.169
3	66.0	7.2	59.0	521.0	425.0	107.7	400.5	2.01	4.4	0.114
4	65.1	7.2	59.0	508.0	425.0	78.5	412.4	2.03	4.4	0.084
5	65.1	7.2	59.0	508.0	425.0	4.1	393.0	2.05	4.4	0.004
1	71.1	7.2	59.0	604.0	425.0	242.2	275.0	1.98	4.4	0.235
2	71.1	7.2	59.0	604.0	425.0	225.2	351.2	1.99	4.4	0.219
3	71.1	7.2	59.0	604.0	425.0	215.0	372.1	2.01	4.4	0.209
4	71.1	7.2	59.0	604.0	425.0	188.1	358.6	2.03	4.4	0.183
5	71.1	7.2	59.0	604.0	425.0	148.0	366.1	2.05	4.4	0.144

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN

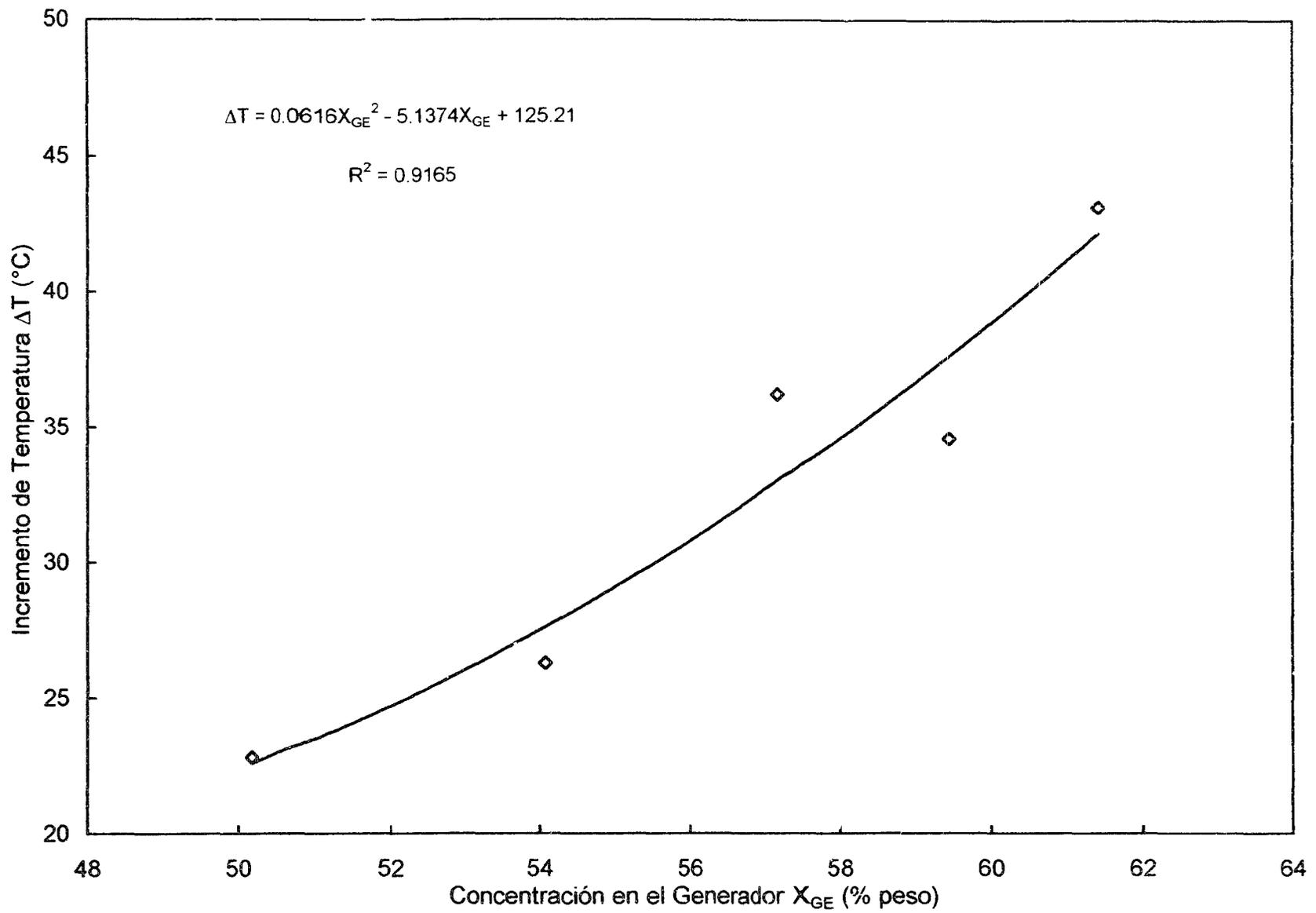


Figura 4.2 Incremento de Temperatura en función de la Concentración en el Generador para la mezcla Bromuro de Litio-Agua

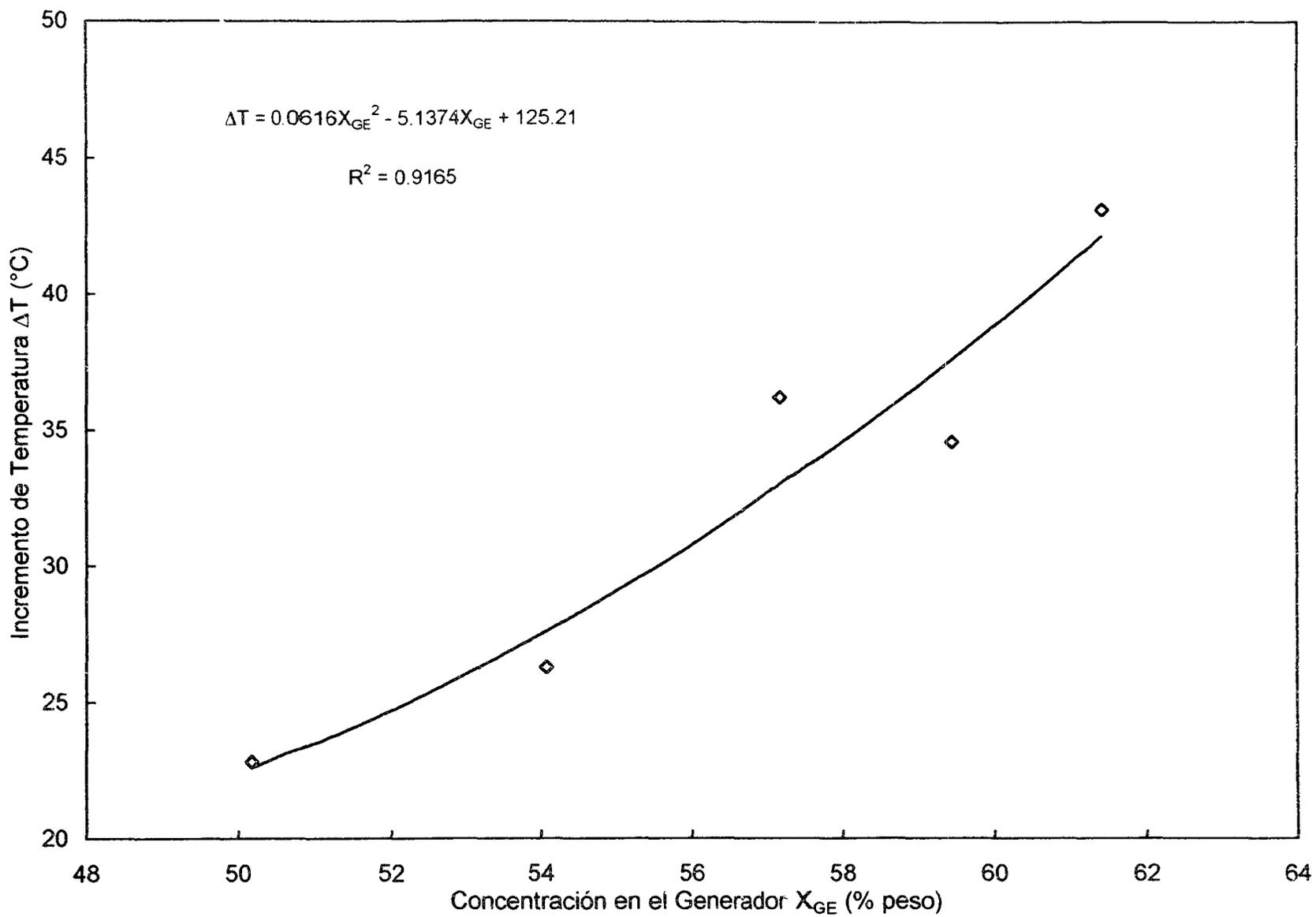


Figura 4.2 Incremento de Temperatura en función de la Concentración en el Generador para la mezcla Bromuro de Litio-Agua

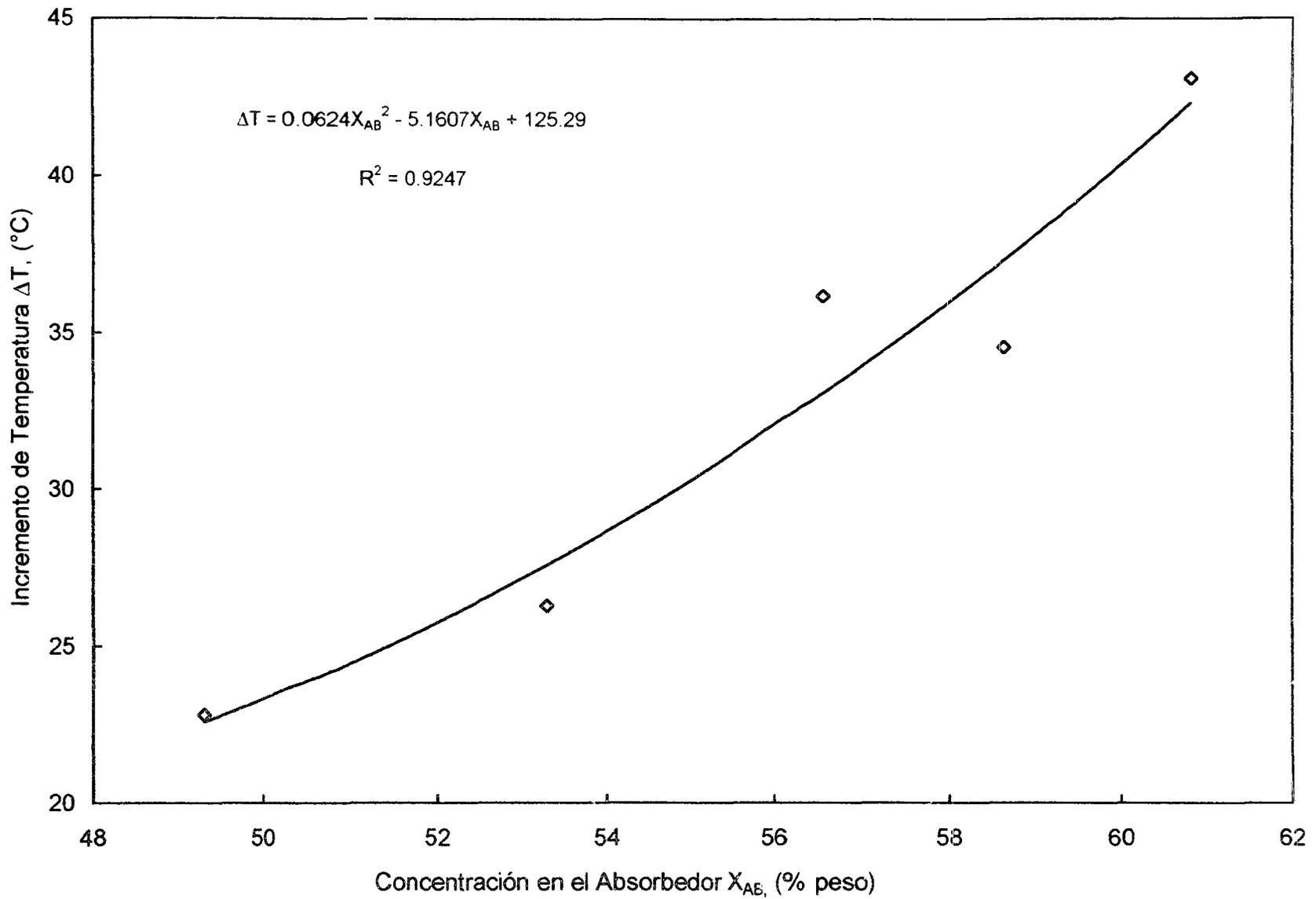


Figura 4.1 Incremento de Temperatura en función de la Concentración en el Absorbedor para la mezcla Bromuro de Litio-Agua

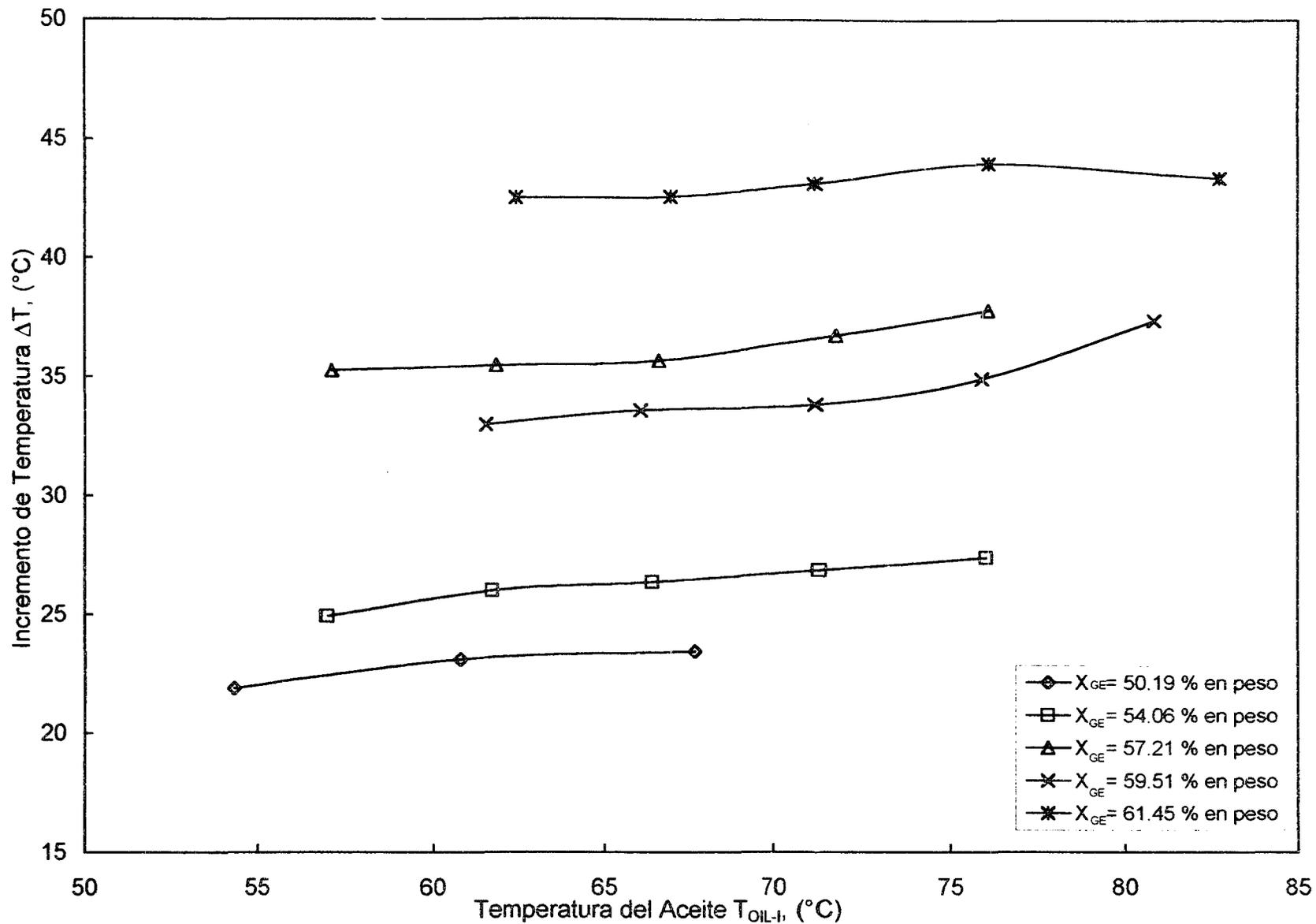


Figura 4.3 Incremento de Temperatura en función de la Temperatura del Aceite Térmico para la mezcla Bromuro de Litio-Agua

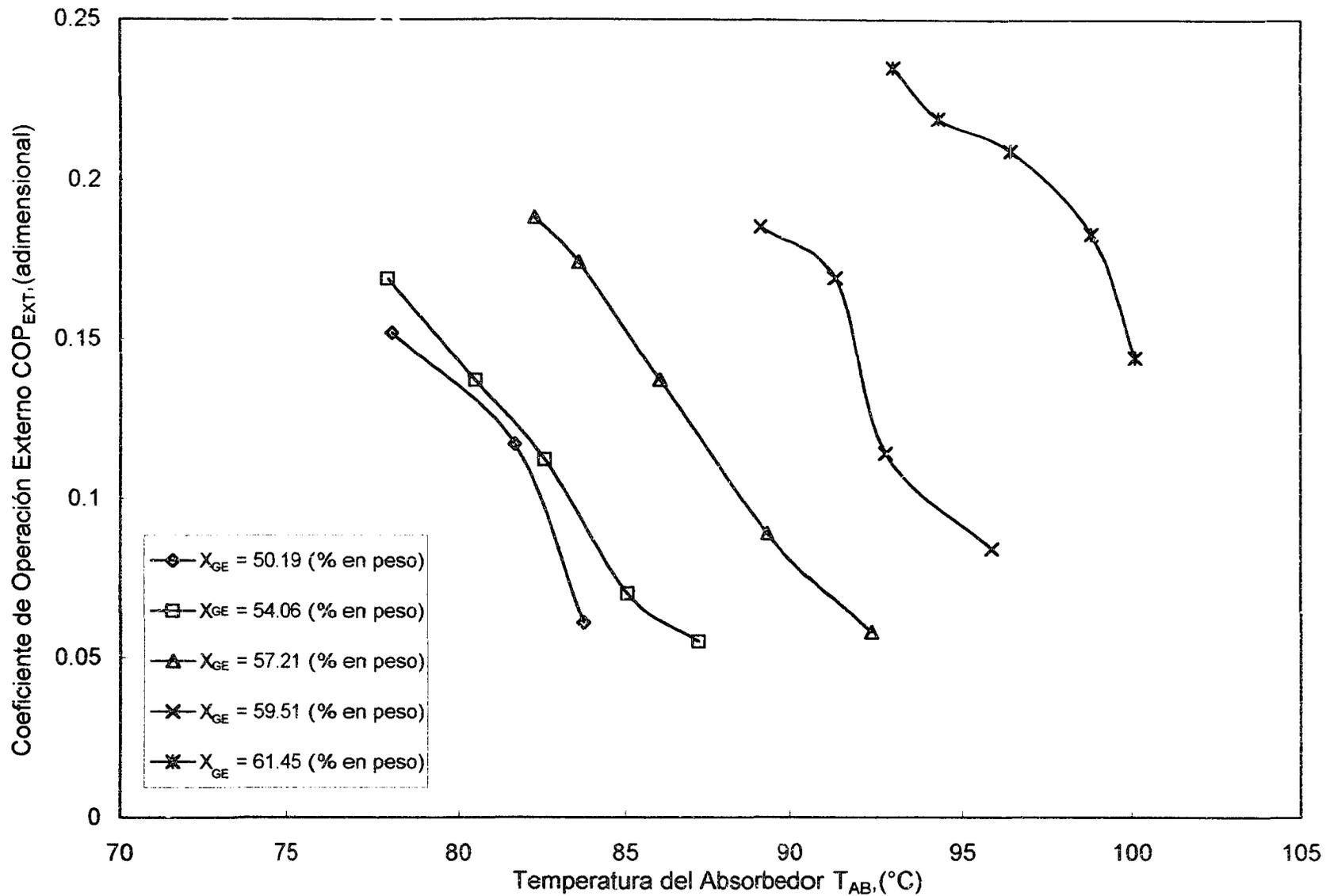


Figura 4.4 Coeficiente de Operación Externo en función de la Temperatura de Absorción para la mezcla Bromuro de Litio-Agua

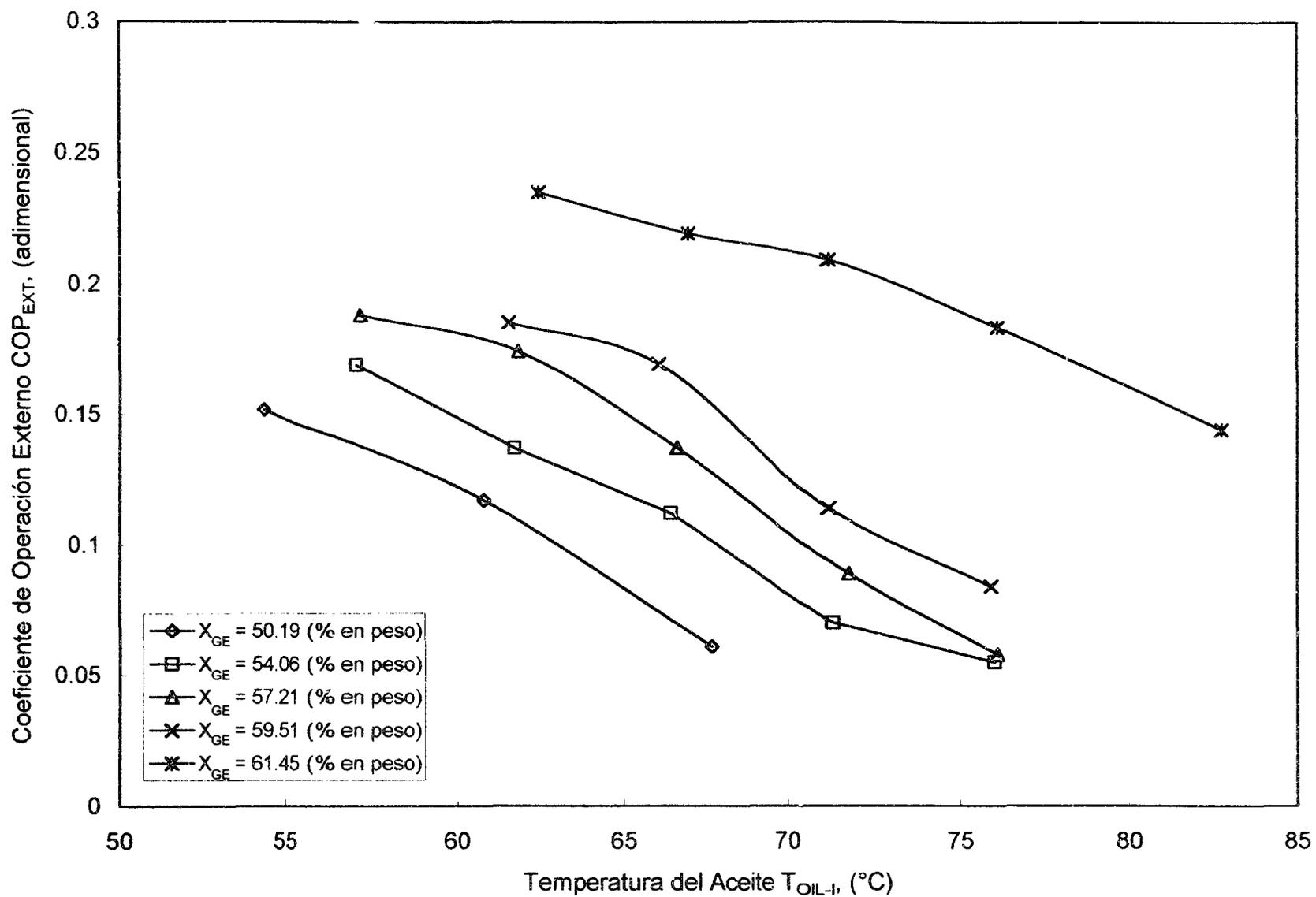


Figura 4.5 Coeficiente de Operación Externo en función de la Temperatura del Aceite Térmico para la mezcla Bromuro de Litio-Agua

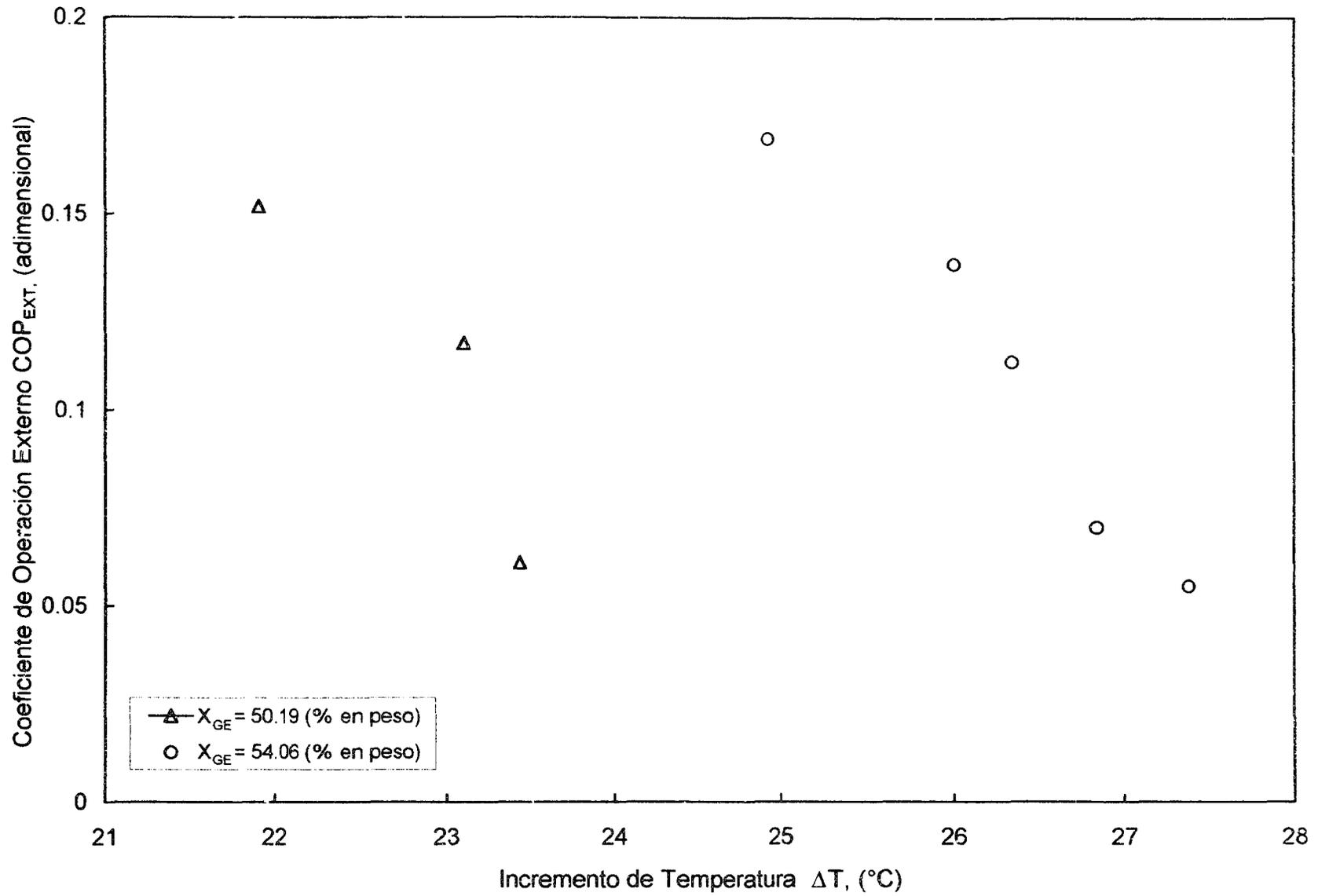


Figura 4.6 Coeficiente de Operación Externo en función del Incremento de Temperatura para la mezcla Bromuro de Litio-Agua

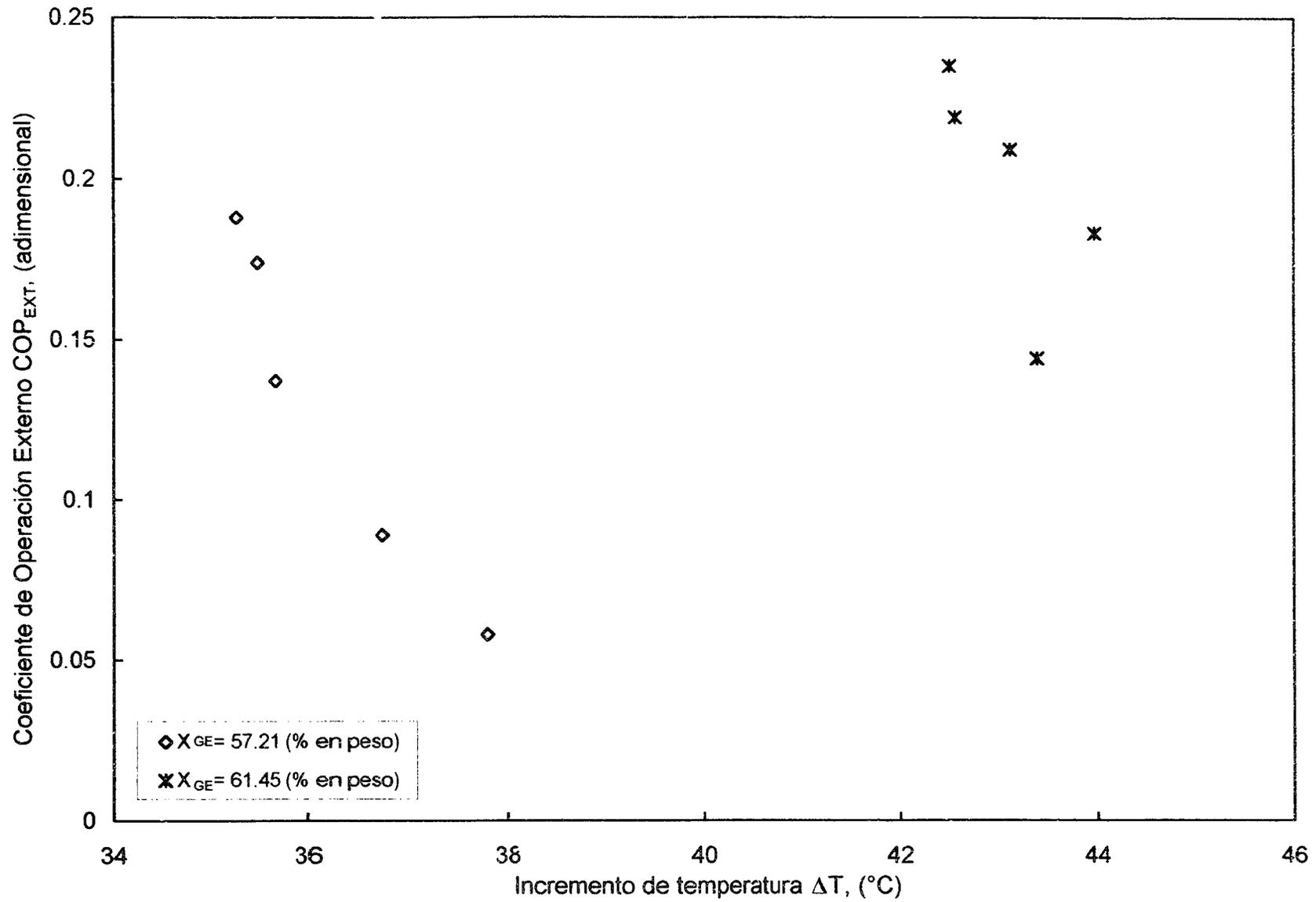


Figura 4.7 Coeficiente de Operación Externo en función del Incremento de Temperatura para la mezcla Bromuro de Litio-Agua

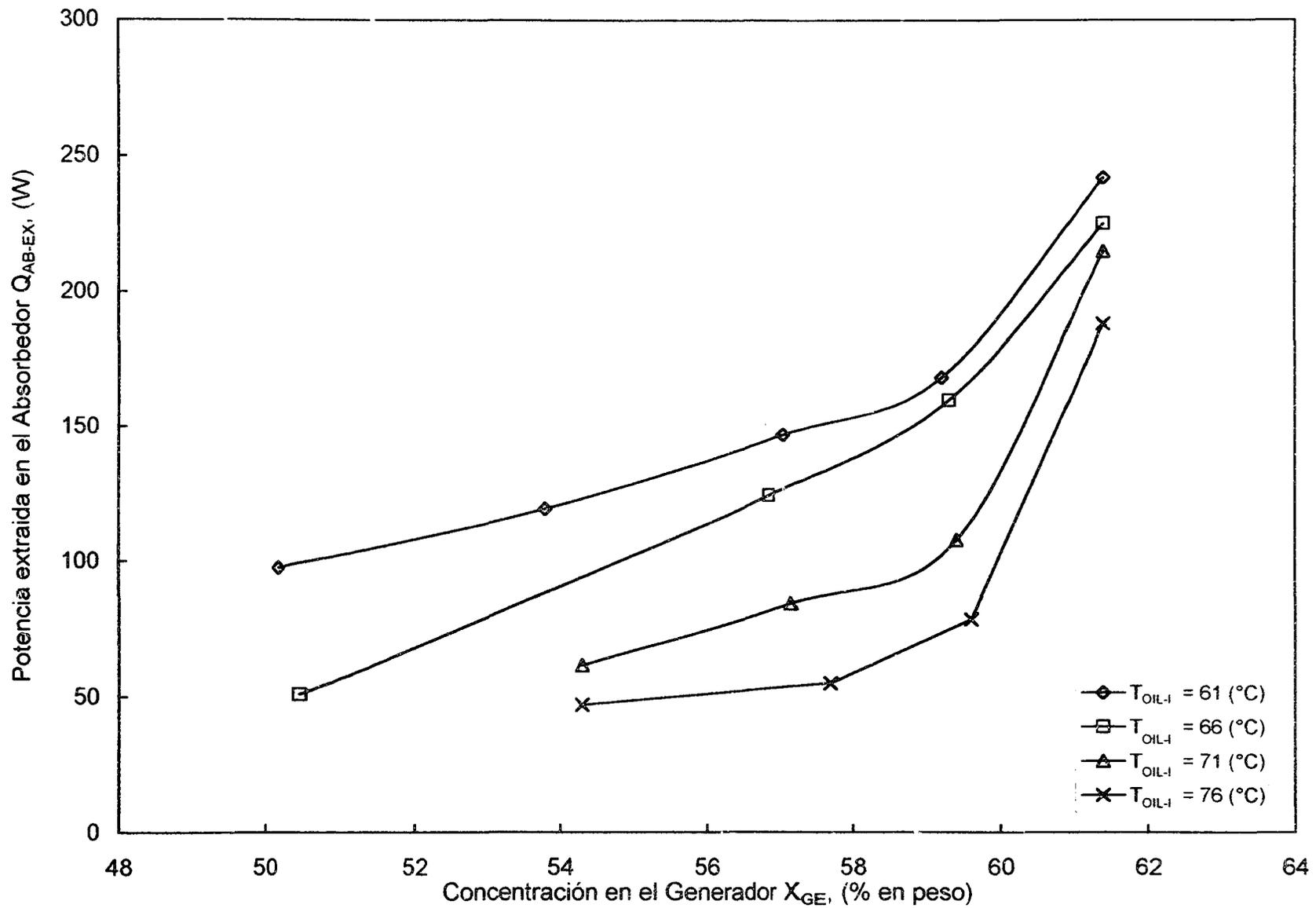


Figura 4.8 Potencia extraída en el Absorbedor en función de la Concentración en el Generador para la mezcla Bromuro de Litio-Agua

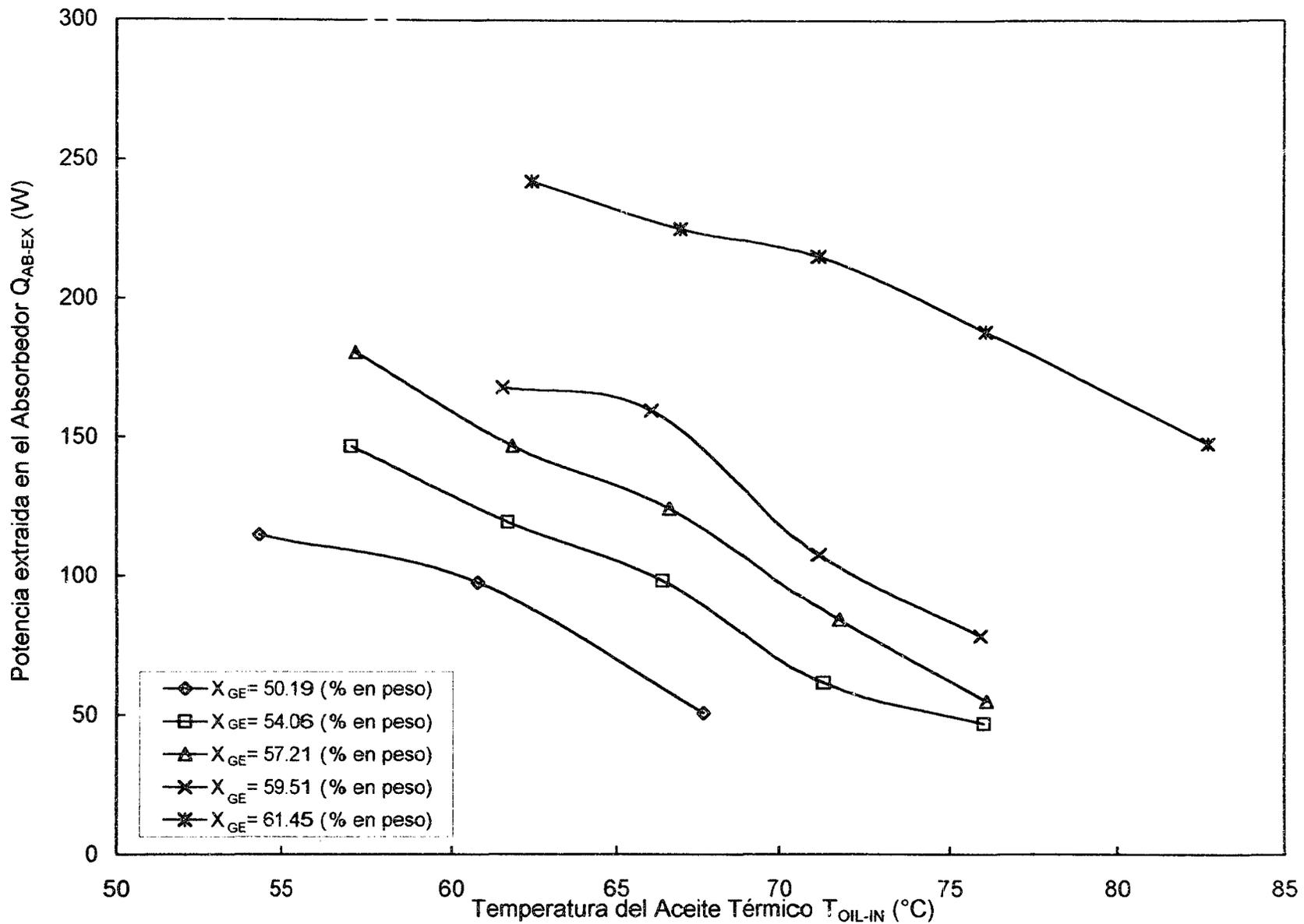


Figura 4.9 Potencia extraída en el Absorbedor en función de la Temperatura del Aceite Térmico para la mezcla Bromuro de Litio-Agua

## CAPITULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

Después de haber realizado todo el trabajo de investigación, así como la experimentación y el análisis de los resultados obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones.

Se ha propuesto un sistema de absorción de una etapa que trabaja con la mezcla Bromuro de Litio-Agua, para emplearse como una alternativa en el uso eficiente de la energía, sobre todo en los procesos productivos, donde se intenta disminuir el consumo de combustibles fósiles, así como la emisión de contaminantes al medio ambiente.

De acuerdo con los resultados obtenidos, se recomienda el empleo de este transformador de calor en industrias donde existan corrientes de proceso con cargas térmicas a temperaturas superiores a los 80 °C, para trabajar con la mezcla Bromuro de Litio-Agua a concentraciones hasta del 54 % en peso en el generador, con lo que se puede recuperar por lo menos un 16 % del calor de desecho y obtener un incremento máximo de temperatura de 24.9 °C. Así mismo, si se tuviesen temperaturas de alrededor de 100 °C para el suministro de energía en el generador y el evaporador, se recomienda trabajar a concentraciones mayores del orden del 62 % en peso en el generador y se podría recuperar hasta del 23 % del calor de desecho y obtener un incremento máximo de temperatura de 42 °C.

Existen muchos elementos del transformador que se degradan o se desgastan rápidamente debido a la corrosión ocasionada por la mezcla Bromuro de Litio-Agua, Estos elementos son por lo general aquellos accesorios como abrazaderas, conectores, y algunos otros que por considerarlos en ocasiones como de menor importancia no se eligen de la calidad que debieran tener, lo cual ocasiona paros constantes en el equipo debido a las fugas principalmente.

Es necesario continuar con la investigación para el diseño de componentes más eficientes, así como de mezclas de trabajo que permitan tener un incremento de temperatura mayor para lograr coeficientes de operación más cercanos a los teóricos (alrededor de 0.45).

Además, es importante el estudio de nuevas mezclas que permitan disminuir el grado de corrosión y reducir la temperatura requerida para la generación, ya que mucho del éxito que se logre en la implementación de transformadores de calor en las industrias que así lo requieran se deberá desde luego, a la capacidad de aprovechar calor residual en un amplio rango de temperaturas.

De acuerdo con las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 el incremento de temperatura crece considerablemente con el aumento de las concentraciones de la solución en el absorbedor y generador

respectivamente, y el crecimiento es menos significativo con el aumento de la temperatura del aceite.

El máximo incremento de temperatura obtenido fue de 44 °C a una concentración de la solución de 61.4 % en peso, cuando la temperatura de entrada del aceite térmico fue de 76.1 °C.

El mínimo incremento de temperatura que se registró durante la experimentación fue de 21.9 °C a una concentración de la solución en el generador de 49.9 % peso y a una temperatura de entrada del aceite de 54.3 °C.

De acuerdo con las figuras 4.4, 4.5, 4.6 y 4.7 el coeficiente de operación externo disminuye al aumentar las temperaturas del absorbedor, del aceite y de los incrementos de temperatura.

Los valores del coeficiente de operación externo variaron entre 0.06 y 0.24, obteniéndose los más elevados a las mayores concentraciones de la solución y a las menores temperaturas del aceite y del absorbedor.

La potencia extraída en el absorbedor ( $Q_{AB}$ ) aumenta, cuando la concentración de la solución es mayor, mientras que disminuye con el incremento de la temperatura del aceite.

Considero que los resultados obtenidos en este trabajo experimental son una buena referencia para trabajos futuros, ya que si bien se estuvo lejos de alcanzar los resultados teóricos, se demostró la capacidad de aprovechar calor a baja temperatura para su reutilización en algún proceso determinado a una temperatura mayor.

Por otra parte, con la experiencia obtenida y aquí reportada, se podrían desarrollar nuevos prototipos de mayor capacidad y con los cuales se puedan alcanzar mayores eficiencias.

### **5.3 RECOMENDACIONES**

Después de haber concluido la experimentación con el transformador por absorción de una etapa se hacen las siguientes recomendaciones para trabajos posteriores.

Es necesario hacer una limpieza general del equipo después de concluidas las corridas experimentales, para evitar la contaminación de la mezcla de trabajo, esto es importante sobre todo por que a temperaturas elevadas el material de fabricación de las mangueras y de algunas conexiones tienden a sufrir una degradación debido al ataque de la mezcla de trabajo y a las temperaturas que se manejan.

Podría experimentarse en el mismo transformador de calor la mezcla de trabajo Bromuro de Litio-Agua con un algunos inhibidores de corrosión para incrementar el periodo de vida del equipo y hacer más económico el costo de operación, alentando de este modo la implementación del equipo a nivel industrial.

Deben de buscarse los materiales más idóneos para la fabricación de los componentes del equipo, principalmente para aquellos que facilitan el intercambio de calor en las zonas más importantes desde el punto de vista del aprovechamiento en la recuperación de calor útil, por mencionar algunos podemos decir que el serpentín del absorbedor debe ser fabricado con un material especial que incremente la capacidad de recuperación de calor por parte del aceite térmico, sin que resulte afectado por la agresión de la mezcla de trabajo. Algunas mangueras deben ser cambiadas en periodos definidos para evitar la contaminación de la mezcla de trabajo que ciertamente disminuye la capacidad de absorción y con ello la eficiencia del equipo.

Es necesario determinar cada vez que se inicie un periodo de experimentación el flujo másico del aceite térmico así como su capacidad calorífica, ya que la degradación que sufre implica también que se pierda capacidad de intercambio disminuyendo la potencia extraída en el absorbedor, por lo que no se considera confiable una ecuación que sea aplicada para determinar el flujo másico en cualquier tiempo de experimentación.

Finalmente considero que se debe realizar un estudio económico para ver el tiempo de recuperación de capital y tener una idea clara de la viabilidad del uso de estos sistemas, teniendo en cuenta los costos actuales de la energía.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Abrahmsson A., Gidner K., y Jernqvist A., Design and experimental performance evaluation of an absorption heat transformer with self circulation. *Heat Recovery system & CHP*, **15**(2), 257-272, 1995.
2. Alefeld G. A., High temperature absorption heat pump as a topping process for power generation. *Energy*, **3**, 619-656, 1978.
3. Arh S. y Gaspersic B., Research on H<sub>2</sub>O/LiBr absorption heat pump/transformer cycle, Proc. XVIIIth Int. Congress of Refrigeration, August 10-17, Montreal, Quebec, Canadá, 1991.
4. Arun M.B. Maiyan M.P., Srinivasa S., Performance comparison of double effect parallel flow and series flow water lithium bromide absorption system. *Applied Thermal Engineering*, **13**(2), 213-225, 2001.
5. Best R. y Rivera W. Thermodynamic design data for absorption heat transformers, Part six. Operating on water/Carrol. *Heat Recovery Sysytems &CHP*, **14**(14), 427-436, 1994.
6. Bird R.B., Stewart W.E. y Lightfoot E.N., Fenómenos de transporte. Reverté, S.A., México, 1998.
7. Cardoso M.J. Estudio teórico y experimental de transformadores de calor por absorción operando con la mezcla Carrol-agua utilizados para el ahorro de energía, Tesis de maestría, CIE-UNAM, 1999.
8. Castellan Gilbert W., Físicoquímica, Addison-Wesley Iberoamericana., U.S.A., 1987.
9. Cerezo J., Modelación de un transformador de calor acoplado a una columna de destilación. Tesis de licenciatura, Instituto tecnológico de Zacatepec, 1999.
10. Ciambelli P. y Tufano V., Asimplified model for a water/sulphuric acid absorption heat transformer. *Heat and Technology*, **5**(1-2), 69-83, 1987 a.
11. Ciambelli P. y Tufano V., The upgrading of waste heat by means of water/sulphuric acid absorption heat transformer. *Heat Recovery Sysmen & CHP*, **7**(6), 517-524, 1987 b.
12. Cole Parmer, Catalogo de Cole-Parmer, Equipar, Cole-Parmer Instrument Company, 1999-2000.
13. Curie J. S. y Pritchard C.L., Energy recovery and plume reduction from an industrial apary drying unit an absorption heat transformer. *Heat Recovery Systems & CHP*, **14** (3), 239-248, 1994.
- 14 Chapman A.J., Heat transfer. Macmillan, U.S.A., 1967.
15. Davison W.F. y Erickson D.C., 500°F Absorption heat pump under development. Proc. The annual Industrial Energy Technology Conference, Houston Texas, U.S.A., June 17-19, pp.350-358, 1986.
16. Eisa M.A.R., Best R. y Holland F.A., Thermodynamic desing data for absorption heat transformers part I. Operating on water/lithium bromide. *Heat Recovery Systems & CHP*, **6**(5), 421-432, 1986.
17. Eisa M.A.R., Best R. y Holland F.A., Thermodynamic desing data for absorption heat transformers part II. Operating on water/ calcium chloride. *Heat Recovery Systems & CHP*, **6**(6), 443-450, 1986.
18. Foust A. S., Wenzel L. A., Clump C. W., Maus L. Y Andersen L.B., Principios de Operaciones Unitarias. C.E.C.S.A., México, 1997.
19. George J. y Murthy S., Experiments on a vapour absorption heat transformer, *International Journal Energy Research*, **16**(2), 107-119, 1993.

20. Herold K. E. y Radermacher R., Development of an absorption heat pump using an aqueous ternary hydroxide working fluid. *International Journal of Refrigeration*, **14**(3), 156-167, 1991.
21. Herold Keith, Radermacher R. y Klein Sanford, *Absorption chillers and Heat Pumps*, CRC Press, U.S.A., 1996.
22. Holmberg P. Systems studies and optimization of the SSHT cycle. Department of Heat and Power Technology, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 1988.
23. Holmberg P., Berntsson J.M, y Berntsson T., Technico/economic aspects on heat transformers. Proc. Of the Indo/British Workshop on Industrial Energy Conservation, Pune, India, 6, 1-6.16, 1991.
24. Hugh D. Young. *Fundamentos de Mecánica y calor*. McGraw-Hill, España, 1970.
25. Ishida M. y Ji J., Graphical exergy study on single stage absorption heat transformer, *applied thermal Engineering*, **19**, 1191-1996, 1990.
26. Iyoki S., Tanaka K., y Uemura T., Theoretical performance analysis of absorption heat transformer using alcohol as working medium. *Int. J. Of Refrigeration*, **17**(3), 180-190. 1994.
27. Iyoki S., y Uemura T., Performance characteristics of the water/lithium bromide/zincchloride/calcium bromide absorption refrigeration machine, absorption heat pump and absorption heat transformer. *Int. J. Refrigeration*, **13**, 191-196, 1990.
28. Jaroslov Wurm, Kinast J. A., Roose T. R., Staats W. R., *Stirling and Vuilleumier Heat Pumps*. McGraw-Hill, U.S.A., 1990.
29. Jernqvist A., Abrahamsson K. y Aly G., On the efficiencies of absorption heat transformer units LiBr-H<sub>2</sub>O. *Heat Recovery Systems & CHP*, **12**(4), 323-334, 1992.
30. Kriplani V.M, Srinivasa S. y Krishna., Performance Analysis of a vapor absorption heat transformer with different working fluid combinations. *Heat Recovery Systems*, **4**(3), 129-140, 1984.
31. Krom R. y Oostendorp P., Heat Transfer find success in the steel industry. *IEA HPC Newsletter*, Netherlands, **11**(1), 17-19, 1993.
32. Mashimo K., Overview of heat transformer in Japan. Proc. Of the IEA Heat Pump Conference, Chelsea, Michigan, U.S.A., pp. 271-285, 1987.
33. McMullan y Morgan, *Heat Pumps*, Adam Hilger Ltd. Bristol. U.S.A., 1981.
34. McNeely Lowell A. (1973) Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide. *ASHRAE Trans.* **85**(1) pp 413-434.
35. Nomura T. y Nishimura N., Thermal performance and evaluation of superheated steam drying system using solar/assisted absorption heat transformer. *Drying Technology*, **10**(3), 659-677, 1992.
36. O'Neal D. L., Herold K. E., Prasad B. G., Bittle R. Y Nutter D., *Heat pump and refrigeration systems design, analysis and applications - 1995*. The american society of Mechanical Engineers. U.S.A., 1995.
37. Patil K.R., Chaudhari S.K. y Katti, S.S., Thermodynamic desing data for absorption heat transformers part III. Operating on water/lithium iodide. *Heat Recovery System & CHP*, **11**(5), 361-369. 1991.
38. Reay D. A. Y Macmichael D. B. A., *Heat pumps*, Pergamon Press, U.S.A., 1988.
39. Resnick y Halliday, *Física*, C. E. C. S. A., México, 1976.
40. Rivera W., Best R., Hernandez J., Heard C.L. y Holland F.A., Thermodynamic study of advanced absorption heat transformer-I. Single and two stage configurations with heat exchangers. *Heat Recovery Systems & CHP*, **14**(2), 173-183, 1994.
41. Rivera W., *Estudio teórico de transformadores de calor por absorción operando con la mezcla Bromuro de Litio-Agua*. Tesis de maestria, CIE-UNAM, 1991.

42. Rivera W., Romero J. R., Best R. y Heard C. L., Experimental evaluation of a single-stage heat transformer operating with the Water-Carrol mixture. *Energy*, **24**, 317-326, 1999.
43. Romero J., Rivera W., Gracia J. y Best R., Theoretical comparison of performance of an absorption heat pump system for cooling and heating operating with an aqueous ternary hydroxide and water/lithium bromide, *Applied energy*, 2001.
44. Romero R. J., Estudio de las mezclas Bromuro de Litio-Agua y Carrol-Agua en transformadores térmicos por absorción de una etapa. Tesis de maestría, UNAM, CIE-UNAM, 1996.
45. Romero R. J., Estudios teóricos y experimentales de transformadores térmicos por absorción y diseño optimado de absorbedores de película descendente. Tesis de doctorado, CIE-UNAM, 2001.
46. Rueda Cornejo M. E., An experimental study of waste heat driven heat pump systems for cooling or heating. Tesis de maestría, University of Salford, Salford, UK, 1997.
47. Santoyo S., Siqueiros J., Heard C. L., Santoyo E. y Holland F.A., An experimental integrated absorption heat pump effluent purification system. Part I: Operating on water/lithium bromide solutions. *Applied energy*, **8**(3), 462-475, 1999.
48. Saravanan R. y Maiya M. P., Thermodynamic comparison of water based working fluid combinations for a vapour absorption refrigeration system. *Heat Recovery Systems & CHP*, **12**(2), 553-568, 1998.
49. Smith J.M. y Van Ness H.C., Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química. McGraw-Hill, México, 1988.
50. Stephan K., y Seher D. Heat transformer cycles-I. One and two stage processes, *Heat Recovery Systems*, **4**(5), 365-369, 1984a.
51. Stephan K., y Seher D. Heat transformer Cycles-II. Thermodynamic analysis and optimization of a single stage absorption heat transformer. *Heat Recovery Systems*, **4**(5), 371-375, 1984b.
52. Talbi M. y Agnew B., Exergy analysis an absorption refrigerator using lithium bromide and water as the working fluids. *Heat Recovery Systems & CHP*, **16**(2), 619-630, 2000.
53. Tyagi, K.P. Working fluids for heat transformers. *Heat Recovery Systems & CHP*, **14**(3), 265-272, 1994.
54. Yin J., Lin Shi, Ming-Shan Zhu y Li-zhong Han, Performance analysis of an absorption heat transformer with different working fluid combinations. *Applied Energy*, **11**, 281-292, 2000.
55. Yunus A. Cengel y Michael A. Boles, Termodinámica. McGraw-Hill, México, 2000.
56. Zhuo C.Z y Machielsen C.H.M., Thermodynamic assessment of an absorption heat transformer with TFE/Pir as the working pair. *Heat Recovery Systems & CHP* **14**(3), 265-272, 1994.

## NOMENCLATURA

COP	= Coeficiente de operación, (adimensional).
COP <sub>BC</sub>	= Coeficiente de operación de la bomba de calor, (adimensional).
COP <sub>EXI</sub>	= Coeficiente de operación externo, (adimensional).
COP <sub>HT</sub>	= Coeficiente de operación del transformador térmico, (adimensional).
C <sub>P</sub> <sub>ACEITE</sub>	= Capacidad calorífica del aceite térmico, (kJ/kg°C).
C <sub>P</sub> <sub>AGUA</sub>	= Capacidad calorífica del agua, (kJ/kg°C).
I <sub>EV</sub>	= Corriente eléctrica del evaporador, (A).
I <sub>GE</sub>	= Corriente eléctrica del generador, (A).
M <sub>AB-GE</sub>	= Flujo másico de la corriente que va del absorbedor al generador, (kg/s).
M <sub>EV</sub>	= Flujo másico del fluido de trabajo, (kg/s).
M <sub>GE-AB</sub>	= Flujo másico de la corriente que va del generador al absorbedor, (kg/s).
M <sub>OIL</sub>	= Flujo másico del aceite térmico, (kg/s).
M <sub>WA</sub>	= Flujo másico del agua de enfriamiento, (kg/s).
M <sub>WT</sub>	= Flujo másico del fluido de trabajo, (kg/s).
P	= Presión, (bar).
P <sub>CO</sub>	= Presión en el condensador, (bar).
P <sub>EV</sub>	= Presión en el evaporador, (bar).
Q <sub>AB</sub>	= Carga térmica en el absorbedor, (W).
Q <sub>AB-EX</sub>	= Carga térmica externa del absorbedor, (W).
Q <sub>CO</sub>	= Carga térmica en el condensador, (W).
Q <sub>CO-EX</sub>	= Carga térmica externa del condensador, (W).
Q <sub>EV</sub>	= Carga térmica en el evaporador, (W).
Q <sub>EV-EX</sub>	= Carga térmica externa del evaporador, (W).
Q <sub>EC</sub>	= Carga térmica en el economizador, (W).
Q <sub>GE</sub>	= Carga térmica en el generador, (W).
Q <sub>GE-EX</sub>	= Carga térmica externa del generador, (W).
Q <sub>H</sub>	= Carga térmica alta, (W).
Q <sub>L</sub>	= Carga térmica baja, (W).
RF	= Relación de flujo, (adimensional).
T <sub>AB</sub>	= Temperatura del absorbedor, (°C).
T <sub>BA</sub>	= Temperatura del baño de aceite, (°C).
T <sub>CO</sub>	= Temperatura del condensador, (°C).
T <sub>EV</sub>	= Temperatura del evaporador, (°C).
T <sub>GE</sub>	= Temperatura del generador, (°C).
T <sub>H</sub>	= Temperatura alta, (°C).
T <sub>L</sub>	= Temperatura baja, (°C).
T <sub>OIL-I</sub>	= Temperatura del aceite térmico a la entrada del absorbedor, (°C).
T <sub>OIL-O</sub>	= Temperatura del aceite térmico a la salida del absorbedor, (°C).
T <sub>WA-I</sub>	= Temperatura del agua a la entrada del condensador, (°C).
T <sub>WA-O</sub>	= Temperatura del agua a la salida del condensador, (°C).
ΔT	= T <sub>AB</sub> - T <sub>EV</sub> , (°C).
ΔT <sub>OIL</sub>	= T <sub>OIL-O</sub> - T <sub>OIL-I</sub> , (°C).
V <sub>EV</sub>	= Voltaje del evaporador, (V).

$V_{G1}$	= Voltaje del generador, (V).
$W$	= Trabajo, (W).
$W_{Bombas}$	= Trabajo total de las bombas, (W).
$W_{neto-en}$	= Trabajo total a la entrada del sistema, (W).
$W_{neto-sal}$	= Trabajo neto a la salida del sistema, (W).
$X_{AB}$	= Concentración de la solución en el absorbedor, (% en peso).
$X_{G1}$	= Concentración de la solución en el generador, (% en peso).
$X_{LiBr-H_2O}$	= Concentración de la solución Bromuro de Litio-Agua (% en peso).