



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES



SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL
COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO DE
TECNOLOGÍA SUSTENTABLE PARA RECUPERACIÓN DE
CALOR RESIDUAL

T E S I S

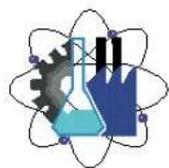
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
**MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y
TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES**

PRESENTA

I.A. SUSET VÁZQUEZ AVELEDO

ASESOR: DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ

CO-ASESORA: DRA. LAURA IRENE MORALES GOMEZ



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

CUERNAVACA, MORELOS

AGOSTO, 2020



Este proyecto se realizó en las instalaciones de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, bajo la asesoría del Dr. Moisés Montiel González y la co-asesoría de la Dra. Laura Irene Morales Gómez, con el apoyo financiero del Programa de Becas de Posgrado del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).



COMITÉ REVISOR:

Asesor: Dr. Moisés Montiel González

Co-asesor: Dra. Laura Irene Morales Gómez

Dr. Rosenberg Javier Romero Domínguez

Dra. Josefina Vergara Sánchez

Dr. Roberto Best y Brown

VOTOS APROBATORIOS



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA
Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGC certificado en la norma ISO 9001:2015

Secretaría de Investigación y Posgrado

FORMATO T-2
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 31 de agosto de 2020.

Dr. Rosenberg Javier Romero Domínguez
Dra. Josefina Vergara Sánchez
Dr. Moisés Montiel González
Dra. Laura Irene Morales Gómez
Dr. Roberto Best y Brown
PROFESORES DE LA FCQeI
P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta el IA. SUSET VÁZQUEZ AVELEDO titulada: SIMULACIÓN COMPUTACIONAL DEL COMPORTAMIENTO TERMODINÁMICO DE TECNOLOGÍA SUSTENTABLE PARA RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL, en el Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

ATENTAMENTE
Por una humanidad culta

DRA. ARELI RIZO AGUILAR
COORDINADORA DE LA MIATS

DICTAMEN

DRA. ARELI RIZO AGUILAR
COORDINADORA DE LA MIATS DE LA FCQeI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

DICTAMEN

NOMBRE	VOTO	FIRMA
Dr. Rosenberg Javier Romero Domínguez	APROBADO	
Dra. Josefina Vergara Sánchez	APROBADO	
Dr. Moisés Montiel González	APROBADO	
Dra. Laura Irene Morales Gómez	APROBADO	
Dr. Roberto Besty Brown	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas

VOTOS APROBATORIOS



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

ARELI RIZO AGUILAR | Fecha: 2020-06-31 21:57:58 | Firma: uREd3t7Ciboy2mp0qF0y32GC4F3DMoH405YExpDQGbA43FgCheneePLNFJGPbweNH40a7PzdMj5VvdYqL89nSLD7A T2b85Mhhq7WYDhNcFm+3ka-CyaflyV0agKgeaRH5 YajlvzCLVn7uRz-uNF2aWgPFPyPLK4dePm6MFpmo4En lUuz2e05h | p0QnL5qM4VPeOrE3AhwaGaf0V6d5o0rhduh30gZ226dW Fe+J9lB5qT6KCO7ePaPeIMRj0geAvPhK QRcDRuzlEN80gCGoG88YgP5AM5qFVuv8TTRhdqzPTSTHhaQCTyEUA-08C9v6A-=-

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



PPFaGm

https://firma.uaem.mx/noRepudia/mrtqG27hcaUR0V/xalHgAq5h0q_A5AY

VOTOS APROBATORIOS



Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

JOSEFINA VERGARA SANCHEZ | Fecha: 2020-09-01 10:25:31 | Firmante
W5KcLN+Q3uVnE5aQaNT+WEZ2P3AgpuzN3mC+EH3E3+2Nyo0CqahaTuzV5B+QW0Texpu0Z4GTwz3me4dY3mK1c3FhU3bYKX1E85GdWbTSUAaF+Q0zwW6QrQzR2u/W
ZBzYTLg7D0bXqabaY5WRKqT00H+2EH0T7WqzEYKqJRO+uQ0eNbfAEY78d5BjU3aMv6F7H5F+e5aQgB7P+3gPT1hw+ynE2gQv07DpOCzQYajN3mpa6+VPMvdb8LgXAH
JzPzduY7YdnGuETJ34+AAAvanY7f3a3awwvG8zScyCa+YsR2u3k4C7Nw44QAw...

ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMINGUEZ | Fecha: 2020-09-01 11:08:41 | Firmante
Vyl7wadsr2nuZ3oCFFYDae7waw85Y7mg4yb0v0500k5DvRUSUKUEdntwN3e7DUX3VyhigPozgWH+gDm1d0mSmPZRN3a3a6aF3a0K2wT3v6gJVP7B7Q3B1gMe7AUC7dmgc5RPF
NwZq8h3aCB3b7v+V0K0YVQ78DhngmYMH3ac0XCZcRbnKutrayw9M8m5COC0m3aW6Cup8F7h3whtZC3Na00RRp5A8y350wuaFwT3p5ZBL3aK4RpaAnp00j3D1Ap83
ggJ3hV4gQ7QM+D+R8U3vP7LUCKEpZ4mzZ3mJG3HKO+avm3w63gOSJ2A9m3EA...

MOISES MONTEL GONZALEZ | Fecha: 2020-09-01 12:04:17 | Firmante
Pg7kEYyRyaf3a4B41T3eOLg8R1Cw30uz38aYm3aAwPoYyYoaF7e7M2uL0zqDDENHK29YTeV7hwb350H3g3Szh3wQ7TBT+D65Tu5y0TaeqY8FHEUS282wW3Q7P2+7Kqf
g+yF3zPw77nd3AD3b3mk39paw38+boj32Nag3uyw33HwL5q83Ta8e+7b7R7w7eG71DM8b3v52Vb73w7h31y328k3g3a34YmW340D3a33k3V3C0MM3a383g30HC+603R3
f3n3k3p3g3M3C3v37M3a3K3Z3u3+8F3UC3v3N3e3w3e327p3w3a3D3TL3UC3V3g3a3e3Y3M3w...

ROBERTO BEST Y BROWN | Fecha: 2020-09-02 19:10:36 | Firmante
OKe7AC7R3b3d3Fw3L3e3a3b3e3c3u3Dc377283q3E3GV3DM3F3SD3W3bw3T3+3r3O3d3w3y3p3R3w3N3v3L3J3Z3w3P3c3Y3E3H3y3M3v3E3A3a3W3C35366+Q3a3F3b3e3a3U3j+3d3F3v3D3a353C3
3p3n3E3z3J3T3G3w343D3g3d3K3X7y3n3R33a3L3b3A3e3T3Y3R3Q3X3a3H3D3e34343B3a3Q33v3M3w3L3Y3M3W3P3E3D3A3K3R3J3D3e373c3T3e3L3x+3Z3T3M3P31W3Z3W3K3Z3+3d3p3M3a313h383E3+3g3V3b3Q3
B3H3C353V353O3e363e3f3L3Z3+3e3X3M3V3K3F3a383R3S3R3Q3A3q3T3C3A3a3j353w3R3K3B3T3u3Z3w3C3g3D3R3Q3...

LAURA IRENE MORALES GOMEZ | Fecha: 2020-09-02 19:50:13 | Firmante
U+PS3Q3h+UBR3D3y149y3T7p3HC3+NB38363K3w3e3L3d3G3R3u3D3R3F+c3N3h3e3u3d3z3p+EE3D3a3S3p3M3y3N3+3Q3r3R3D3U+3R3e3D3K3R3Y3E3T3g+Z3e3Q3g3F3H3E3H3W3e3g3De3Y+3d3F3w3m3
L3c3m3k3K3D3e3C313y3d3a3L3y3e3F3DL3Q3T3p3VL3R3L3Y3Z3F3Z3X3C3V3A3B3N3e3a3j3g3K3G353E3Y3F3Z3e3V3D3m3A3U3Z3R3U3V353v3y3C33e3g353g3T3k3j3y3j3p3C3e3t3p313d3e3F3F3T3e3m3e3c3M353y3n3Q333d3
M3Q3D3e3N3+333v3C3d3E323g3+34383g3Z3V383Z343Q343e3a3F3D3e3R3z3423g3E3M3e3F3g3Z3m3M3X3V3Y3N3L3Q3...

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



333386

<https://informa.uaem.mx/inf/validador?4VVWJ3a25cyVhXKRp605hDg5VYm6x7>



Una universidad de excelencia

831 TORRE
3017-2020



DEDICATORIA

A mi hija y sobrinos como muestra que todo lo que se propongan con esfuerzo es posible.

A mi esposo por estar siempre a mi lado y ayudarme a cumplir mis metas.

A mi hermana querida la impulsora de mi vida.

A mis padres por su amor y apoyo incondicional.

A mi familia y amigos, por ser parte importante en mi vida.



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi tutor el Dr. Moisés Montiel por su apoyo desde mis inicios en esta travesía. Desde el inicio fue difícil mi llegada, pero si no hubiera a ciegas apostado por mí, este gran paso en mi vida fuera una utopía. Por esta razón muchas gracias y bendiciones.

Deseo dar un especial agradecimiento a la Dra. Laura Irene Morales Gómez, mi co-asesora, quien desde un inicio ha sido mi inspiración y mi guía a seguir pues es una profesional disciplinada, recta y seria en el trabajo, y al mismo tiempo es humana y entregada a sus alumnos. Muchas gracias por su tiempo, dedicación, enseñanza, paciencia y entrega. Sin Ud., este sueño no se hubiera logrado.

Especial agradecimiento al Dr. Rosenberg Javier Romero Domínguez quien siempre he admirado por su carrera y por ser un gran maestro y profesional. Además por siempre estar presente en cada paso de este proyecto y brindarme todo su apoyo. Mil gracias.

Agradezco al Dr. Roberto Best y Brown primeramente por conocerlo pues es una bella persona, y sobre todo por las recomendaciones para enriquecer este trabajo proveniente de todo ese caudal de conocimientos que posee.

A la Dra. Josefina Vergara Sánchez muchas gracias por su tiempo y por formar parte de este equipo de trabajo

Muchas gracias a toda mi familia y amigos que estuvieron y están presentes en vida y me ayudan a seguir adelante en mis proyectos y mis metas.



ÍNDICE

<i>INTRODUCCIÓN</i>	xviii
<i>CAPÍTULO I</i>	1
<i>1.1 INTRODUCCIÓN</i>	1
<i>1.2 SITUACIÓN ENERGÉTICA</i>	1
<i>1.2.1 Situación energética mundial</i>	1
<i>1.2.2 Situación energética México</i>	4
<i>1.3. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICOS</i>	8
<i>1.3.1 Estudios teóricos</i>	8
<i>1.3.2 Estudios experimentales</i>	9
<i>1.3.3 Aplicaciones</i>	10
<i>1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN</i>	16
<i>1.5 HIPÓTESIS</i>	16
<i>1.6 JUSTIFICACIÓN</i>	16
<i>1.7 OBJETIVOS</i>	17
<i>1.7.1 Objetivo General</i>	17
<i>1.7.2 Objetivos Específicos</i>	17
<i>1.8 ESTRUCTURA DE LA TESIS</i>	18
<i>CAPÍTULO II</i>	19
<i>2.1 INTRODUCCIÓN</i>	19
<i>2.2 RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL</i>	19
<i>2.3 BOMBA DE CALOR</i>	20
<i>2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE CALOR</i>	21
<i>2.4.1 Bombas de calor por compresión mecánica de vapor.</i>	21
<i>2.4.2 Bombas de calor por absorción.</i>	23
<i>2.5 TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN</i>	27
<i>2.5.1 Transformador térmico por absorción de una etapa.</i>	27
<i>2.5.2 Importancia del economizador en un TTA de una etapa.</i>	28
<i>2.6 PARÁMETROS IMPORTANTES DEL TTA.</i>	29



2.7 MEZCLAS DE TRABAJO.	30
2.7.1 Propiedades de las mezclas de trabajo.	31
2.7.1 Mezclas de trabajo más usadas.	31
CAPÍTULO III.	33
3.1 INTRODUCCIÓN.	33
3.2 MODELO MATEMÁTICO DE UN TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA.	33
3.2 SIMULADOR DE CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN TTA.	39
3.2.1 Descripción del software Matlab.	39
3.2.2 Descripción del simulador realizado en Matlab.	39
3.3 VALIDACIÓN DEL SIMULADOR.	42
3.3.1 Análisis del comportamiento del simulador realizado en MatLab.	42
3.3.2. Validación del simulador.	43
CAPÍTULO IV.	48
4.1 INTRODUCCIÓN.	48
4.2 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN TTA CUANDO HAY DIFERENCIA DE TEMPERATURA EN LA FUENTE RESIDUAL.	48
4.3 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA EFICIENCIA DEL ECONOMIZADOR EN EL TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN.	54
4.4 ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD DE LAS BOMBAS DE OPERACIÓN DENTRO DEL DISEÑO DEL TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN.	56
4.5 TEMPERATURAS DE OPERACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES.	59
4.6 INDUSTRIA TEXTIL: CASO DE ESTUDIO.	61
4.6.1 Industria textil.	61
4.6.2 Integración de un transformador térmico en la industria textil.	61
4.6.3 Caso de estudio: Integración de un TTA de simple etapa acoplado a la industria textil.	62
4.7 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CO ₂ AL MEDIO AMBIENTE DEL PROCESO DE TINTURA Y ACABADO DE UNA EMPRESA TEXTIL.	75
CAPÍTULO V.	80
CONCLUSIONES.	80
PERSPECTIVAS:	84



<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	85
<i>APÉNDICE A</i>	97
<i>A.1 Utilizando el software MatLab para obtener las propiedades termodinámicas del H₂O:</i>	97
<i>APÉNDICE B</i>	99
<i>B.1 Cálculo de la temperatura de saturación o concentración de la mezcla AGUA- Bromuro de Litio.</i>	99
<i>B.2 Cálculo de la entalpía de saturación para la mezcla AGUA- Bromuro de Litio.</i>	100
<i>APÉNDICE C</i>	102
<i>C.1 Cálculo de la concentración de la mezcla AGUA-Carrol.</i>	102
<i>C.2 Cálculo de la temperatura de solución para la mezcla agua-Carrol.</i>	102
<i>C.3 Cálculo de la entalpía de solución para la mezcla agua-Carrol.</i>	103



ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Consumo de energía primaria mundial por fuente de energía [Fuente: IEO, 2019].</i>	2
<i>Figura 1.2 Producción de Energía en México [Fuente: SENER, 2019].</i>	5
<i>Figura 1.3 Consumo energético del sector industrial año 2019 [Fuente: SENER, 2019].</i>	6
<i>Figura 1.4 Mapa de calor de México. Fuente: CONNUE (2020).</i>	7
<i>Figura 2.1 Esquema de una bomba de calor.</i>	21
<i>Figura 2.2 Esquema de una bomba de calor por compresión mecánica de vapor.</i>	22
<i>Figura 2.3 Esquema de una bomba de calor por absorción.</i>	24
<i>Figura 2.4 Diagrama del ciclo de un TTA dentro de las coordenadas de presión y temperatura.</i>	28
<i>Figura 3.1 Interfaz gráfica del simulador de un transformador térmico por absorción.</i>	40
<i>Figura 3.2 Algoritmo para calcular las condiciones de operación de un TTA de una etapa.</i>	41
<i>Figura 3.3 COP en función de la temperatura del absorbedor para la mezcla agua-bromuro de litio.</i>	45
<i>Figura 3.4 COP en función de la temperatura del absorbedor para la mezcla agua-Carrol.</i>	46
<i>Figura 3.5 COP en función del GTL para la mezcla agua-Carrol.</i>	47
<i>Figura 4.1 Niveles de temperatura en transformadores de calor de absorción a) Igual temperatura del generador y del evaporador, b) Diferentes temperaturas temperatura del generador y del evaporador</i>	49
<i>Figura 4.2 Comportamiento del COP_{carnot}, $COP_{entálpico}$ y RF en relación con la T_{AB}, para una temperatura de condensación de 30 °C tanto para la mezcla agua-Bromuro de litio como para la mezcla agua-Carrol.</i>	51
<i>Figura 4.3 Comportamiento del COP_{carnot}, $COP_{entálpico}$ y RF en relación con la temperatura del generador, para una temperatura de condensación de 30 °C y una temperatura de evaporación de 70 °C tanto para la mezcla agua-Bromuro de litio como para la mezcla agua-Carrol.</i>	53



<i>Figura 4.4 Representación del comportamiento de $COP_{entálpico}$ en función del GTL variando la eficiencia en el economizador para la mezcla agua-Carrol, para una $T_{co} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.5 Representación del comportamiento de $COP_{entálpico}$ en función del GTL variando la eficiencia en el economizador para la mezcla agua-Carrol, para una $T_{co} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 4.6 Comparación de coeficientes de operación entálpico y relaciones de flujo en función de la Temperatura del absorbedor para las mezcla agua-Bromuro de litio.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 4.7 Diagrama de la integración de un transformador térmico en la industria textil para el proceso de planchado.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.8 Comportamiento del $COP_{entálpico}$ respecto a la temperatura del absorbedor para la mezcla agua-Bromuro de Litio ($T_{EV} = T_{GE} = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$).....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 4.9 Comportamiento del $COP_{entálpico}$ respecto a la fuente suministrada y su riesgo de cristalización para la mezcla agua-Bromuro de Litio, $T_{co}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4.10 Comportamiento del $COP_{entálpico}$ respecto a la fuente suministrada y su riesgo de cristalización para la mezcla agua-Bromuro de Litio para una $T_{co}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 4.11 Comportamiento del $COP_{entálpico}$ respecto a la temperatura del absorbedor tanto para la solución agua-Bromuro de Litio como para la solución agua-Carrol, con una $T_{co}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.12 Comportamiento del $COP_{entálpico}$ respecto a la temperatura del absorbedor tanto para la solución agua-Bromuro de Litio como para la solución agua-Carrol, con una $T_{co}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$.</i>	<i>70</i>
<i>Figura B.1 Diagrama de temperatura, concentración y presión para la mezcla $H_2O/LiBr$. McNeely (1979).....</i>	<i>101</i>
<i>Figura C.1 Diagrama de temperatura, concentración y presión para para la mezcla $H_2O/Carrol$. Reimann y Biermann (1984).</i>	<i>104</i>



ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1 Uso de Combustibles en el sector industrial [Fuente: IEO, 2019].</i>	3
<i>Tabla 1.2 Resumen de TTA para aplicaciones industriales.</i>	15
<i>Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de la bomba de calor por absorción respecto a la bomba de calor por compresión mecánica.</i>	26
<i>Tabla 3.1 Comparación de las principales características de los tres artículos analizados.</i>	33
<i>Tabla 3.2 Comparación de resultados estadísticos de la validación.</i>	47
<i>Tabla 4.1 Sensibilidad de las bombas en el diseño de un TTA.</i>	59
<i>Tabla 4.2 Principales sectores industriales y sus áreas de aplicación donde se requiere calor de proceso a baja temperatura, clasificados según la etapa del proceso y el rango de temperatura.</i>	60
<i>Tabla 4.3 Procesos dentro la industria textil.</i>	62
<i>Tabla 4.4 Procesos y maquinarias utilizados en la industria textil y que se pueden integrar a un TTA.</i>	71
<i>Tabla 4.5 Resumen de la cantidad calor recuperado acuerdo a las condiciones de operación para ambas mezclas de trabajo.</i>	74
<i>Tabla 4.6 Emisiones de CO₂equivalentes emitidas al año referente a los diferentes combustibles Utilizados.</i>	79
<i>Tabla A.1 . Funciones válidas de temperatura.</i>	97
<i>Tabla A.2 Funciones válidas de presión.</i>	98
<i>Tabla A.3 Funciones válidas para entalpía.</i>	98
<i>Tabla B.1 Valores de los coeficientes para el cálculo de la temperatura o concentración de la solución.</i>	99
<i>Tabla B.2 Valores de los coeficientes para el cálculo de la entalpía de saturación de la solución.</i>	100



NOMENCLATURAS

Q	Flujo de calor o Potencia (kW)
P	Presión (mmHg)
T	Temperatura (°C)
W	Trabajo hecho por el compresor (kW)
H	Entalpía por unidad de masa (kJ/kg)
EF	Eficiencia del economizador
M	Flujo másico (kg/s)
RF	Relación de flujo
X	Concentración (% peso)
COP	Coficiente de operación (adimensional)
GTL	Incremento de temperatura (°C)
HE	Economizador.

Subíndices

CO	Condensador
EV	Evaporador
AB	Absorbedor
GE	Generador



RESUMEN

En la actualidad, los recursos naturales son explotados diariamente en el mundo para satisfacer la demanda energética de los seres humanos. Así mismo, grandes cantidades de calor residual a baja temperatura son generados por el sector industrial en diferentes procesos de producción. El calor residual puede ser recuperado y reincorporado al proceso industrial, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuir el consumo de combustibles fósiles y reutilizar energía. Por tal motivo, es necesario implementar tecnologías sustentables para recuperar energía útil que hoy en día se desecha al medio ambiente. Los Transformadores Térmicos por Absorción (TTA) son un tipo de bomba de calor por absorción, cuya función es aumentar la temperatura de fuentes de calor de baja temperatura a niveles más útiles. Con este sistema se puede recuperar efectivamente hasta un 50% del calor de desecho además de que pueden ser alimentados por fuentes renovables de energía.

El presente trabajo tiene como objetivo principal realizar un estudio teórico de la viabilidad y factibilidad técnica de un sistema de recuperación de calor residual para implementarlo en un proceso de la industria textil, mediante el desarrollo de un código computacional en el software MatLab que simula las condiciones de operación de un TTA. Para lograr este objetivo, se presenta un análisis de la situación energética mundial, así como el estado del arte sobre trabajos teóricos, experimentales y aplicaciones de Transformadores Térmicos por Absorción. También se presentan los fundamentos teóricos de bombas de calor y del TTA, así como las mezclas de trabajo más usadas en su operación.

Se describe el modelo matemático basado en los balances de masa y de energía del TTA de una etapa para simular las posibles condiciones de operación del mismo, trabajando con las mezclas agua-bromuro de litio y agua-Carrol. Para ello, se desarrolló un simulador computacional en el software MatLab, el cual fue validado con datos experimentales de tres artículos publicados en la literatura. También se analizan tres efectos presentes en el Transformador Térmico por Absorción que pueden influir en su desempeño. Finalmente, se presenta un caso de estudio, en el que propone al Transformador acoplado a un proceso dentro de la industria textil mostrando la cantidad de energía recuperada, así como los niveles térmicos que se pueden alcanzar utilizando dos soluciones de trabajo. Los resultados obtenidos muestran la viabilidad y factibilidad del uso de esta tecnología para la recuperación de calor industrial y el ahorro de energía primaria en el proceso textil en sus diferentes etapas.



ABSTRACT

At present, natural resources are exploited daily in the world, to satisfy the energy demand by human beings. Likewise, large amounts of residual heat at low temperatures are generated by the industrial sector in different production processes. The residual heat can be recovered and reincorporated to the industrial process, in order to reduce the emissions of greenhouse gases, decrease the consumption of fossil fuels and reuse energy. For this reason, it is necessary to implement sustainable technologies to recover useful energy that nowadays is wasted toward environment. Absorption Thermal Transformers (TTA) are a type of absorption heat pump whose function is to increase the temperature of low-temperature heat sources to more useful levels. With this system, up to 50% of waste heat can be recovered effectively, in addition to being supplied by renewable energy sources.

The main objective of this work is to carry out a theoretical study of the viability and technical feasibility of a residual heat recovery system to be implemented in a process in the textile industry, through the development of a computational code in MatLab software that simulates the conditions of operation of a TTA. To achieve this objective, an analysis of the world energy situation is presented, as well as the state of the art on theoretical, experimental works and applications of absorption thermal transformers. The theoretical foundations of heat pumps and TTA are also presented, as well as the most used working mixtures in their operation.

The mathematical model based on the mass and energy balances of the single-stage TTA is described to simulate the possible operating conditions of the same, working with the water-lithium bromide and water-Carrol mixtures. For this, a computational simulator was developed in MatLab software, which was validated with experimental data from three papers published in the literature. Three effects present in the absorption thermal transformer that can influence its performance are also analyzed. Finally, a case study is presented, in which it proposes the transformer coupled to a process within the textile industry, showing the amount of energy recovered, as well as the thermal levels that can be achieved using two working solutions. The results obtained show the viability and feasibility of using this technology for industrial heat recovery and primary energy saving in the textile process in its different stages.



INTRODUCCIÓN

La innovación de tecnologías sustentables para recuperar calor residual es de gran importancia en la actualidad, porque representa una fuente de aprovechamiento de la energía producida y desaprovechada en la industria. En el marco actual, donde la demanda de energía a nivel mundial se ha incrementado notablemente, se hace necesario recuperar el calor de desecho para evitar la emisión de gases de efecto invernadero al medio ambiente y contribuir con ello al ahorro energético.

Dentro de los equipos utilizados para la recuperación de calor se encuentra el Transformador Térmico por Absorción (TTA), el cual es un tipo de bomba de calor que recupera el calor de desecho de algún proceso en la industria para reutilizarlo o bien hacer uso de él en algún proceso secundario, como la purificación de agua o el deshidratado de frutas.

En el presente proyecto se desarrollará un modelo teórico de un Transformador Térmico por Absorción para recuperar calor de desecho en la industria. Para ello se definirá la configuración de los componentes principales, así como la solución de trabajo, el modelo termodinámico se programará en Matlab para determinar las condiciones de operación del Transformador Térmico por Absorción, luego se hará una verificación del modelo termodinámico, se simularán las condiciones de operación con el TTA acoplado a algún proceso industrial y por último se realizará el análisis de los resultados.



CAPÍTULO I.

ANTECEDENTES.

1.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se muestra un panorama general de la situación energética mundial y de México. Se presenta al Transformador Térmico por Absorción como una alternativa viable de ahorro energético, así como para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero al medio ambiente. También se realiza una revisión bibliográfica exhaustiva de la literatura publicada sobre este tópico de investigación. Posteriormente, se plantea el problema a resolver, la justificación, la hipótesis y finalmente se presentan el objetivo general, los objetivos específicos y la estructura general de la tesis.

1.2 SITUACIÓN ENERGÉTICA

1.2.1 Situación energética mundial

En la actualidad, el consumo de energía juega un papel crucial en el desarrollo de las actividades cotidianas de los seres humanos. Este hecho, basado principalmente en la utilización de energía proveniente de recursos fósiles (carbón, petróleo, gas natural, entre otros). El uso de estas fuentes energéticas desencadena grandes problemas ambientales como las emisiones de gases de efecto invernadero, principales responsables del cambio climático.

El uso continuo de combustibles fósiles propicia la contaminación en los diferentes sectores como el industrial, de transporte, entre otros. En general, el sector industrial es el de mayor demanda energética (IEO, 2020), generando elevadas cantidades de calor residual y propiciando la contaminación térmica. La recuperación de este calor de desecho puede ser reutilizada para otros procesos en la industria y esto se traduce en un gran ahorro de energía.

Según IEO (2020), el uso de energías renovables y nuclear incrementará como promedio anual en un 3% y 1% respectivamente entre los años 2018 y 2050, mientras que los combustibles fósiles como el gas



natural y carbón aumentarán anualmente en 1.9% y 0.6% hasta el 2050. La Figura 1.1 muestra un histórico del consumo de energía primaria mundial por fuente de energía, así como la proyección futura esperada.

A nivel mundial los sectores de mayor empleo de combustibles corresponden al industrial y al de transporte, se proyecta un aumento del consumo mundial de energía en el sector industrial en un promedio de 1.2% por año, como muestra la Tabla 1.1. Con respecto a las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera referentes a la utilización de combustibles se plantea que el carbón es el de mayor porcentaje actualmente.

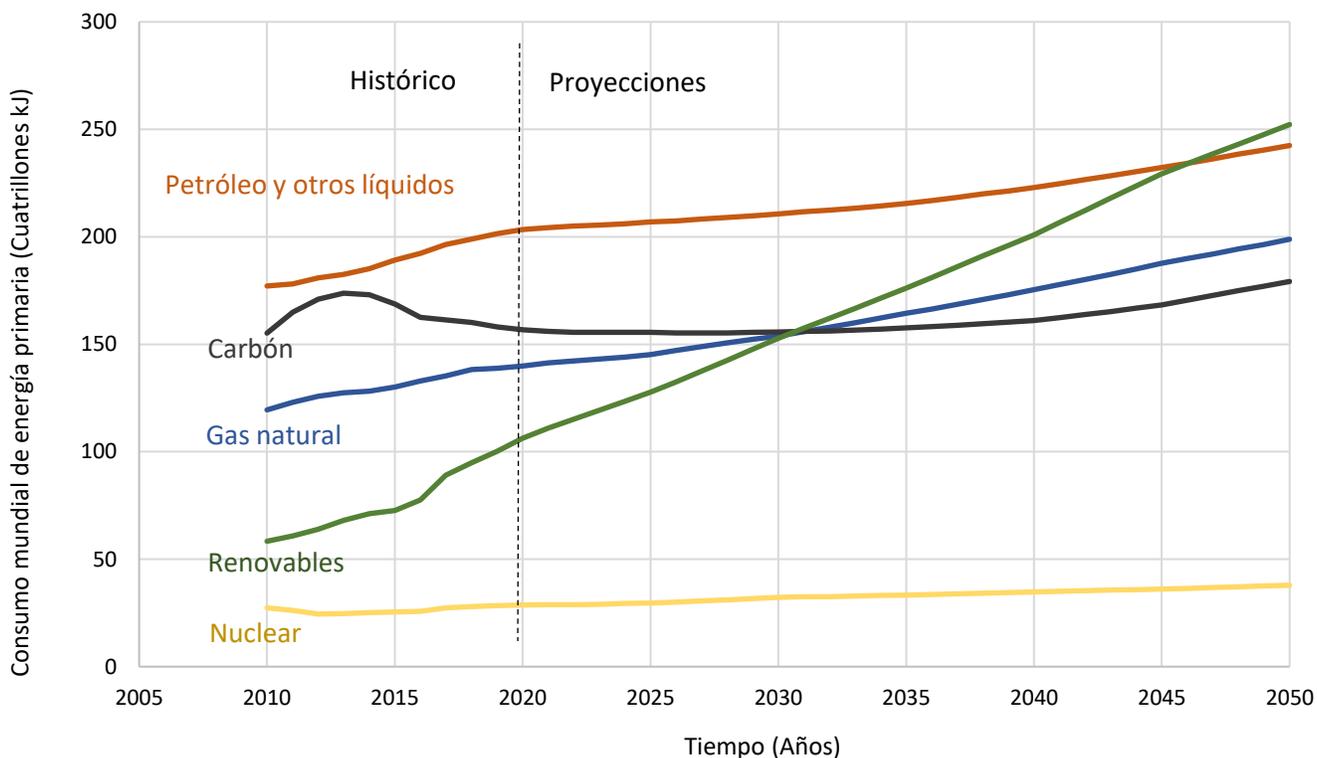


Figura 1.1 Consumo de energía primaria mundial por fuente de energía [Fuente: IEO, 2019].



Tabla 1.1 Uso de Combustibles en el sector industrial [Fuente: IEO, 2019].

Fuentes/Años	2012	2020	2030	2040	Promedio anual
Unidades	(Cuatrillones kJ)	(Cuatrillones kJ)	(Cuatrillones kJ)	(Cuatrillones kJ)	(%)
Renovables	17.4	18.2	21.3	25.1	1.3
Líquidos	66.5	72.2	80.6	88.6	1.0
Gas natural	50.7	56.2	68.0	80.4	1.7
Carbón	55.7	62.0	66.0	68.7	0.8
Electricidad	31.9	37.2	42.2	46.3	1.3
Total mundial	222.3	245.8	278.0	309.1	1.2

Situación energética mundial producto del COVID -19

Según El Instituto Nacional de Salud Pública (INSP) los coronavirus son una extensa familia de virus que pueden causar enfermedades tanto en animales como en humanos. El coronavirus que se ha descubierto más recientemente (2019-2020) causa la enfermedad por coronavirus denominada COVID-19.

La pandemia provocada por el COVID-19 es sobre todo una crisis de salud global, la cual ha causado alrededor de 10,117,687 casos confirmados incluyendo 502,278 muertes en todo el mundo. Como consecuencia de los esfuerzos por frenar la propagación del virus, se ha producido una crisis importante en la economía de todos los países, así como un impacto en el uso y generación de la energía y las emisiones de CO₂ al ambiente.

Según los datos reportados por IEO (2020), la demanda mundial de energía en el primer trimestre de 2020 disminuyó un 3,8%. En el caso del carbón el consumo disminuyó casi un 8% en comparación con el primer trimestre de 2019. El petróleo también se ha visto afectado, con una caída de casi el 5% en el primer trimestre, principalmente por la reducción de la movilidad y la aviación. El impacto del virus en la demanda de gas fue alrededor del 2% y la de electricidad se ha reducido en un 20% pues los aumentos de la demanda residencial se ven compensados por las reducciones en las operaciones comerciales e industriales. Por último, la única fuente que registró un crecimiento fueron las energías renovables



De acuerdo, con los informes publicados por IEO (2020), las proyecciones futuras en la demanda energética y las emisiones de CO₂ al ambiente son inciertas y dependen del comportamiento de la pandemia acompañado de la recuperación económica mundial.

Teniendo en cuenta este escenario el IEO (2020) proyecta durante todo el año que la demanda de petróleo podría caer en promedio un 9%, en gran parte porque la demanda de electricidad será casi un 5% menor en el transcurso del año. Se espera que las demandas de gas y de energía nuclear podrían caer mucho más durante todo el año que en el primer trimestre. Para la demanda de energías renovables se proyecta un aumento durante el año.

Para las emisiones globales de CO₂ se espera que disminuyan en un 8% durante este año, sin embargo, el repunte de las emisiones podría ser mayor que la disminución, sino se toman las medidas necesarias.

1.2.2 Situación energética México

México destaca a nivel mundial por ser uno de los países con las metas más ambiciosas en materia de generación mediante fuentes no fósiles. Siguiendo el ejemplo de Alemania, país que en la actualidad es líder en el uso y aplicación de las energías renovables, su producción de energía verde alcanza el 31.7% de la energía total generada (Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), 2007).

La SENER (2019), expone que la relación entre la producción y el consumo nacional de energía fue de 0.7, lo que significa que se produjo 29.8% menos energía de la que se puso a disposición para las diversas actividades de consumo nacional. En el año 2018, el consumo de energía per cápita disminuyó en 1.1% en relación con el 2017. El promedio de consumo por habitante fue de 74.05 GJ durante todo el año.

Con respecto a la producción de energía primaria se obtuvo un total de 6484.842 PJ en el año 2018, disminuyendo en un 7.7% respecto al año 2017. La reducción de la producción de petróleo es el principal elemento que define el comportamiento de la producción de energía. Los hidrocarburos contribuyeron el 82.87% a la producción de energía primaria, 9.53% menor en relación al año 2017. La producción de fuentes no fósiles de energía primaria se incrementó en 1.49% con respecto al 2017. (Figura 1.2).

De acuerdo con los datos reportados en la SENER (2019), durante el año 2018 el consumo de energía de los diferentes sectores se redujo en 1.48% con respecto al año anterior. La industria es el sector de mayor consumo energético del país después del sector de transporte, logrando alcanzar hasta un 31.8% del consumo total de energía en el año 2018, aunque mostró una disminución de 10.52% en comparación con el año anterior.

Dentro del sector industrial las industrias de mayor consumo energético son: la petroquímica, química, siderúrgica, cemento, minera y otras ramas en general. La Figura 1.3 muestra el porcentaje de las diferentes ramas industriales dentro de este sector durante el año 2018.

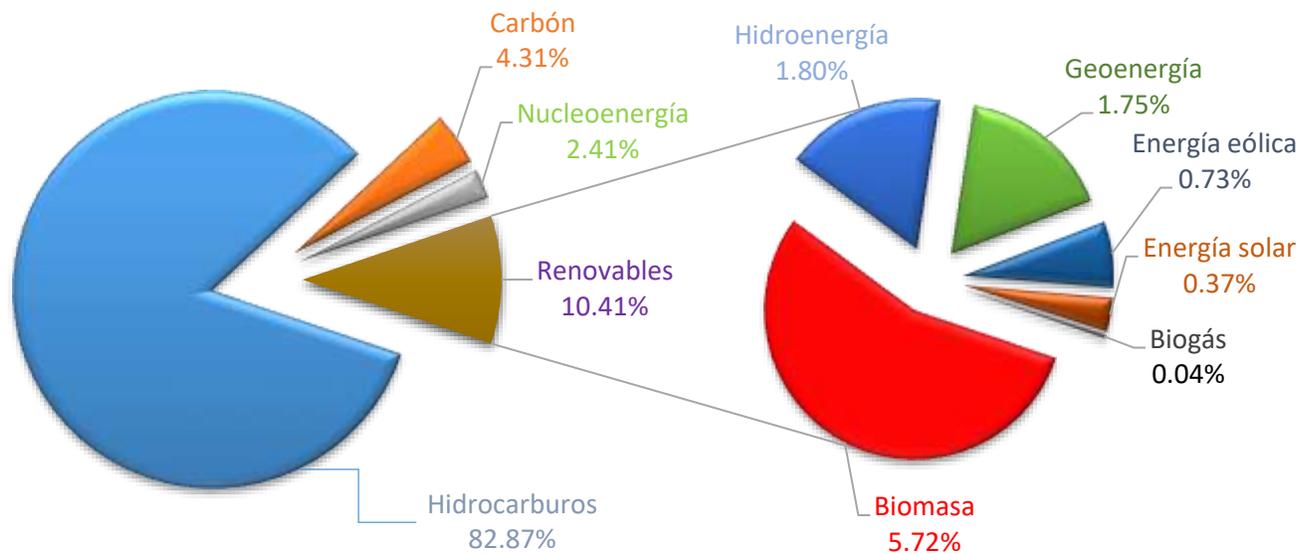


Figura 1.2 Producción de Energía en México [Fuente: SENER, 2019].

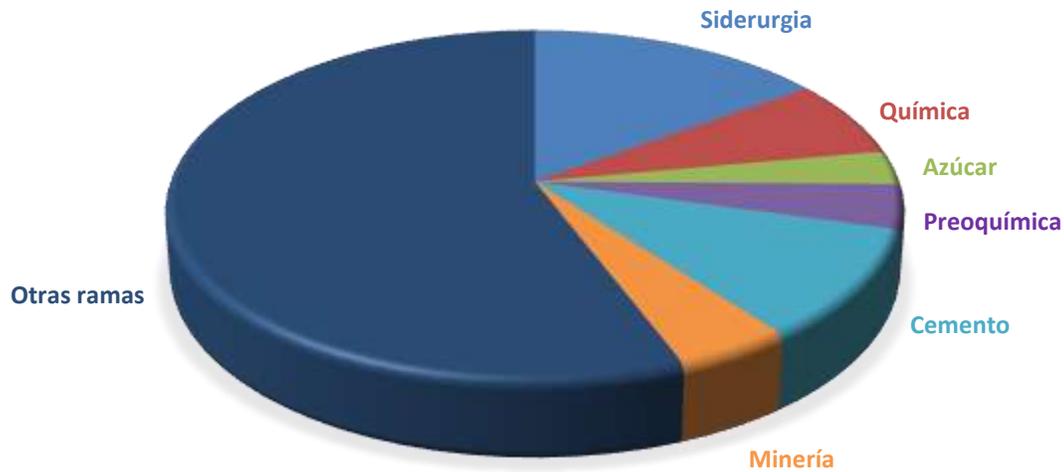


Figura 1.3 Consumo energético del sector industrial año 2019 [Fuente: SENER, 2019].

Situación energética nacional producto del COVID -19

Como se mencionó anteriormente a nivel mundial los daños de la pandemia COVID – 19 no sólo se encuentran en el ámbito de la salud, sino que sus nefastos efectos se han ampliado a otras esferas como son la: económica, política y social. México como todos los países, también ha sufrido esta problemática y las proyecciones futuras dependen en gran medida del comportamiento del virus y de la recuperación de la economía.

Uno de los principales impactos del virus en la economía nacional se ha producido en el sector de los hidrocarburos por su fuerte caída en el precio, producto de la baja en el importe de los combustibles; como la gasolina regular, Premium y el diésel, aparte del gas natural.

En el sector industrial de acuerdo con el INEGI (2020), como consecuencia de la pandemia, se han producido pérdidas de producción minera, así como la industria automotriz se ha afectado con una disminución de un 94% en su producción. Además, la industria de la construcción se ha visto gravemente

en crisis con más de 1000 empresas cerradas, en la industria aeronáutica se espera una caída del 30% del valor de su producción, así como la industria del calzado y textil con una caída del 80% de sus ventas.

La Figura 1.4 muestra el mapa de calor de México donde se puede apreciar según la leyenda, los distintos espacios geográficos que presentan mayor demanda energética. Destacándose diferentes estados como: Nueva León (Monterrey), San Luis Potosí, Ciudad de México, Guadalajara y Guanajuato, de mayor demanda energética de acuerdo con la actividad industrial existente en estas regiones del país.

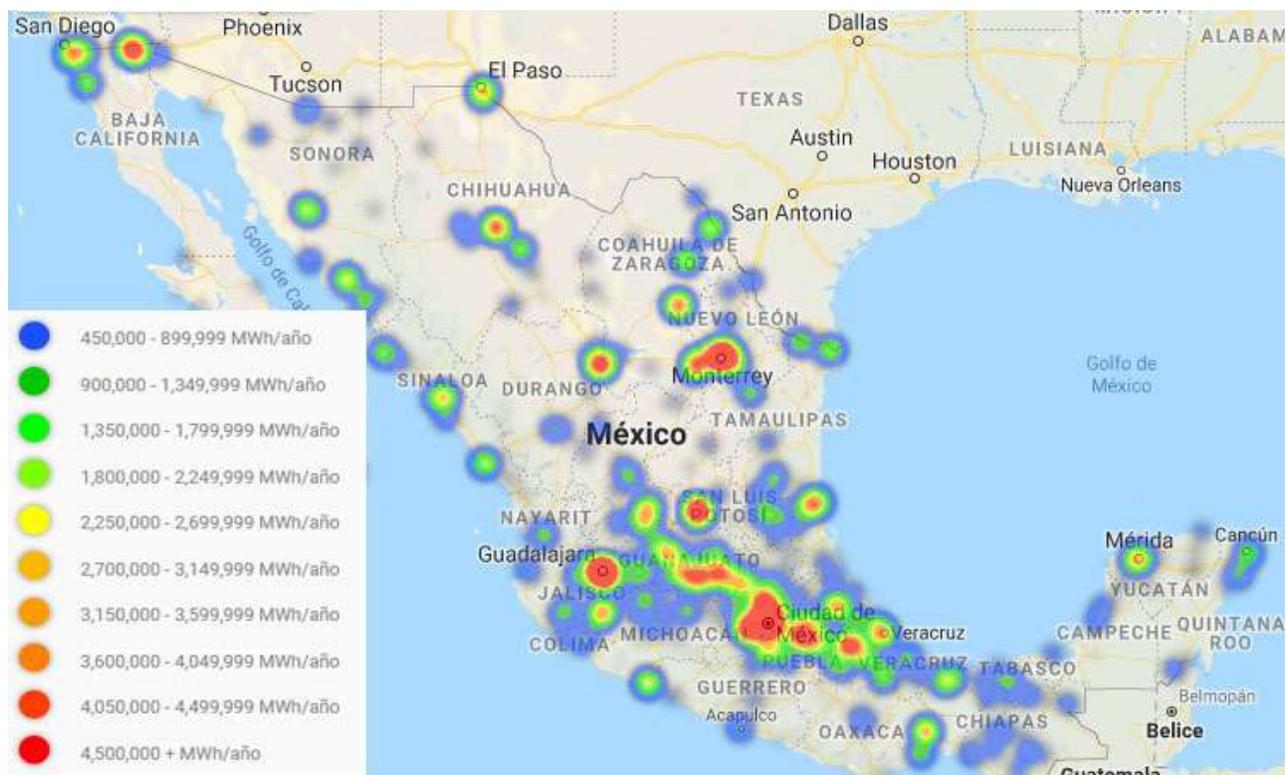


Figura 1.4 Mapa de calor de México. Fuente: CONNUE (2020).

El incremento del consumo energético en las últimas décadas ha sido directamente proporcional a las afectaciones al medio ambiente. La mayoría de las industrias desechan grandes cantidades de gases a la atmósfera, contribuyendo al calentamiento global y propiciando el cambio climático. El control de estos escapes de gases al ambiente se ha incrementado actualmente con el objetivo de contribuir con la protección ambiental, identificar las oportunidades de reducir las emisiones y aumentar la eficiencia energética.



Por esta razón, el estudio y desarrollo de nuevas tecnologías que permitan incrementar la eficiencia de la energía es de vital importancia para disminuir la problemática ambiental que presenta el planeta y que se incrementa conforme avanza el tiempo. Por lo que se presenta al Transformador Térmico por Absorción (TTA) como una alternativa para la recuperación de energía proveniente de fuentes industriales.

1.3. ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICOS

1.3.1 Estudios teóricos

Se realizó una revisión bibliográfica de trabajos teóricos y experimentales sobre Transformadores Térmicos por Absorción. A continuación, se presenta un resumen de los trabajos más sobresalientes en los últimos años.

Rivera *et al.* (2015), publicaron una revisión que abarca los años (1984 - 2015) con un número total de 157 artículos y Wu *et al.* (2014) presentaron una revisión bibliográfica que resume los años (1990 - 2014) con un total de artículos de 109, a continuación podemos resaltar los siguientes trabajos.

Dentro de los trabajos que han sido orientados a la optimización del Transformador Térmico por Absorción de simple etapa tenemos: Bhardwaj *et al.* (2003), presentaron la optimización de un Transformador Térmico por Absorción irreversible utilizando la termodinámica de tiempo finito; los resultados mostraron la variación de la carga máxima de calefacción, las temperaturas del fluido de trabajo, la transferencia de calor entre el sistema y sus fuentes térmicas y por último el coeficiente de operación (COP por sus siglas en inglés: Coefficient of Performance) que representa el rendimiento de una bomba de calor. Qin *et al.* (2004, 2005, 2008) y Sun *et al.* (2005) propusieron una ley general de transferencia de calor para optimizar el rendimiento del ciclo de un Transformador Térmico por Absorción endorreversible; los resultados obtenidos muestran una guía teórica para el diseño óptimo de un Transformador Térmico por Absorción. Wu y Chen (2005) llevaron a cabo el diseño óptimo de un Transformador de calor irreversible basado en un enfoque termo-económico, proporcionando una nueva orientación teórica para el diseño y funcionamiento óptimo de Transformadores de calor.



En cuanto a mezclas de trabajo: La mayoría de los estudios han utilizado la mezcla H₂O-LiBr, analizados termodinámicamente, obteniendo las condiciones óptimas para lograr el mayor COP y las eficiencias exegéticas, así como las irreversibilidades más bajas. Obteniéndose para esta mezcla COP máximos de 0.5 e incrementos de temperatura (GTL por sus siglas en inglés: *gross temperature lift*) de 50°C. Para mezclas alternativas, muchas opciones binarias e incluso ternarias han sido analizadas, sin embargo, los únicos con COP más altos a 0.5 fueron: la mezcla R21 - DMF con COP de hasta 0.6, (Kripalani, Srinavasa y Krishna, 1984), mientras que las mezclas de NH₃ - agua y SO₂ - DMA con COP máximos de 0,593 y 0,541, respectivamente. En el caso de la temperatura de salida, Zhuo y Machielsen (1994) y Yin *et al.* (2000) encontraron que con la mezcla TFE - Pyr, TFE - NMP y TFE - E181 es posible operar el Transformador Térmico a temperaturas de hasta 200°C en lugar de 150°C, en comparación con la mezcla de agua - LiBr debido a los problemas de cristalización.

Con respecto al GTL se mostró que las mezclas que utilizan amoníaco como refrigerante puede alcanzar un GTL de hasta 60°C en lugar de 50°C obtenido con la mezcla agua - LiBr, (Best *et al.* 1987, 1990, 1992). Finalmente, Best y Rivera (1994) y Bourouis *et al.* (2004) informaron que la utilización de la mezcla ternaria agua-Carrol y la mezcla cuaternaria agua - (LiBr + LiI +LiNO₃+LiCl) tienen una solubilidad más alta y son menos corrosivos que la mezcla de agua - LiBr.

1.3.2 Estudios experimentales

La mayoría de los trabajos de investigación se centran en estudios teóricos, se encontraron pocos equipos construidos a escala industrial para la recuperación de calor. De los estudios experimentales de un Transformador Térmico operando con la mezcla agua-LiBr y el uso de otras mezclas de trabajo bajo las mismas condiciones de operación se registró que las mezclas de agua-Carrol, agua-LiBr+LiCl y agua-LiCl fueron las de mejores resultados.

Según Pataskar *et al.* (1990), reportan que trabajando con la mezcla agua- LiCl se logra un COP hasta del 31% más alto respecto a los resultados obtenidos con agua - LiBr y de acuerdo con Rivera *et al.* (1999), utilizando como fluido de trabajo la mezcla agua-Carrol el COP es similar al obtenido con la mezcla agua -LiBr pero el GTL es superior en 7°C.



En cuanto a la geometría de los componentes del Transformador Térmico, que básicamente son intercambiadores de calor, se encontraron diversos diseños. En términos del tipo de intercambiador de calor, el más común es de coraza y tubos con arreglos horizontal y vertical. (Rivera *et al.* 1999 y 2011), (Sekar, 2011). También se han desarrollado otras configuraciones con intercambiadores de calor de placas como componentes principales, (Ibarra-Bahena *et al.* 2015). Además de intercambiadores de calor verticales de película descendente para el evaporador, generador y absorbedor, donde el fluido fluye dentro del tubo espiral vertical, (Ma *et al.* 2014). De igual manera se han utilizado intercambiadores de calor verticales helicoidal de doble tubería para el evaporador y condensador (Escobar *et al.* 2008), (Colorado-Garrido *et al.* 2009), (Demesa *et al.* 2018).

1.3.3 Aplicaciones

Teóricos y experimentales

El estudio teórico y experimental de los Transformadores Térmicos por Absorción ha contribuido fuertemente a definir los parámetros necesarios para cada tipo de aplicación. Dentro de los múltiples usos de este sistema de absorción se encuentra destilación en plantas químicas, desalinización o purificación de agua, evaporación y recuperación de calor residual de procesos industriales, entre otros.

Estudios teóricos sobre la purificación de agua acoplados a sistemas Transformador Térmico por Absorción han mostrado la factibilidad de utilizar nuevas mezclas de trabajo, así como nuevas configuraciones para disminuir los requerimientos energéticos de estos sistemas (Hamidi *et al.* 2015), (Dereje *et al.* 2014), (Huicochea y Siqueiros, 2010), (Gomri, 2009), (Siqueiros y Romero, 2007).

Srinivaset *et al.* (2009) publicó el único estudio que no utilizó agua-LiBr; ellos proponen un sistema de desalinización de efectos múltiples integrado a un TTA operando con una mezcla de agua- (LiCl + LiNO₃), con un máximo de COP de aproximadamente 0.5.

Se encontraron estudios sobre la viabilidad de adaptar estos sistemas a procesos industriales, ya sea para la recuperación de calor para un proceso secundario (purificación de agua, secado de alimentos, etc.) o



bien para el reingreso del calor al proceso (en industria textil y de producción de papel) y disminuir los requerimientos energéticos (Cortés y Rivera, 2010), (Horus y Kurt, 2010).

En años recientes se han realizado estudios para diversas aplicaciones que van desde la recuperación de calor en plantas nucleares, de turbinas de gas en plantas de cogeneración (Huicochea, 2013), (Zhang *et al.* 2014).

Muchos trabajos experimentales se han realizado a pequeña escala obteniendo las herramientas necesarias para la implementación de los Transformadores Térmicos por Absorción en los diferentes sectores industriales con resultados satisfactorios en la recuperación de calor y la eficiencia energética. En varios trabajos analizan el precio del gas natural concluyendo que el período de amortización de la instalación de un Transformador de calor y el importante ahorro energético que implican es totalmente viable desde el punto de vista económico y ambiental pues disminuirían las emisiones de CO₂, una de las principales causas del calentamiento global y todas sus consecuencias (Aly, Abrahamsson y Angstrom, 1993), (Abrahamsson, Gidner, y Jernqvist, 1995), (Scott *et al.* 1999), (Ma *et al.* 2003) y (Donellan *et al.* 2014), (Mostofizadeh y Kulick, 1998).

Respecto a la purificación de agua, teniendo en cuenta su importancia para el desarrollo del planeta, la creciente escasez que presenta y por ser uno de los objetivos de desarrollo sostenible 2018, se han desarrollado en las últimas décadas diferentes tecnologías de desalinización con el fin de obtener agua de calidad tanto para consumo humano como para propósitos industriales, Lattemann, (2008). Varios prototipos de Transformadores Térmicos por Absorción con este propósito se han desarrollado con capacidades que varían desde 0.7 kW a 5 kW, COP entre 0.15 y 0.43 (Huicochea, Siqueiros y Romero, 2004), (Huicochea y Siqueiros, 2009 y 2010), (Rivera *et al.* 2011), (Sekar y Saravanan, 2011), (Huicochea, 2013), (Meza, 2014).

Entre los trabajos experimentales enfocados a la aplicación de TTA para la producción de vapor, los resultados confirmaron que las capacidades variaron entre 1 kW y 10 kW de potencia de salida. Los diferentes autores reportaron COP entre 0.1 y 0.2, concluyendo que aumentando la potencia, los COP podrían incrementar sus valores cerca de 0.4 (Gómez-Arias *et al.* 2015), (Scott *et al.* 1999).



Muchos autores han reportado estudios a escala piloto de TTA utilizando como fuente la energía solar, reportando la viabilidad de estos sistemas para aumentar la temperatura del calor obtenido de los estanques solares (Rivera, 2000), (Nomura y Nishimura, 1992).

Aplicaciones Industriales

De acuerdo con Xu y Wang (2017), publicaron una revisión bibliográfica acerca de las aplicaciones de las bombas de calor en los distintos sectores industriales que abarca los años (1985-2016) con un número total de (98) artículos, resaltando los siguientes trabajos relacionados con TTA:

❖ Industria de pulpa y papel

Diversos trabajos se han llevado a cabo en la reutilización del calor residual en la industria papelera, utilizando Transformador Térmico por Absorción (TTA). Cortés y Rivera (2010), propusieron la optimización de un sistema de cogeneración en una planta papelera, donde las temperaturas de 70 °C – 80 °C de los evaporadores se utilizaron como fuente de calor del TTA aumentando la temperatura del agua hasta 120 °C. Por otra parte, Gidner *et al.* (1996), investigaron estrategias óptimas de conservación de energía en las que un TTA es integrado a una planta de evaporación de una fábrica sueca de pulpa de papel, en la cual se utilizaron alrededor de 69°C y 95°C de calor residual para producir 125 °C de temperatura para el proceso de evaporación. Así mismo, Granfors *et al.* (1997), discutieron el rendimiento de un TTA, incorporado a la planta de evaporación en una fábrica de pulpa de papel en la cual se utilizan 80 °C de calor residual para producir 120 °C de temperatura para evaporación.

❖ Industria petrolera

De igual manera se han realizado estudios para la reutilización del calor residual en la industria petrolera. Zhang *et al.* (2014) analizaron un TTA impulsado por calor residual para la destilación de agua con el objetivo de producir vapor de alta calidad para la recuperación de petróleo pesado. Mostrando que el sistema es capaz de elevar el calor residual de 70 °C a 125 °C, produciendo así vapor a una temperatura de 120 °C. Además Rivera *et al.* (2003) presentaron un análisis teórico de un TTA de una y doble etapa



acoplado a una columna de destilación de butano y pentano en una refinería. Los resultados mostraron que el consumo de energía de la caldera podría ahorrar en un 43% y 33% con simple y doble etapa del TTA.

❖ Industria química

La reutilización de calor de desecho en el caso de la industria química de acuerdo con el IEA Heat Pump Center (2014) informaron la aplicación de un TTA en una planta de etileno amina. Se utilizó vapor saturado a 100 °C como fuente de calor, para producir vapor saturado a 145 °C, con un COP de 0.49. El sistema quedó fuera de servicio por problemas de corrosión interna causados por la solución de LiBr.

También Aly *et al.* (1993), estudiaron la aplicación de un TTA para la industria Oleoquímica, el cual podría producir 74 kg de vapor a 134 °C a partir de 147 kg de vapor residual a 100 °C, con un COP de 0.45. Currie y Pritchard (1994) estudiaron un TTA de ciclo abierto para el secado por pulverización en la industria química. Los resultados mostraron que se alcanzó una temperatura del aire de salida de 160 °C con un incremento de la temperatura de 63 °C.

En el año 2009, se implementó la instalación de un TTA en una planta de destilación de alcohol en Japón. Esta máquina es accionada por etanol - vapor de agua de una columna rectificadora de la misma planta para producir agua caliente. Presenta una capacidad total de 2.475 kW y su consumo de electricidad es de 24 kW. El sistema funciona con un COP de 0.47. En cuanto a las emisiones de dióxido de carbono podrían reducirse en un estimado de 12,787 toneladas por año (Fujji, 2010).

❖ Industria del caucho

En el año 2003 se publican los resultados del primer Transformador Térmico por Absorción a escala industrial instalado en Beijing, China, para recuperación de calor en una planta de plástico sintético. El ciclo opera con un COP de 0.47, un GTL de 25 °C, con un periodo de amortización de 2 años. Presenta una capacidad de 5000 kW recuperando una energía equivalente a 38.200 toneladas de vapor / año. La generación de esta cantidad de vapor podría consumir alrededor de 2336.7 toneladas de combustóleo y



2337 toneladas de gases de escape emitidas al ambiente, incluidas 104 toneladas de SO₂, 7 toneladas de polvo, 22 toneladas de NO_x y 0.63 toneladas de CO (Ma *et al.* 2003).

❖ Industria hidráulica

En abril de 2007 se instaló un Transformador de calor de absorción desarrollado con un sistema de cogeneración en un sector industrial en una planta en Japón que produce maquinaria hidráulica. Su objetivo principal es recuperar calor de desecho con una fuente de 90°C. Este Transformador de calor por absorción proporciona un COP de 0.484 y un aumento de temperatura de 52°C utilizando un ciclo de efecto único. Presenta una capacidad de 150 kW (Fujji, 2009).

❖ Industria textil

En el año 2010, se analizó la posibilidad de adaptar un TTA con ciclo modificado a una planta textil. El sistema opera con la mezcla agua-bromuro de litio con el objetivo de producir agua caliente. Obteniendo un incremento del COP del 14% respecto a la configuración convencional (Horuz y Kurt, 2010).

En la Tabla 1.2 se muestra un resumen de las principales características Transformadores Térmicos por Absorción según su tipo de aplicación.

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada sobre Transformadores Térmicos por Absorción, se ha mostrado que existen escasos trabajos publicados enfocados en una aplicación industrial específica.



CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES



Tabla 1.2 Resumen de TTA para aplicaciones industriales.

Industria	Fluido de trabajo	COP	Capacidad	Descripción	Fuente
Pulpa y papel	H ₂ O –NaOH	-	10.8 MW	Utilización de 69 °C y 95 °C de calor residual para producir 125 °C de temperatura para el proceso de evaporación.	Gidner <i>et al.</i> (1996)
Pulpa y papel	H ₂ O –NaOH	-	100 kW	Utilización de 80 °C de calor residual para producir 120 °C de temperatura para evaporación.	Granfors <i>et al.</i> (1997)
Azucarera y de papel	H ₂ O –NaOH	0.48	543.7 kW	Utilización de los vapores de desechos en 65 °C, 75 °C, 85 °C para suministrar 130 para evaporación y 110 °C, 120 °C para cristalización en azúcar.	Scott <i>et al.</i> (1999)
Purificación de agua	H ₂ O –LiBr	0.23-0.33	700 W	Purificación de agua con recuperación de calor de condensación.	Rivera <i>et al.</i> (2003) Huicochea y Siqueiros, (2004)
Pulpa y papel	H ₂ O –LiBr	0.35	3.57 MW	Uso de calor residual a 70°C –80°C para producir de 90°C –120 °C de calor.	Cortes y Rivera, (2010)
Textil	H ₂ O –LiBr	0.46-0.55	150-490 kW	Recuperar alrededor de 90 ± 2 °C de calor residual industrial para suministrar agua caliente a 120 °C	Horuz y Kurt (2010)
Caucho sintético	H ₂ O –LiBr	0.47	5000 kW	Recuperar 98 °C de calor residual del vapor para suministrar agua caliente a 110 °C	Ma <i>et al.</i> (2003)
Oleoquímica	H ₂ O –NaOH	0.45	153 kW	Producir 74 kg de vapor a 134°C a partir de 147 kg de vapor residual a 100°C.	Aly <i>et al.</i> (1993)
Hidráulica	H ₂ O –LiBr	0.484	150 kW	Generar una salida de más de 130°C para calentar a partir de calor residual de aproximadamente 90°C, como fuente de calor.	Fujji, (2009)
Destilación de alcohol	H ₂ O –LiBr	0.47	2475 kW	Recupera el calor a una temperatura de 78°C y proporciona agua caliente a 112°C,	Fujji, (2010)
Purificación de agua	H ₂ O –LiBr	0.49	-	Comparan Transformadores de calor de absorción simple, doble y triple (SAHT, DAHT y TAHT) acoplados al sistema de purificación de agua.	Parham <i>et al.</i> (2016)



1.4 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Por lo expuesto anteriormente, se requiere continuar en el estudio técnico, económico y medioambiental de tecnologías sustentables para recuperar calor de desecho lo cual permitirá definir los parámetros para cada tipo de aplicaciones.

Los sistemas de absorción, en específico los TTA son una tecnología viable para la recuperación de calor, debido a que son sistemas termodinámicos eficientes y de bajo impacto ambiental. Además, pueden ser adaptados a energías renovables como energía solar o geotérmica.

El estudio teórico de tecnologías sustentables para recuperar y reutilizar calor residual es una alternativa técnicamente factible para reducir el consumo energético y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero que contribuyen al calentamiento global y por consiguiente el cambio climático.

1.5 HIPÓTESIS

Con el desarrollo de un modelo termodinámico y el estudio teórico de un TTA de una etapa se logrará evaluar el potencial de recuperación de calor, la viabilidad y factibilidad de la implementación de estos sistemas a la industria textil, así como su contribución a la reducción de emisiones de dióxido de carbono hacia el medio ambiente.

1.6 JUSTIFICACIÓN

El consumo global de energía se ha incrementado razonablemente con el aumento del desarrollo económico. La sociedad y la economía dependen en gran medida de un abastecimiento de energía segura. El 90% de la producción energética mundial proviene del uso de combustibles fósiles tales como petróleo crudo, gas natural, carbón y en menor medida de la energía nuclear, geotérmica y de recursos renovables.

A nivel mundial el sector industrial es el mayor consumidor de energía, la actividad industrial en sí genera importantes cantidades de calor residual, los cuales son vertidos a los mantos acuíferos generando



contaminación térmica en los ecosistemas. Por otra parte, la quema de combustibles fósiles genera gases de efecto invernadero, los cuales son la principal causa del calentamiento global y como consecuencia del cambio climático.

Recuperar y reutilizar el calor residual es una opción viable y técnicamente factible para disminuir la quema de combustibles fósiles utilizados en los procesos industriales, lo cual representa una posible solución a la problemática ambiental que afecta la calidad de vida del ser humano en la tierra. Entonces, el desarrollo de tecnologías sustentables que cumplan con las tres esferas de la sostenibilidad energética: seguridad energética, equidad social y mitigación del impacto ambiental, son un área de oportunidad para desarrollar la presente investigación.

Una de estas tecnologías sustentables son los sistemas de absorción y particularmente los TTA los cuales recuperan calor de desecho industrial con una mayor eficiencia y un menor impacto ambiental.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo General

Realizar un modelo termodinámico teórico de un Transformador Térmico por Absorción para recuperar calor de desecho en la industria.

1.7.2 Objetivos Específicos

1. Definir la configuración y la solución de trabajo de un Transformador Térmico por Absorción de una etapa.
2. Desarrollar el modelo termodinámico en MatLab.
3. Análisis estadístico y verificación del modelo termodinámico con otro ya publicado.
4. Simular condiciones de operación acoplado a algún proceso industrial.
5. Análisis de los resultados.



1.8 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Con el fin de cumplir los objetivos planteados, la tesis se estructuró de la siguiente manera:

En el **capítulo uno**, se presenta una investigación a cerca de las estadísticas de la producción y consumo de energía tanto en el ámbito internacional como nacional. Se muestra una revisión bibliográfica de los estudios teóricos y experimentales de los Transformadores Térmicos por Absorción, así como sus aplicaciones industriales. Por último, se expone el planteamiento del problema y la hipótesis propuesta, la justificación del trabajo y los objetivos a alcanzar.

En el **capítulo dos**, se detallan los fundamentos teóricos de la bomba de calor. Se muestra la definición, clasificación, niveles térmicos de operación y las configuraciones de cada uno de los tipos de bombas de calor. Posteriormente, se presentan los parámetros más importantes a considerar en el análisis del Transformador Térmico por Absorción. Finalmente, se describen las mezclas de trabajo más utilizadas, así como sus propiedades químicas y físicas.

En el **capítulo tres**, se describe el modelo matemático de un Transformador Térmico por Absorción de una etapa para simular las posibles condiciones de operación del mismo trabajando con las mezclas agua-bromuro de litio y agua-Carrol. Se muestra una breve descripción del software empleado para desarrollar el simulador de un Transformadores Térmicos por Absorción de simple etapa y se realiza un análisis estadístico que permite validar los resultados obtenidos en la simulación con tres artículos publicados.

En el **capítulo cuatro**, se desarrolla el análisis de tres efectos que posee el Transformador Térmico. Posteriormente, se presenta como caso de estudio al Transformador Térmico acoplado a un proceso dentro de la industria textil. Con el software desarrollado anteriormente se simulan las condiciones de operación del proceso industrial y se muestran los resultados.

En el **capítulo cinco**, se realiza la discusión de los resultados obtenidos en la simulación del caso de estudio y se plantean las conclusiones generales del trabajo realizado. Además, se proponen las recomendaciones para trabajos futuros.



CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DE BOMBAS DE CALOR

2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se explican los fundamentos teóricos de una bomba de calor. Para ello, se define qué es una bomba de calor, se describen sus elementos principales, su clasificación, configuración y las mezclas de trabajo más utilizadas en su operación. Se presenta al Transformador Térmico por Absorción, detallando su ciclo termodinámico, sus niveles térmicos de operación y los parámetros más importantes a considerar en el análisis del mismo.

2.2 RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL

En las últimas décadas, el costo de la producción energética se ha incrementado notablemente, aunado a esto, muchos procesos industriales desechan grandes cantidades de calor al ambiente, acentuando la contaminación atmosférica. Por esta razón, los estudios acerca de bombas de calor se han intensificado notablemente debido a su capacidad para recuperar calor.

El calor de desecho o residual es el calor presente en los productos y subproductos de un proceso el cual puede ser recuperado para reutilizarlo en el mismo proceso o en otros. Los elevados costes de la energía y la necesidad de disminuir las emisiones de CO₂ han incrementado la importancia de las aplicaciones de recuperación de calor para procesos industriales.

En la industria existen desechos de energía que se pueden identificar teniendo en cuenta el rango de temperatura en los cuales se encuentran. Los mismos se clasifican en desechos energéticos: de alta temperatura o calidad ($650^{\circ}\text{C} < T < 1350^{\circ}\text{C}$), intermedios ($230^{\circ}\text{C} < T < 650^{\circ}\text{C}$) y baja ($T < 230^{\circ}\text{C}$) (Chejne *et al.* 2015).

Para la recuperación de calor de una fuente de desecho de baja temperatura se encuentran diferentes tecnologías disponibles como son: economizadores de profundidad, intercambiadores de calor,



condensadores de contacto directo, compresión mecánica de vapor, calderas, condensador de membrana y bombas de calor (Jhonson, Choate y Davidson, 2008).

Las bombas de calor por absorción y en particular Transformadores Térmicos por Absorción se presentan como una tecnología viable para recuperar calor residual, pues son sistemas eficientes termodinámicamente y amigables con el medio ambiente. Además, adaptados a fuentes de energía renovables permitan disminuir los requerimientos energéticos.

2.3 BOMBA DE CALOR

Una bomba de calor es un dispositivo que extrae calor de una fuente térmica de baja calidad, y lo deposita en un sumidero de calor, a una temperatura mayor. Este sistema puede operar para enfriamiento, calentamiento, ambos efectos al mismo tiempo o como Transformador Térmico (Holland, 1990).

Para incrementar la temperatura proveniente de una fuente de baja calidad, se necesita suministrar a la bomba de calor una cantidad de energía pequeña de alta calidad. Esta energía puede ser mecánica o térmica a una temperatura alta. Esto contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, como el dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4), gases principales del efecto invernadero, además del dióxido de azufre (SO_2) y el dióxido de nitrógeno (NO_2), que contribuyen a la lluvia ácida (Huicochea, 2004).

La Figura 2.1 muestra el esquema del principio de funcionamiento de una bomba de calor. Como se observa visualmente, a la bomba de calor se le suministra trabajo mecánico y calor a temperatura baja y es bombeado a un nivel térmico mayor, convirtiéndose en calor de alta temperatura, el cual puede ser de aprovechado en un proceso secundario (Cengel y Boles, 2006).

El rendimiento de una bomba de calor en general, se expresa mediante el coeficiente de operación (COP), que es la relación que existe entre la energía que entrega la bomba de calor y la energía suministrada. Las bombas de calor por absorción pueden ser accionadas por varias fuentes de calor, incluyendo aguas residuales, gases de escape, quemadores de gas, energía solar térmica, energía geotérmica, entre otros.

El calor obtenido de la bomba de calor de absorción impulsada por calor residual se puede utilizar para el calentamiento de espacios, la producción de agua caliente, el secado, el precalentamiento industrial y la destilación en diferentes industrias (Xu y Wang, 2017).

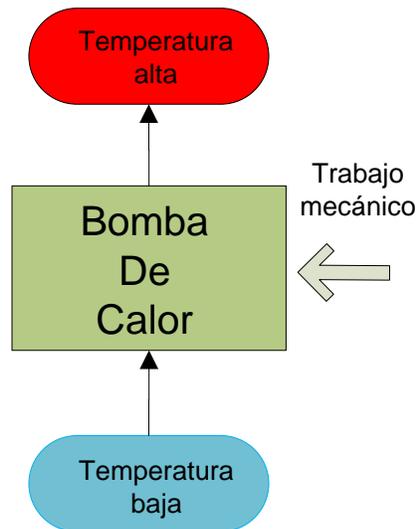


Figura 2.1 Esquema de una bomba de calor.

2.4 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE CALOR.

Existen tres categorías principales para clasificar las bombas de calor:

- Compresión mecánica de vapor.
- Absorción.
- Transformador de calor, Transformador Térmico o amplificador de calor.

2.4.1 Bombas de calor por compresión mecánica de vapor.

La bomba de calor por compresión mecánica es la más común en la literatura debido a su alto rendimiento. Se puede usar tanto para calentar como para enfriar. Los componentes principales de la misma son: dos intercambiadores de calor (un evaporador (EV), un condensador (CO)), un compresor, una válvula de expansión y un fluido de trabajo.

La figura 2.2 muestra un esquema de los componentes básicos de una bomba de calor por compresión mecánica. El ciclo termodinámico trabaja con dos niveles de temperatura (T_{EV} y T_{CO}) y dos niveles de presión (P_{EV} y P_{CO}).

Se inicia el ciclo al evaporarse el fluido de trabajo en el evaporador, extrayendo una cantidad de calor (Q_{EV}) proveniente de la fuente de calor. Posteriormente, se comprime el fluido de trabajo cediendo una cantidad de calor (Q_{CO}) en el condensador, a una mayor temperatura. Finalmente, se expande el fluido de trabajo condensado mediante la válvula de expansión y regresa al evaporador para cerrar el ciclo (Devotta y Patwardhan, 1989).

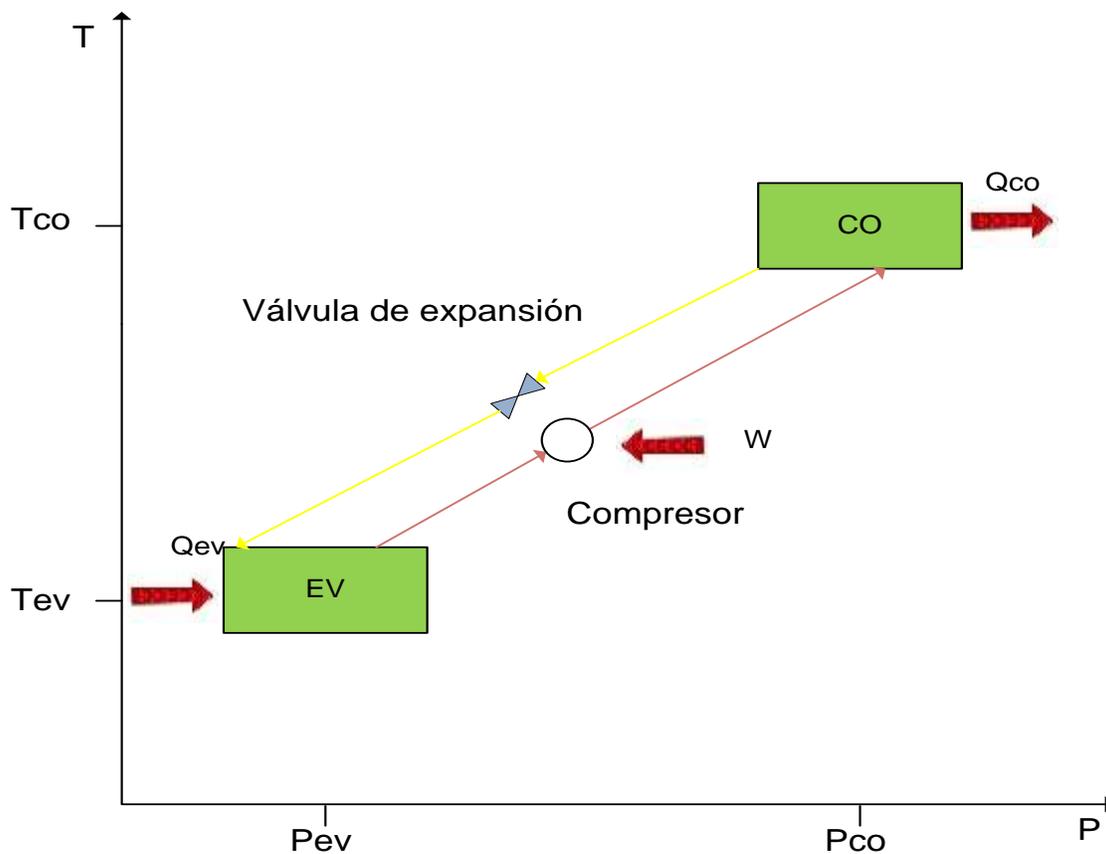


Figura 2.2 Esquema de una bomba de calor por compresión mecánica de vapor.

Para una bomba de calor por compresión mecánica de vapor operando en los modos de calentamiento y enfriamiento, el coeficiente de operación se define como muestran las ecuaciones 2.1 y 2.2 respectivamente.



1- Calentamiento

$$COP_H = \frac{Q_{CO}}{W} \quad (2.1)$$

2- Enfriamiento

$$COP_C = \frac{Q_{EV}}{W} \quad (2.2)$$

2.4.2 Bombas de calor por absorción.

El segundo tipo más común de bombas de calor son las bombas de calor por absorción. La Figura 2.3 muestra el esquema de una bomba de calor por absorción en las coordenadas de temperatura y presión. Como se observa las bombas de calor por absorción están compuestas básicamente por un absorbedor (AB), un generador (GE), un condensador (CO), un evaporador (EV) y una mezcla de trabajo.

Seguidamente se describe el principio de operación de estos sistemas así como el ciclo con el cual trabajan.

Este tipo de bomba de calor presenta dispositivos similares a la bomba de calor por compresión de vapor, exceptuando que el compresor es sustituido por un circuito integrado de absorbedor - generador. Los sistemas de absorción trabajan con una combinación de un fluido de trabajo y un absorbente. Los pares de fluidos de trabajo - absorbente más usados comúnmente son el amoníaco - agua y el agua-bromuro de litio.

Este sistema trabaja con tres niveles de temperatura (T_{GE} , T_{EV} , T_{CO}) y dos niveles de presión (P_{EV} , P_{CO}). Los niveles de presión $P_{CO} = P_{GE}$ y $P_{EV} = P_{AB}$ corresponden a las presiones de vapor de la solución fluido de trabajo - absorbente en el generador y absorbedor respectivamente (Holland, 1990).

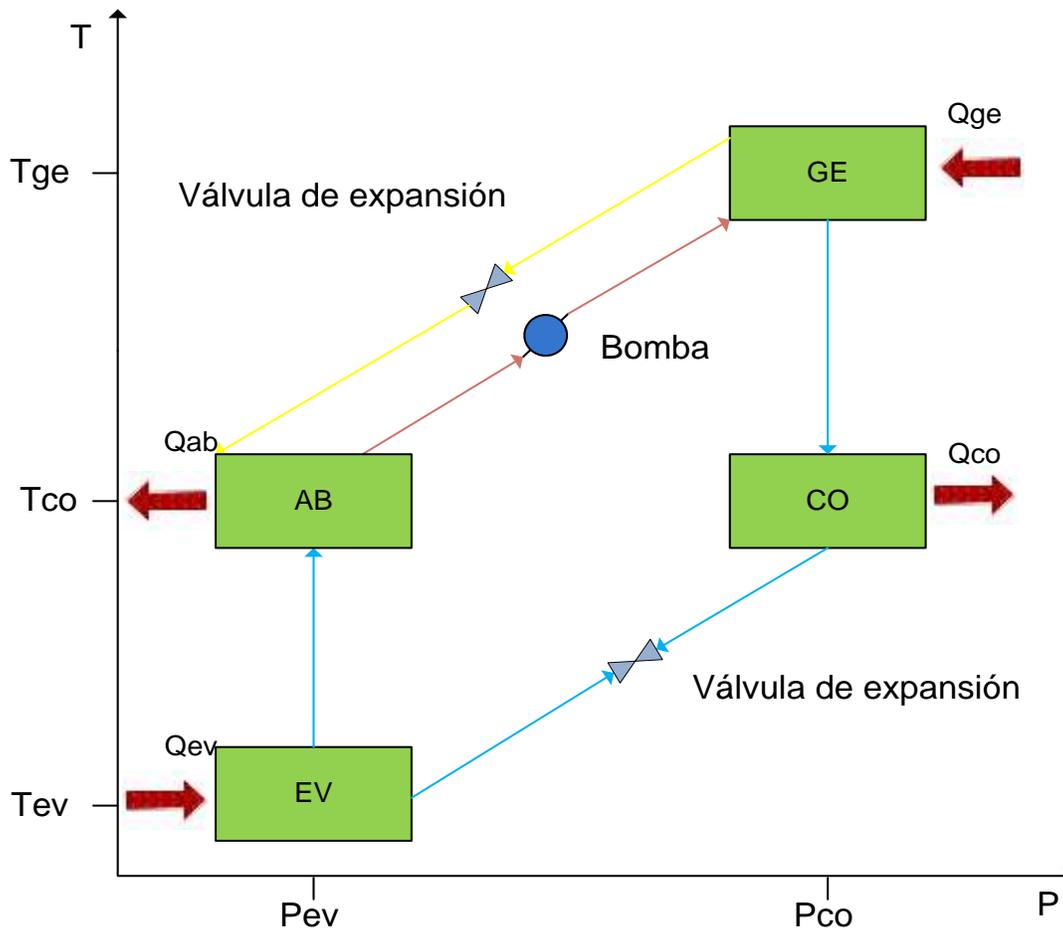


Figura 2.3 Esquema de una bomba de calor por absorción.

El ciclo termodinámico comienza al introducir una cantidad de calor Q_{GE} en el generador, el cual contiene la mezcla de fluido de trabajo y absorbente. Esta mezcla de trabajo se calienta y se desprende parte de dicho fluido a una temperatura T_{GE} . La solución con concentración débil en fluido de trabajo regresa al absorbedor.

El fluido de trabajo desprendido del generador pasa al condensador donde se condensa a una temperatura T_{CO} mientras proporciona una cantidad de calor Q_{CO} . Luego, en el evaporador se evapora a una temperatura T_{EV} y pasa al absorbedor donde se absorbe con la solución débil proveniente del generador a una temperatura T_{AB} , proporcionando una cantidad de calor Q_{AB} .

El coeficiente de operación (COP) para las bombas de calor por absorción para calentamiento y enfriamiento se presentan en las ecuaciones 2.3 y 2.4, respectivamente (Holland, 1990).



1- Calentamiento

$$COP_H = \frac{Q_{AB} + Q_{CO}}{Q_{GE}} \quad (2.3)$$

2- Enfriamiento

$$COP_C = \frac{Q_{EV}}{Q_{GE}} \quad (2.4)$$

Además, el coeficiente de Carnot para las bombas de calor por absorción se define como sigue (Holland *et al.* (1999)):

$$COP_{CARNOT} = \left(1 - \frac{T_{EV}}{T_{CO}}\right) \left(\frac{T_{CO}}{T_{CO} - T_{EV}}\right) \quad (2.5)$$

En la tabla 2.1 se resumen algunas ventajas y desventajas de las bombas de calor por absorción con respecto a las bombas de calor por compresión mecánica (Holland, 1990):



CAPÍTULO II. FUNDAMENTOS DE BOMBAS DE CALOR



Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de la bomba de calor por absorción respecto a la bomba de calor por compresión mecánica.

Bombas de calor por absorción	Bombas de calor por compresión mecánica
<i>Ventajas</i>	<i>Ventajas</i>
Emplean para las bombas del proceso una pequeña cantidad de energía mecánica.	Presentan COP más elevados
Los fluidos de trabajo que utilizan son amigables con el medio ambiente.	Tiempo muy pequeño de alcanzar el estado estable.
Presenta componentes menos sofisticados como en el caso de los compresores.	Conocimiento de diversos fluidos de trabajo y sus propiedades.
Diseño menos complicado (solo son necesarias las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo).	
<i>Desventajas</i>	<i>Desventajas</i>
El tiempo de alcanzar el estado estable es mayor.	Debido al compresor requieren energía de alta calidad.
Presentan COP más bajos.	Dificultades en el diseño producto del compresor.
Para su construcción se requiere de materiales más costosos.	



2.5 TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN.

Los Transformadores Térmicos por Absorción (TTA) son un tipo de bomba de calor por absorción, el cual tiene la capacidad de aprovechar el calor de desecho de un proceso industrial o una fuente de baja calidad, y llevar una parte a una temperatura mayor con el fin de aprovecharla en un fin específico (Holland *et al.* 1999).

Los TTA pueden clasificarse de simple efecto o avanzado y pueden operar con mezclas convencionales o alternativas.

2.5.1 Transformador Térmico por Absorción de una etapa.

Los componentes de un TTA son básicamente intercambiadores de calor. Está compuesto principalmente por un Generador (GE), un Condensador (CO), un Evaporador (EV), un Absorbedor (AB) y un intercambiador de calor denominado economizador (HE). En la Figura 2.4 se observa el ciclo del TTA en un diagrama de presión-temperatura.

Como se muestra el Transformador Térmico opera con dos niveles de presión y tres niveles de temperatura donde el mismo calor de desecho es suministrado al generador y evaporador.

El ciclo inicia al agregar calor de desecho residual al Generador (Q_{GE}) y al Evaporador (Q_{EV}), el cual puede provenir de algún proceso industrial con una temperatura intermedia (60°C - 80°C). En el generador se encuentra la mezcla concentrada en fluido de trabajo, parte del fluido de trabajo es evaporado como producto del intercambio de calor con la fuente de desecho, posteriormente es enviado al condensador donde cambia a fase líquida al rechazar una cantidad de calor (Q_{CO}).

El condensado obtenido es bombeado al evaporador donde recibe una cantidad de calor para nuevamente pasar a la fase vapor y luego pasa al absorbedor donde es absorbido por la mezcla diluida en fluido de trabajo proveniente del generador, liberando una cantidad de calor útil (Q_{AB}), finalmente la mezcla de trabajo pasa al generador para reiniciar nuevamente el ciclo.

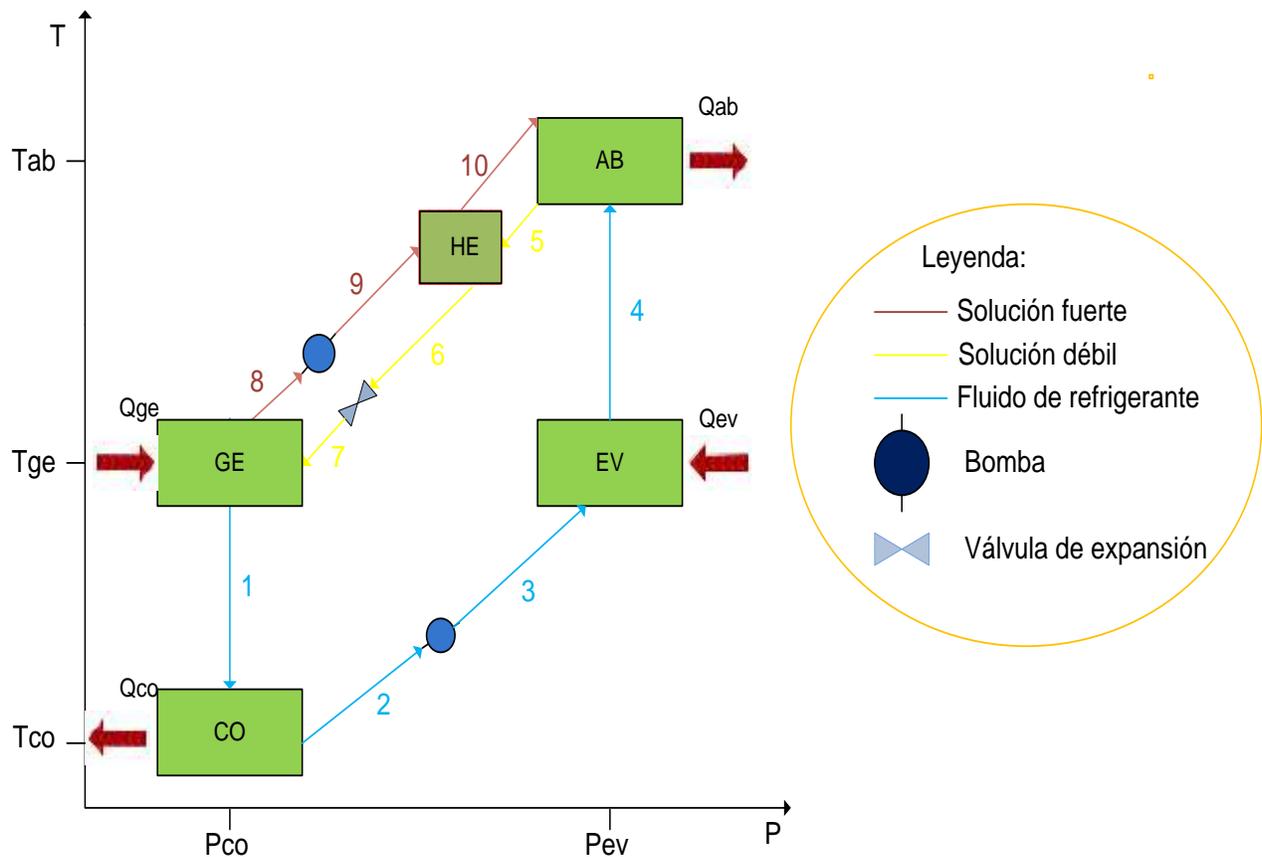


Figura 2.4 Diagrama del ciclo de un TTA dentro de las coordenadas de presión y temperatura.

Las propiedades físicas del fluido de trabajo más importantes a analizar en el ciclo de absorción son la densidad, la viscosidad, la tensión superficial y la conductividad térmica. Entre las propiedades termodinámicas involucradas tenemos la presión de vapor, la entropía, la entalpia entre otras.

2.5.2 Importancia del economizador en un TTA de una etapa.

En la configuración del TTA puede incluirse un intercambiador de calor entre el generador y el absorbedor el cual tiene la función de recuperar calor entre estos dos componentes. Este intercambiador de calor es nombrado intercambiador de solución o economizador y tiene como objetivo precalentar la solución fuerte de la mezcla de trabajo.



El grado de recuperación del economizador va a depender de manera directa del valor de su efectividad (EF), la cual se define como la razón del calor que se transfiere entre el flujo de calor máximo que se puede transferir. La efectividad intercambiador de solución o economizador se define a continuación:

$$EF = \frac{H_9 - H_{10}}{H_9 - H_{10,5}} \quad (2.6)$$

$$H_{10,5} = H(X_{10}, T_5) \quad (2.7)$$

Teniendo en cuenta la figura 2.4, H representa las entalpías en los puntos mostrados y $H_{10,5}$ simboliza la entalpía de la solución evaluada a la temperatura de la solución débil y a la concentración de la solución fuerte.

2.6 PARÁMETROS IMPORTANTES DEL TTA.

Los parámetros más importantes de diseño para un Transformador Térmico por Absorción son: la relación de flujo, el incremento de temperatura y el coeficiente de operación. Romero (1996).

- ❖ Relación de flujo: La relación de flujo (RF) se define como la razón de flujo másico que va del absorbedor al generador entre el flujo másico del fluido de trabajo. Este parámetro determina el tamaño de los diversos elementos del equipo. Un aumento en la relación de flujo afecta el rendimiento de las siguientes maneras (Eisa *et al.* 1986):
 - la diferencia de concentración entre el absorbedor y el generador disminuye.
 - la carga en el economizador normalmente colocado entre el absorbedor y el generador aumenta.
 - las pérdidas de calor del sistema podrían aumentar.
 - la potencia requerida para la bomba de solución aumentará.



- ❖ Coeficiente de operación (COP): El COP para un Transformador Térmico por Absorción se presenta por:

$$COP_H = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE} + Q_{EV} + W_1 + W_2} \quad (2.8)$$

- ❖ Coeficiente de Carnot (COP_{CARNOT}): El coeficiente de Carnot para el Transformador Térmico por Absorción se puede definir como: (Best y Rivera, 1991):

$$COP_{CARNOT} = \frac{1 - \frac{T_{EV}}{T_{CO}}}{\frac{T_{GE}}{T_{AB}} \left[1 - \frac{T_{EV}}{T_{CO}}\right] + \frac{T_{EV}}{T_{CO}} \left[\frac{T_{GE}}{T_{AB}} - 1\right]} \quad (2.9)$$

- ❖ Incremento de temperatura (GTL, por sus siglas en inglés): El incremento de temperatura, se define como la diferencia de valores que existe entre la temperatura del absorbedor T_{AB} y del evaporador T_{EV} .

$$GTL = T_{AB} - T_{EV} \quad (2.10)$$

2.7 MEZCLAS DE TRABAJO.

En el caso de los sistemas de absorción, como son los Transformadores Térmicos por Absorción, una combinación de un fluido de trabajo y un absorbente forman la mezcla de trabajo.

La selección de una mezcla de trabajo es una parte crítica en el diseño de un TTA. El comportamiento de un ciclo de absorción depende de las propiedades termodinámicas, químicas y físicas del fluido de trabajo y del absorbente.



2.7.1 Propiedades de las mezclas de trabajo.

Las mezclas de trabajo deben tener las siguientes propiedades químicas (Escalante, 2002).

- No ser flamables, no ser explosivos, ni tóxicos.
- Químicamente estables en condiciones de operación.
- No corrosivos, o bien, si lo son deben usarse con inhibidores.
- Tener disponibilidad y ser baratos.
- Ser compatibles con el material de construcción.

Además las mezclas de trabajo deben cumplir con las siguientes propiedades:

- Baja viscosidad, para favorecer la transferencia de calor y de masa. Sin embargo, la viscosidad y la tensión superficial no deberán ser tan bajas que inhiban la formación de gotas durante la condensación, la cual mejora la transferencia de calor.
- Conductividad térmica relativamente alta, para favorecer el intercambio de calor en los equipos.
- Calor específico bajo, para que la demanda de calor sea baja.

2.7.1 Mezclas de trabajo más usadas.

- Agua- bromuro de litio (H_2O - LiBr)

Una de las mezclas de trabajo más utilizadas y estudiadas en un TTA es el par H_2O - LiBr, en la cual el agua es el fluido de trabajo y el bromuro de litio es el absorbente, es recomendable para altas temperaturas de trabajo y posee la ventaja de disponer de todas las propiedades termodinámicas. Presenta algunas desventajas, como son la solubilidad de esta sal en agua, que está limitada a 70% en peso por lo que a concentraciones mayores a este porcentaje cristaliza. Además en ocasiones es necesario agregar inhibidores contra la corrosión, debido a que el bromuro de litio actúa corrosivamente sobre el acero inoxidable (Eisa *et al.* 1986), (Horuz y Kurt, 2010), (Ma *et al.* 2003), (Fujji, 2010) y (Parham *et al.* 2016).



➤ Agua – Carrol

Otra mezcla utilizada es agua –Carrol, la cual está compuesta por bromuro de litio-agua más etilenglicol el cual es un aditivo para aumentar la solubilidad de la solución en una relación 1:4:5 en peso. La misma posee mayor solubilidad en agua que la mezcla H₂O-LiBr, con lo cual se disminuye el riesgo de cristalización y alcanzando mayores incrementos de temperatura (Best y Rivera, 1994), (Rivera y Romero, 1997) y (Rivera *et al.* 1999).

➤ Otras mezclas de trabajo

Además de las anteriores, otras mezclas de trabajo se han utilizado para las bombas de calor por absorción. Las cuales incluyen mezclas de amoníaco-agua, agua-hidróxido de sodio, agua-ácido sulfúrico, entre otras (Pataskar *et al.* 1990), (Bourouis *et al.* 2004) (Zhuo y Machielsen, 1994) y (Yin *et al.* 2000).



CAPÍTULO III.

DESARROLLO DE UN SIMULADOR TERMODINÁMICO.

3.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se presenta el modelo termodinámico desarrollado para simular las posibles condiciones de operación de un Transformador Térmico por Absorción (TTA) de una etapa, utilizando las mezclas agua-bromuro de litio y agua-Carrol. Además, se describe la metodología, el diagrama de flujo y la programación del simulador desarrollado para el TTA de una etapa, así como la validación de resultados con su respectivo análisis estadístico.

3.2 MODELO MATEMÁTICO DE UN TRNASFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN DE UNA ETAPA.

Para desarrollar y validar el modelo matemático de las condiciones de trabajo en equilibrio de un Transformador Térmico por Absorción de una etapa, se analizaron tres artículos de referencia publicados, estos son: Eisa *et al.* (1986), Rivera *et al.* (1994) y Rivera y Romero (1998). La tabla 3.1 muestra una comparativa de algunas de las características de los mismos.

Tabla 3.1 Comparación de las principales características de los tres artículos analizados.

Fuente	Título	Mezcla de trabajo	Configuración del TTA
Eisa <i>et al.</i> (1986)	<i>Datos de diseño termodinámico para Transformadores Térmicos por Absorción Parte I. Operación con bromuro de litio-agua.</i>	agua-bromuro de litio.	Generador Condensador Evaporador Absorbedor
Best y Rivera (1994)	<i>Datos de diseño termodinámico para Transformadores Térmicos por Absorción Parte VI. Operación con agua-Carrol.</i>	agua-Carrol	Generador Condensador Evaporador Absorbedor
Rivera y Romero (1998)	<i>Comparación teórica de Transformadores Térmicos por Absorción de simple y avanzada etapa trabajando con las mezclas bromuro de litio-agua y agua-Carrol.</i>	Agua-bromuro de litio y agua-Carrol	Generador Condensador Evaporador Absorbedor Economizador



Como se observa en la tabla anterior los artículos publicados por Eisa *et al.* (1986) y Best y Rivera, (1994) muestran los datos de diseño de un Transformador Térmico por Absorción sin presencia de un economizador en su diseño, trabajando con las mezclas agua-bromuro de litio y agua- Carrol respectivamente.

Sin embargo, el artículo presentado por Rivera y Romero (1998) propone una comparación teórica de Transformadores Térmicos por Absorción simple y etapa avanzada operando con ambas mezclas de trabajo y utilizando un economizador en su configuración.

Teniendo en cuenta la comparativa entre los tres artículos antes mencionados se tomó como referencia para desarrollar el modelo matemático del TTA el trabajo realizado por Rivera y Romero (1998), debido a que presenta la configuración requerida para lograr los objetivos propuestos. Además, en este artículo se opera el TTA tanto con la mezcla agua-bromuro de litio como con la mezcla agua-Carrol.

El modelo matemático para simular las condiciones de operación y validar el programa desarrollado en Matlab, considera equilibrio termodinámico (Rivera y Romero (1998)), además de las siguientes suposiciones:

- El Transformador Térmico por Absorción opera en estado estacionario.
- El sistema se encuentra en equilibrio termodinámico.
- A la salida de cada componente del Transformador Térmico por Absorción existen condiciones de saturación.
- No es necesario la utilización de un rectificador pues el absorbente no se evapora en el rango de temperaturas de trabajo.
- Se consideran despreciables las pérdidas de presión en todo el sistema.
- Las bombas realizan un trabajo isentrópico.
- No existe evaporación del absorbente en ningún punto del sistema.
- No existe variación entálpica a través de la válvula.



- Se consideran despreciables las ganancias o pérdidas de calor en las tuberías y en el sistema en general.

Teniendo en cuenta el diagrama de la Figura 2.4, expuestas en el capítulo 2 y las consideraciones descritas anteriormente se desarrolló el modelo termodinámico del ciclo del TTA.

Conociendo como datos las temperaturas del generador, condensador, evaporador y absorbedor (T_{GE} , T_{CO} , T_{EV} y T_{AB}) respectivamente, la eficiencia del economizador (EF) y el calor de salida en el evaporador Q_{EV} se puede decir que:

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

$$T_1 = T_8 \quad (3.1)$$

Las temperaturas y presiones en el evaporador y condensador se pueden determinar teniendo en cuenta que en ambos componentes el agua se encuentra en saturación:

$$P_1 = P_2 = P_7 = P_8 = P(T_2) \quad (3.2)$$

$$P_3 = P_4 = P_5 = P_6 = P_9 = P_{10} = P(T_4) \quad (3.3)$$

Considerando que el absorbente no se evapora:

$$X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = 0 \quad (3.4)$$

Además

$$X_5 = X_6 = X_7 \quad (3.5)$$

$$X_8 = X_9 = X_{10} \quad (3.6)$$



Teniendo en cuenta que en cada estado se puede calcular la entalpía a las salidas de los componentes:

$$H_1 = H(T_1, P_1) \quad (3.7)$$

$$H_2 = H(T_2, P_2) \quad (3.8)$$

$$H_4 = H(T_4, P_4) \quad (3.9)$$

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

$$M_1 = M_2 = M_3 = M_4 \quad (3.10)$$

$$M_5 = M_6 = M_7 \quad (3.11)$$

$$M_8 = M_9 = M_{10} \quad (3.12)$$

A continuación se plantean las ecuaciones de balance de materia y energía para cada uno de los componentes.

Condensador

$$Q_{CO} = M_1 * (H_1 - H_2) \quad (3.13)$$

Bomba 1

$$V_2 = V(T_2) \quad (3.14)$$

$$\Delta H_{P1} = H_3 - H_2 = V_2 * (P_3 - P_2) \quad (3.15)$$



$$H_3 = \Delta H_{P1} + H_2 \quad (3.16)$$

$$WP_1 = M_1 * \Delta H_{P1} \quad (3.17)$$

Evaporador

$$Q_{EV} = M_1 * (H_4 - H_3) \quad (3.18)$$

Bomba 2

$$V_8 = V(T_8) \quad (3.19)$$

$$\Delta H_{P2} = H_9 - H_8 = V_8 * (P_9 - P_8) \quad (3.20)$$

$$H_9 = \Delta H_{P2} + H_8 \quad (3.21)$$

$$WP_2 = M_8 * \Delta H_{P2} \quad (3.22)$$

Economizador

Teniendo en cuenta las ecuaciones 2.6 y 2.7:

$$H_{10} = H_9 + EF * (H_{10,5} - H_9) \quad (3.23)$$

$$H_6 = \frac{M_8}{M_5} * (H_9 - H_{10}) + H_5 \quad (3.24)$$



Absorbedor

$$RF = \frac{M_5}{M_1} = \frac{X_8}{X_8 - X_5} \quad (3.25)$$

$$X_5 = X(T_5, P_5) \quad (3.26)$$

$$X_8 = X(T_8, P_8) \quad (3.27)$$

$$H_5 = H(T_5, X_5) \quad (3.28)$$

$$H_8 = H(T_8, X_8) \quad (3.29)$$

$$M_5 = M_1 + M_8 \quad (3.30)$$

$$M_5 * X_5 = M_8 * X_8 \quad (3.31)$$

$$Q_{AB} = M_1 * H_4 + M_8 * H_{10} - M_5 * H_5 \quad (3.32)$$

Generador

$$M_7 = M_8 + M_1 \quad (3.33)$$

$$M_7 * X_7 = M_8 * X_8 \quad (3.34)$$



$$Q_{GE} = M_1 * H_1 + M_8 * H_8 - M_5 * H_7 \quad (3.35)$$

Definiendo el coeficiente de operación entálpico COP_H teniendo en cuenta que se desprecia el trabajo realizado por las bombas:

$$COP_H = \frac{M_1 * H_4 + M_8 * H_{10} - M_5 * H_5}{M_1 * H_1 + M_8 * H_8 - M_5 * H_7 + M_1 * H_4 - M_1 * H_3} \quad (3.36)$$

3.2 SIMULADOR DE CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN TTA.

3.2.1 Descripción del software Matlab.

El programa MATLAB (Matrix Laboratory) es un software matemático con entorno de desarrollo integrado (IDE) que presenta un lenguaje de programación propio (Lenguaje M). Se destaca en cálculos numéricos, especialmente en los relacionados con matrices y gráficas, realiza diversas funciones como arreglos de valores y toma de datos (Barragán, 2007).

3.2.2 Descripción del simulador realizado en Matlab.

Se desarrolló un simulador con el objetivo de contar con una herramienta que permitiera conocer el comportamiento de un TTA de una etapa con capacidad de 1 kW en el evaporador, utilizando como soluciones de trabajo las mezclas agua- bromuro de litio y agua-Carrol.

De acuerdo con las ecuaciones matemáticas del modelo termodinámico desarrollado anteriormente, se realizó un algoritmo de programación en MatLab versión 9.5 (R2018b) con la herramienta gráfica GUIDE, (Creating Graphical User Interfaces), la cual permite interactuar con el usuario.

Para el cálculo de las propiedades termodinámicas del agua se utilizó el software XSteam para MatLab, Holmgren (2003), así como para las de las soluciones se utilizaron las correlaciones reportadas por

McNelly, (1979) para agua-bromuro de litio, y Reimann y Biermann, (1984) para agua-Carrol, las cuales son posteriormente programadas en MatLab. Anexos A, B y C.

En la Figura 3.1 se observa la interfaz gráfica del programa desarrollado en el software en el cual se ingresan los datos de entrada T_{EV} , T_{AB} , T_{CO} , T_{GE} , Q_{EV} , así como la eficiencia del economizador. Además, con el uso de los raddiobutton se pueden escoger diversas opciones como: la utilización del economizador y de ser así la eficiencia requerida, la mezcla de trabajo a utilizar (agua-bromuro de litio o agua-Carrol) y finalmente si queremos condiciones estáticas o dinámicas.

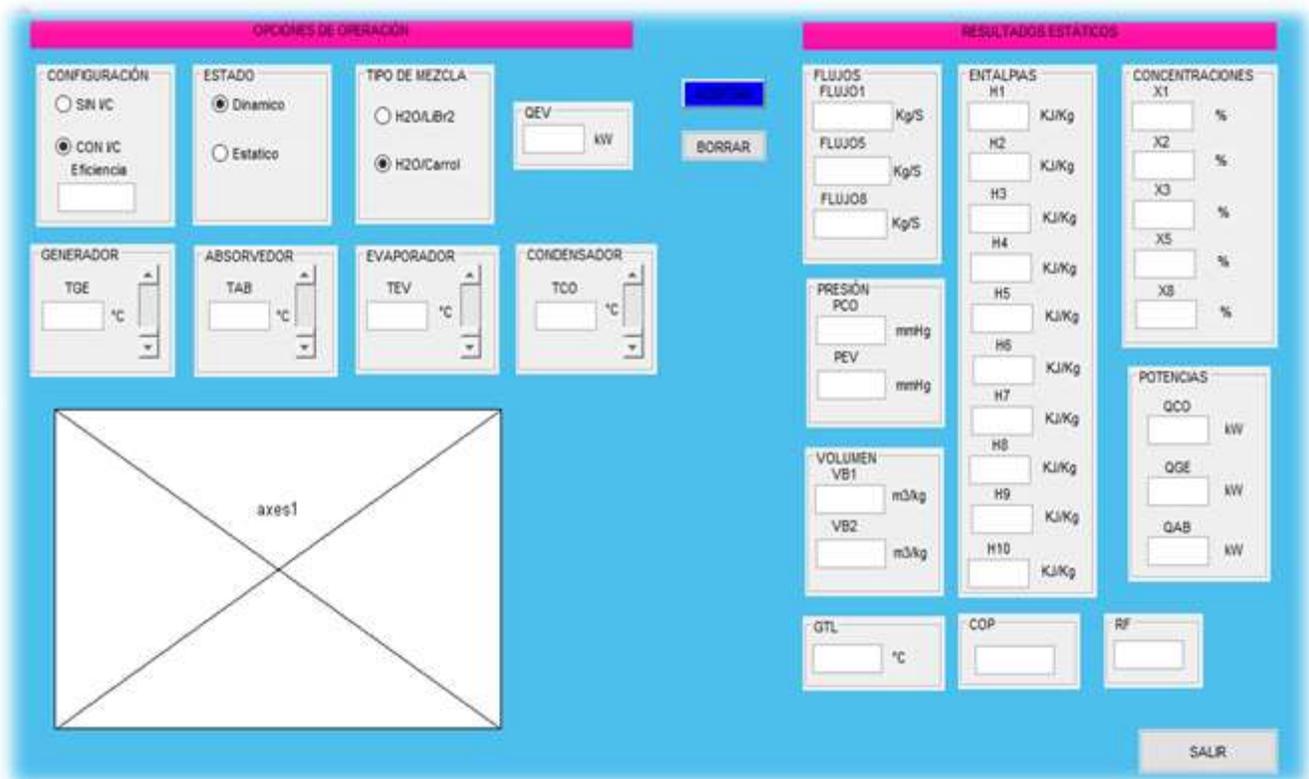


Figura 3.1 Interfaz gráfica del simulador de un Transformador Térmico por Absorción.

La figura 3.2 muestra el algoritmo de programación realizado de acuerdo al modelo matemático desarrollado del TTA con el fin de obtener los parámetros importantes del ciclo del Transformador Térmico por Absorción.

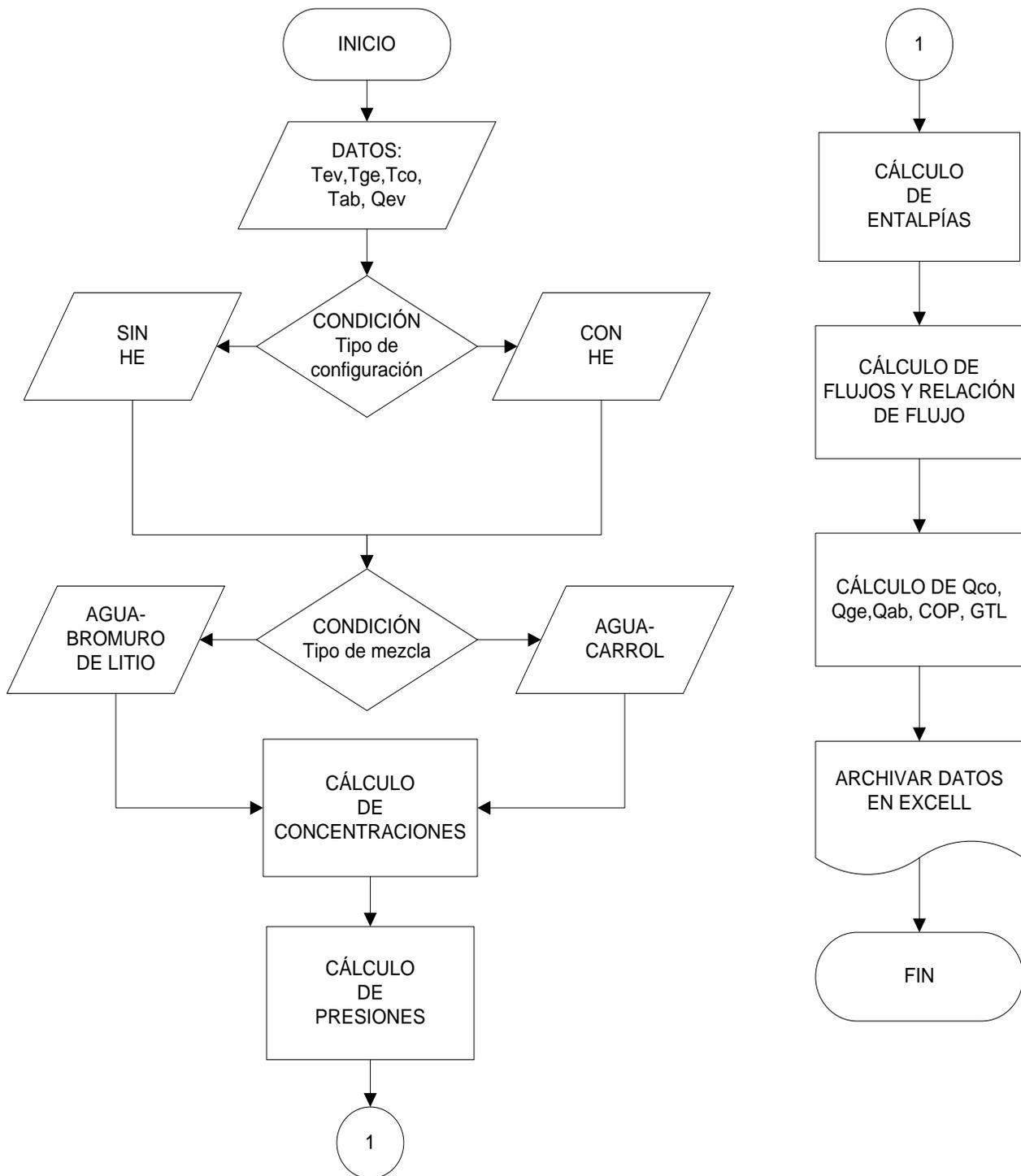


Figura 3.2 Algoritmo para calcular las condiciones de operación de un TTA de una etapa.



3.3 VALIDACIÓN DEL SIMULADOR.

3.3.1 Análisis del comportamiento del simulador realizado en MatLab.

Para realizar el análisis del comportamiento del simulador se tomaron en cuenta tres artículos publicados: (Eisa *et al.* (1986), Best y Rivera (1994) y Rivera y Romero (1998)). La selección de estos 3 artículos se debe a que en un principio se iba a trabajar con la solución agua-bromuro de litio (Eisa *et al.* (1986)), luego para ampliar la investigación se agregó el uso de la mezcla agua-Carrol (Best y Rivera (1994)), sin embargo estos artículos no presentan economizador en la configuración del TTA. En el caso del artículo publicado por Rivera y Romero (1998) se trabaja con ambas soluciones y presenta economizador en su diseño pero no expone los datos necesarios para la validación del simulador, sin embargo el Dr. Romero nos facilitó la información necesaria.

En todos los casos en las condiciones de operación se considera un calor en el evaporador de 1 kW y para el caso de Rivera y Romero (1998) se trabaja con una eficiencia en el economizador de 0.7.

Los trabajos publicados tomados como referencia para el análisis se describen a continuación:

Como se mencionó anteriormente respecto a los artículos de Eisa *et al.* (1986) y Rivera *et al.* (1994), ambos presentan un diseño teórico del ciclo termodinámico de un TTA, con una configuración sin economizador entre el absorbedor y el generador, operando con la mezcla binaria agua-bromuro de litio en el primer caso y agua-Carrol para el segundo.

El tercer trabajo considerado para el análisis fue desarrollado por Rivera y Romero (1998), el cual propone una comparación teórica de un TTA trabajando tanto con la mezcla agua-bromuro de litio como con agua-Carrol y en la configuración del ciclo de trabajo del TTA incluyen el economizador.

3.3.2. Validación del simulador.

Para verificar la similitud de los datos resultantes del simulador respecto a los datos de los artículos mencionados anteriormente, se utilizaron diferentes indicadores de desviación para valorar la bondad de ajuste entre ambos datos (Lugo *et al* 2019). Seguidamente se definen los indicadores de desviación:

- Desviación (%Error): el cual permite ver que tan lejos se encuentra un valor aproximado de uno exacto.

$$\text{Desviación (\%)} = \frac{|X_{\text{sim}} - X|}{X} * 100 \quad (3.37)$$

- Raíz del error cuadrático medio (RMSE): Mide la cantidad de error que existe entre dos conjuntos de datos o sea nos brinda una medida de cuán cerca están los puntos de los datos observados de los valores estimados. Valores más bajos de RMSE indican un mejor ajuste, un valor de RMSE = 0 indica un ajuste perfecto entre la serie observada y la serie estimada.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{sim},i} - X_i)^2}{N}} \quad (3.38)$$

- Sesgo medio del error (MBE): Se utiliza para validar los resultados del modelo contra los datos experimentales, representa el grado de correspondencia entre una predicción y una observación, o sea describe si un modelo sobreestima o subestima a la observación:

$$\text{MBE} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{sim},i} - X_i)}{N} \quad (3.39)$$

- Coeficiente de determinación (R^2) indica la bondad de ajuste del modelo, sus límites son de 0 a 1, con 0 indicando que el modelo propuesto no mejora la predicción sobre el modelo medio y 1 indica una predicción perfecta:

$$R^2 = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (X_{\text{sim},i} - X_i)^2}{\sum_{i=1}^N (X_i - X_{\text{ave}})^2} \right) \quad (3.40)$$



Donde N representa la cantidad de datos, $X_{sim, i}$ y X_i es cada uno de los valores del COP obtenidos en el simulador y reportado en los artículos respectivamente, mientras que X_{ave} indica el promedio de los datos referenciados en los estudios.

Respecto a los indicadores %Error, RMBE y MBE, menores valores indican una mejor bondad del ajuste entre los dos métodos, para el caso de R^2 mientras el valor se acerque más a 1 el ajuste del modelo será más preciso.

Los resultados de la simulación se compararon con los datos publicados en los tres artículos presentados con anterioridad para validar el presente estudio, teniendo en cuenta los valores del COP entálpico vs la temperatura del absorbedor y el GTL.

En cuanto al artículo de Eisa *et al.* (1986):

Se realizó un estudio teórico de un TTA trabajando con la mezcla agua-bromuro de litio. Con el modelo termodinámico obtenido en la sección 3.1 se desarrolló la programación del mismo sin tener en cuenta en el modelo la participación del economizador y bajo las condiciones de operación mostradas en el artículo.

La Figura 3.3 muestra el comportamiento del COP en función de la T_{AB} para los diferentes rangos de temperaturas: $40\text{ °C} < T_{EV} < 80\text{ °C}$, $40\text{ °C} < T_{GE} < 80\text{ °C}$, $60\text{ °C} < T_{AB} < 100\text{ °C}$ y $10\text{ °C} < T_{CO} < 30\text{ °C}$, todas las temperaturas incrementándose en 10 °C . La comparación de ambos resultados presentó un porcentaje de error de 0 a 5%, un coeficiente de determinación del error R^2 de 99.6%, un RMSE de 0.058 y un MBE de 0.000034 (Tabla 3.2), lo que revela la similitud de los datos obtenidos en el programa MatLab con respecto a los propuestos en el artículo.

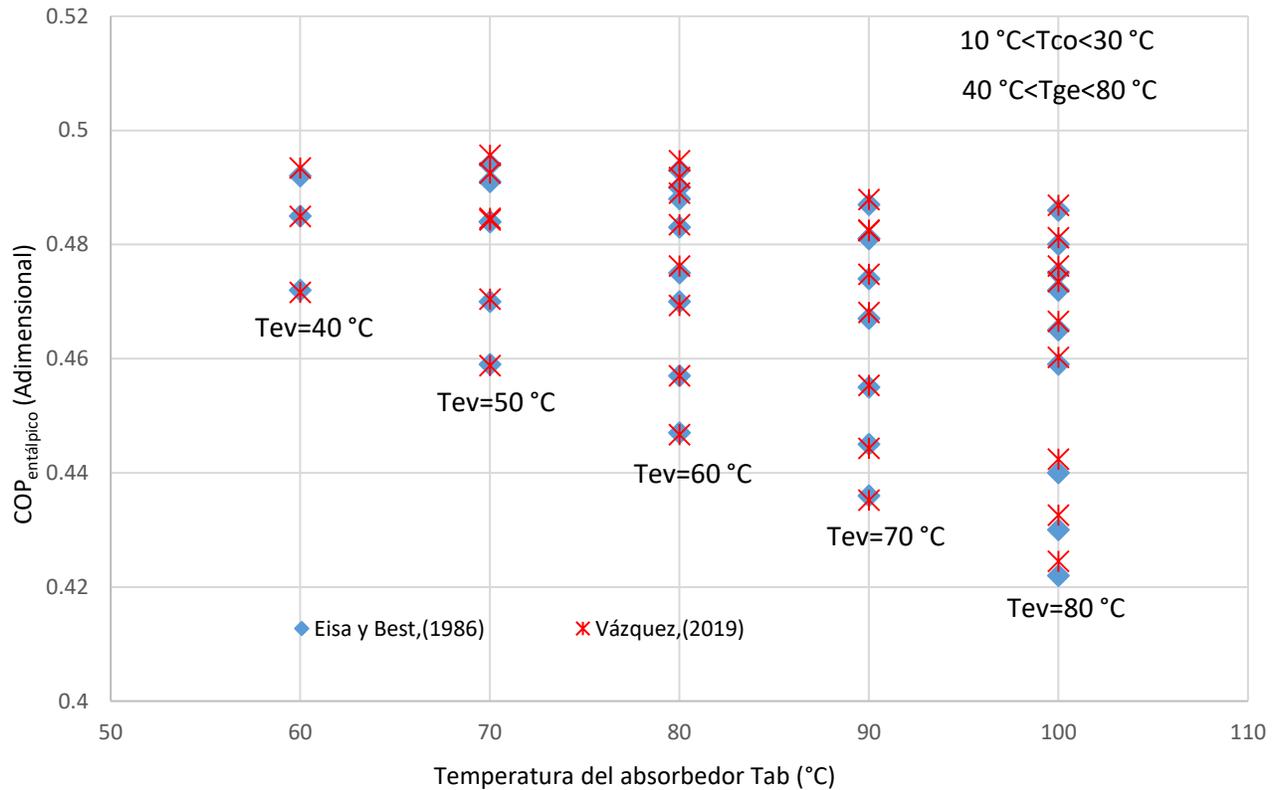


Figura 3.3 COP en función de la temperatura del absorbedor para la mezcla agua-bromuro de litio.

De acuerdo al artículo de Best y Rivera (1994):

En este trabajo se elaboró un estudio teórico de un TTA trabajando con la mezcla agua-Carrol. De la misma manera, con el modelo termodinámico obtenido en la sección 3.2 se desarrolló la programación del mismo sin tener en cuenta el economizador y bajo las condiciones de operación sugeridas en el artículo.

La Figura 3.4 muestra el comportamiento del COP en función de la T_{AB} para los diferentes rangos de temperaturas: $50\text{ °C} < T_{EV} < 90\text{ °C}$, $50\text{ °C} < T_{GE} < 90\text{ °C}$, $70\text{ °C} < T_{AB} < 110\text{ °C}$ y $20\text{ °C} < T_{CO} < 40\text{ °C}$ e igualmente todas las temperaturas aumentando en 10 °C . La comparación de ambos resultados presentó un porcentaje de error 0 a 4.81%, un coeficiente de determinación del error R^2 de 99.98%, un RMSE de

0.04157 y un MBE de 0.00001728 (Tabla 3.2), mostrando la semejanza de los datos obtenidos en el programa con respecto a los propuestos en el artículo.

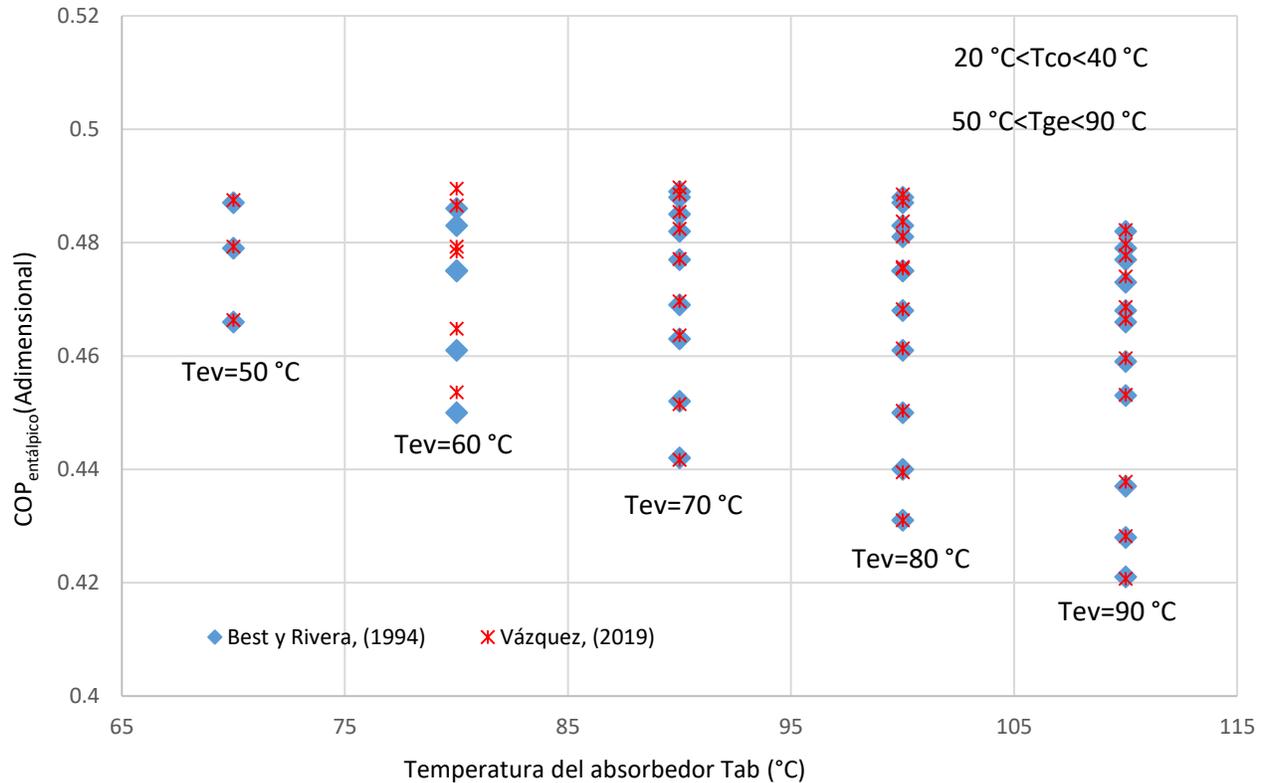


Figura 3.4 COP en función de la temperatura del absorbedor para la mezcla agua-Carrol.

La diferencia entre los datos del artículo y los arrojados por el programa simulado, para la $T_{EV} = 80\text{ °C}$ y $T_{EV} = 60\text{ °C}$, mostrada en las figuras 3.3 y 3.4 respectivamente, posiblemente son causados por la desigualdad en la cantidad de cifras significativas entre ambas muestras de datos.

Para el artículo presentado por Rivera y Romero (1998):

Los autores trabajaron tanto con la mezcla agua-Carrol como con la mezcla agua-bromuro de litio y una configuración en la cual se incluye el economizador. Para la simulación de los datos se trabajó con la mezcla agua-Carrol.

La Figura 3.5 muestra la variación del COP en función del GTL para las siguientes temperaturas de operación $T_{EV} = T_{GE} = 70\text{ °C}$, 75 °C y 80 °C , $T_{CO} = 25\text{ °C}$ y T_{AB} variando de 100 a 140 °C , obteniendo un porcentaje de error para los datos obtenidos de 0.003 a 3.2384% , un coeficiente de determinación del error R^2 de 99.99% , un RMSE de 0.0018157 y un MBE de $3.2970E^{-06}$. Los resultados de los indicadores propuestos para validar los datos muestran la bondad de ajuste de ambos métodos.

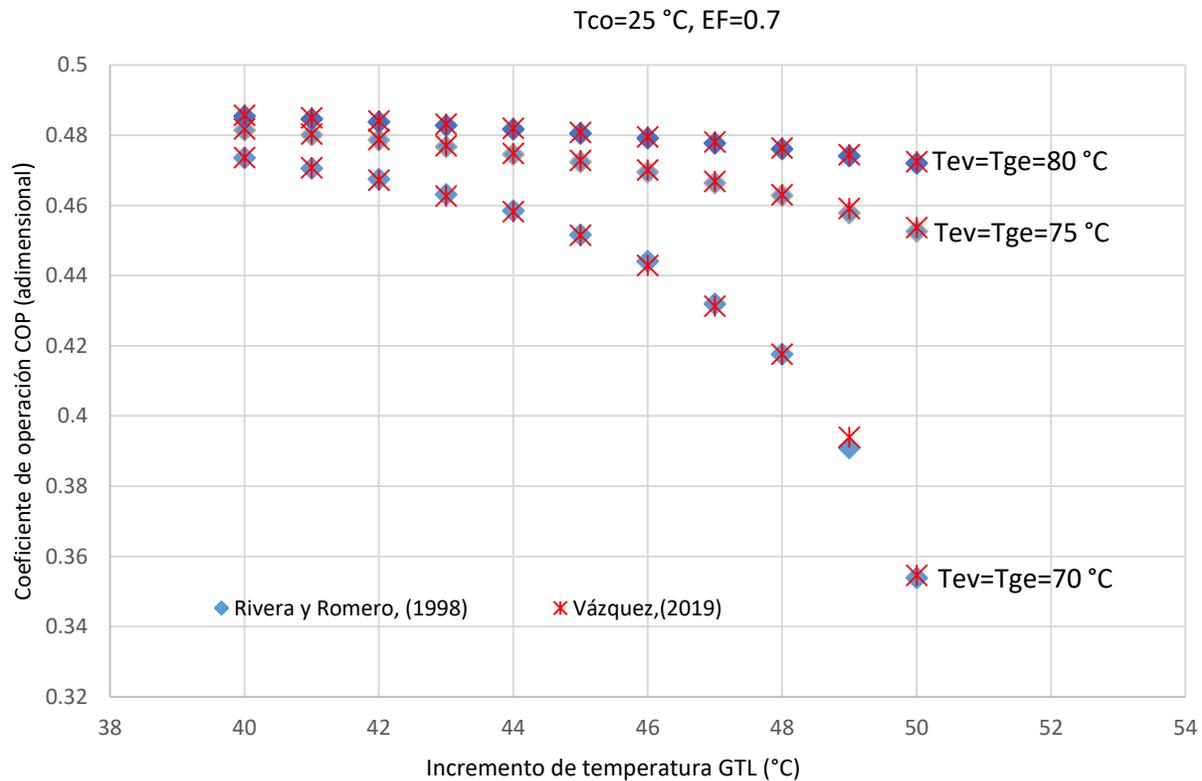


Figura 3.5 COP en función del GTL para la mezcla agua-Carrol.

Tabla 3.2 Comparación de resultados estadísticos de la validación.

Artículos	Desviación (%)	RMSE	MBE	R^2
Eisa <i>et al.</i> (1986) vs Vázquez (2019)	0-5	0.0058	0.000034	0.99612
Best y Rivera (1994) vs Vázquez (2019)	0-4.806	0.004157	0.00001728	0.9998
Rivera y Romero (1998) vs Vázquez (2019)	0.003-3.2384	0.0018157	3.29708E-06	0.9999



CAPÍTULO IV.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1 INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se muestran los resultados de tres efectos presentes en el Transformador Térmico por Absorción que pueden influir en su desempeño. Posteriormente, se expone un caso de estudio que propone al Transformador acoplado a un proceso dentro de la industria textil, utilizando el simulador desarrollado y validado en el capítulo 3, se analiza la cantidad de energía que es posible recuperar, así como los niveles térmicos que se pueden alcanzar utilizando dos soluciones de trabajo, con la finalidad de mostrar la factibilidad del uso de la tecnología para la recuperación de calor industrial y el ahorro de energía primaria en el proceso textil.

4.2 ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE UN TTA CUANDO HAY DIFERENCIA DE TEMPERATURA EN LA FUENTE RESIDUAL.

Para analizar el comportamiento de un Transformador Térmico de una etapa, se utilizó el simulador desarrollado en Matlab con el modelo matemático descrito en el capítulo 3. En el simulador se ingresan los valores de las temperaturas en °C correspondientes a los diferentes componentes del TTA, la cantidad de calor que requiere el evaporador y la eficiencia del economizador. En este caso se utilizó una carga térmica en el evaporador de 1 kW y una eficiencia del economizador $EF = 0.7$, teniendo como referencia el trabajo publicado por Rivera *et al* (1998).

Los intervalos de las temperaturas en grados Celsius (°C), bajo los cuales se realizó el análisis son los siguientes:

$$20\text{ °C} < T_{CO} < 50\text{ °C}, \text{ variando en } 5\text{ °C}$$

$$60\text{ °C} < T_{EV} < 90\text{ °C}, \text{ variando en } 5\text{ °C}$$

$$60\text{ °C} < T_{GE} < 90\text{ °C} \text{ variando en } 5\text{ °C}$$

$$100\text{ °C} < T_{AB} < 150\text{ °C} \text{ variando en } 1\text{ °C}$$

Para el análisis se utilizaron dos soluciones de trabajo: agua-bromuro de litio y agua-Carrol, debido a que se cuenta con las correlaciones para sus propiedades termoquímicas y físicas. En el caso de la mezcla: agua-bromuro de litio se consideró un margen de seguridad ante la cristalización. Esta mezcla cristaliza para concentraciones superiores a 70%, por lo que se tomaron en cuenta solo las condiciones con concentraciones menores a este valor. De manera similar se realizó la simulación para la solución agua-Carrol pero en este caso como la solubilidad es mayor se tomaron en cuenta solo valores de concentraciones inferiores a 80%.

En un TTA existen tres niveles de temperatura cuando se utiliza el mismo calor residual térmico en el evaporador y el generador. Si una corriente de calor residual no es suficiente para operar el evaporador y el generador, puede haber alguna diferencia entre las temperaturas de generación y evaporación. La Figura 4.1 muestra los niveles de temperatura en Transformadores de calor de Absorción para ambos casos (Rivera *et al.* 1994).

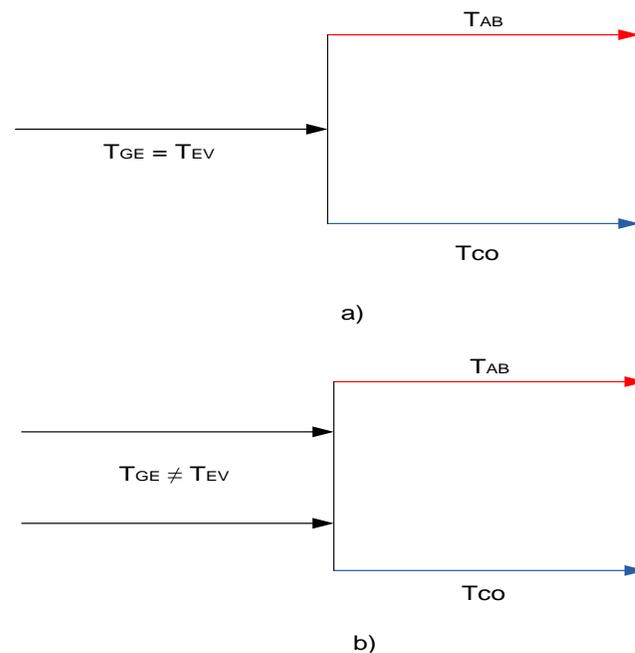


Figura 4.1 Niveles de temperatura en Transformadores Térmicos por Absorción a) Igual temperatura del generador y del evaporador, b) Diferentes temperaturas temperatura del generador y del evaporador.



A continuación se muestra la figura 4.2, donde se comparan el coeficiente de operación entálpico ($COP_{entálpico}$), coeficiente de Carnot (COP_{carnot}) y la relación de flujo (RF) en relación con la temperatura del absorbedor (T_{AB}) para las condiciones de operación mencionadas anteriormente, tanto para la mezcla agua-bromuro de litio como para la mezcla agua-Carrol, manteniendo constante la T_{CO} a 30 °C y trabajando $T_{GE} = T_{EV}$ igual a 70 °C, 75 °C, 80 °C, 85 °C y 90 °C. En la misma se ilustra como los COP_{carnot} y los $COP_{entálpico}$ presentan mayores valores con respecto a menores T_{AB} . Además, es evidente que al incrementar la T_{GE} y T_{EV} para una misma T_{AB} se obtienen mayores COP. Este comportamiento se debe a que al aumentar la temperatura de la fuente residual, la P_{CO} se aumenta y, por lo tanto, también la concentración en el fluido de trabajo (X_{GE}), provocando una mejor absorción.

En la figura 4.2 también se observa que para ambas mezclas de trabajo los COP_{carnot} se comportan de manera similar, mientras que para los $COP_{entálpico}$ no sucede igual. En estos últimos se obtienen T_{AB} superiores cuando se opera con la mezcla agua-Carrol en relación con la mezcla agua-bromuro de litio bajo las mismas condiciones de T_{GE} y T_{EV} . Este comportamiento se ilustra en los diagramas de T-P-C de ambas mezclas de trabajo (Apéndice B y C), en los cuales se observa que la pendiente para una misma recta de concentración de la mezcla agua-bromuro de litio es mayor en comparación con la mezcla agua-Carrol. Esto implica que para aplicaciones que requieran temperaturas de salida superiores bajo las mismas condiciones (T_{CO} , T_{GE} , T_{EV}) la mezcla agua-Carrol ofrece mejores resultados. Se destaca en la misma figura como al aumentar la T_{AB} , la RF presenta también un incremento, producto de la disminución en la diferencia de concentraciones de los fluidos fuerte y débil ($X_{GE}-X_{AB}$), considerando que la RF está definida por la siguiente ecuación:

$$RF = \frac{X_{GE}}{X_{GE} - X_{AB}} \quad (4.1)$$

Así mismo, para iguales T_{AB} se produce una disminución de la relación de flujo al incrementarse las T_{EV} y T_{GE} . Debido a que la RF se define también como la razón de flujo másico desde el absorbedor hacia el generador entre el flujo másico del fluido de trabajo, al incrementarse la T_{AB} se produce un aumento en el flujo proveniente del absorbedor hacia el generador (M_5) y, por lo tanto existe un incremento en la RF. También, al incrementarse la RF se produce una reducción en la ($X_{GE}-X_{AB}$), lo que implica una disminución en el $COP_{entálpico}$ y en la carga térmica de salida en el absorbedor.

Además, se observa que cuando el TTA trabaja con la mezcla agua-bromuro de litio, alcanza valores máximos de T_{EV} y T_{GE} de 70 °C a 80 °C y 75 °C , respectivamente. Sin embargo, con la mezcla agua-Carrol se logra operar con T_{EV} y T_{GE} de 70 °C a 90 °C , respectivamente, por lo que si en la operación de estos equipos, se cuenta con un amplio intervalo de temperatura de la fuente, se puede optar por la mezcla agua-Carrol, mientras que si el intervalo de temperatura de la fuente es limitado entonces se puede operar con la mezcla agua-bromuro de litio.

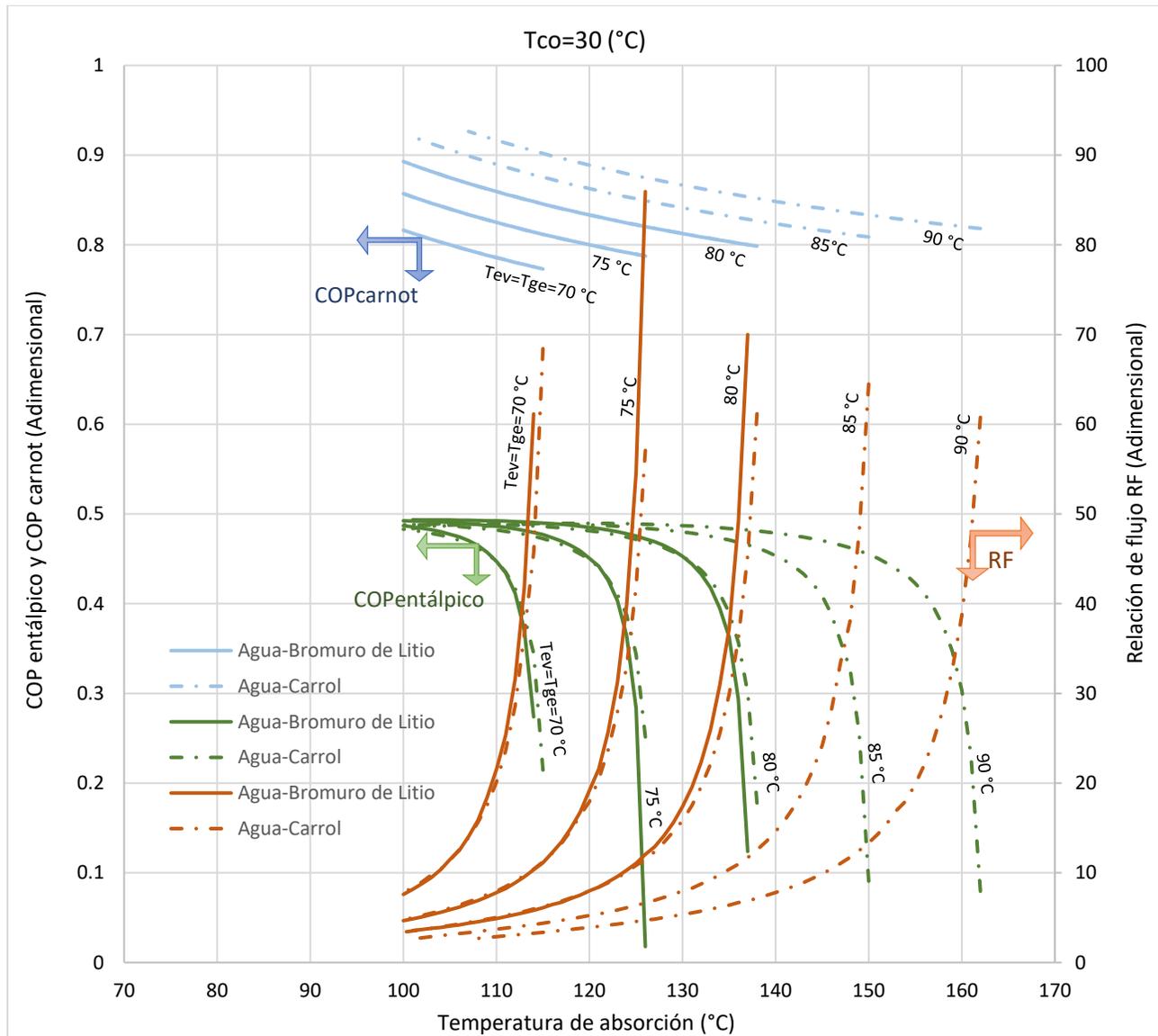


Figura 4.2 Comportamiento del COP_{carnot} , $COP_{entrálpico}$ y RF en relación con la T_{AB} , para una temperatura de condensación de 30 °C tanto para la mezcla agua-bromuro de litio como para la mezcla agua-Carrol.



Como se mencionó anteriormente, en muchos casos las temperaturas de la fuente residual no coinciden ($T_{EV} \neq T_{GE}$). La Figura 4.3 muestra la variación de los coeficientes de operación y la RF en relación con la temperatura del generador a tres diferentes temperaturas de absorción ($T_{AB} = 100\text{ °C}$, 105 °C y 110 °C), operando con ambas mezclas de trabajo. Además, la temperatura de condensación se mantiene constante en 30 °C y la temperatura de evaporación en 70 °C .

En la misma figura 4.3 también se observa que los coeficientes de operación aumentan mientras que la relación de flujo disminuye a medida que aumenta la temperatura del generador. Así mismo, a temperaturas de absorción más bajas se observan coeficientes de operación más elevados. Además, para T_{AB} de 105 °C y 110 °C se obtienen mejores resultados para la mezcla agua-Carrol que para la mezcla agua-bromuro de litio.

Es notorio como en la figura 4.3 en comparación con la figura 4.2 para $T_{EV}=T_{GE} = 70\text{ °C}$ y una T_{AB} de 105 °C se obtiene un $COP_{entálpico}$ de 0.4774. Sin embargo, si se mantienen fijas las T_{EV} , T_{AB} , T_{CO} y variando la T_{GE} (figura 4.3) se observa que bajo estas condiciones, para T_{GE} mayores a 70 °C se obtienen incrementos del $COP_{entálpico}$, logrando alcanzar para una $T_{GE} = 84\text{ °C}$, un valor de $COP_{entálpico}$ igual a 0.4983 para la mezcla agua- bromuro de litio, en el caso de la mezcla agua-Carrol para ese mismo valor de $COP_{entálpico}$ se alcanza una $T_{GE} = 90\text{ °C}$. Este comportamiento indica que a temperaturas de generación por debajo del valor de la temperatura de evaporación se obtienen menores valores del $COP_{entálpico}$ pues a presión del condensador constante al reducirse la T_{GE} disminuye también la X_{GE} y es menor la absorción. De lo contrario, a temperaturas de generación por encima del valor de la temperatura de evaporación se obtienen mayores valores del $COP_{entálpico}$, lo cual es producto de una mayor absorción.

Por lo anterior, es recomendable utilizar diferentes temperaturas de generación y evaporación ($T_{EV} \neq T_{GE}$), cuando la temperatura de generación se encuentre por encima de la temperatura de evaporación, de lo contrario se debe trabajar con temperaturas de igual valor en la fuente residual, con el objetivo de no sacrificar los valores del $COP_{entálpico}$.

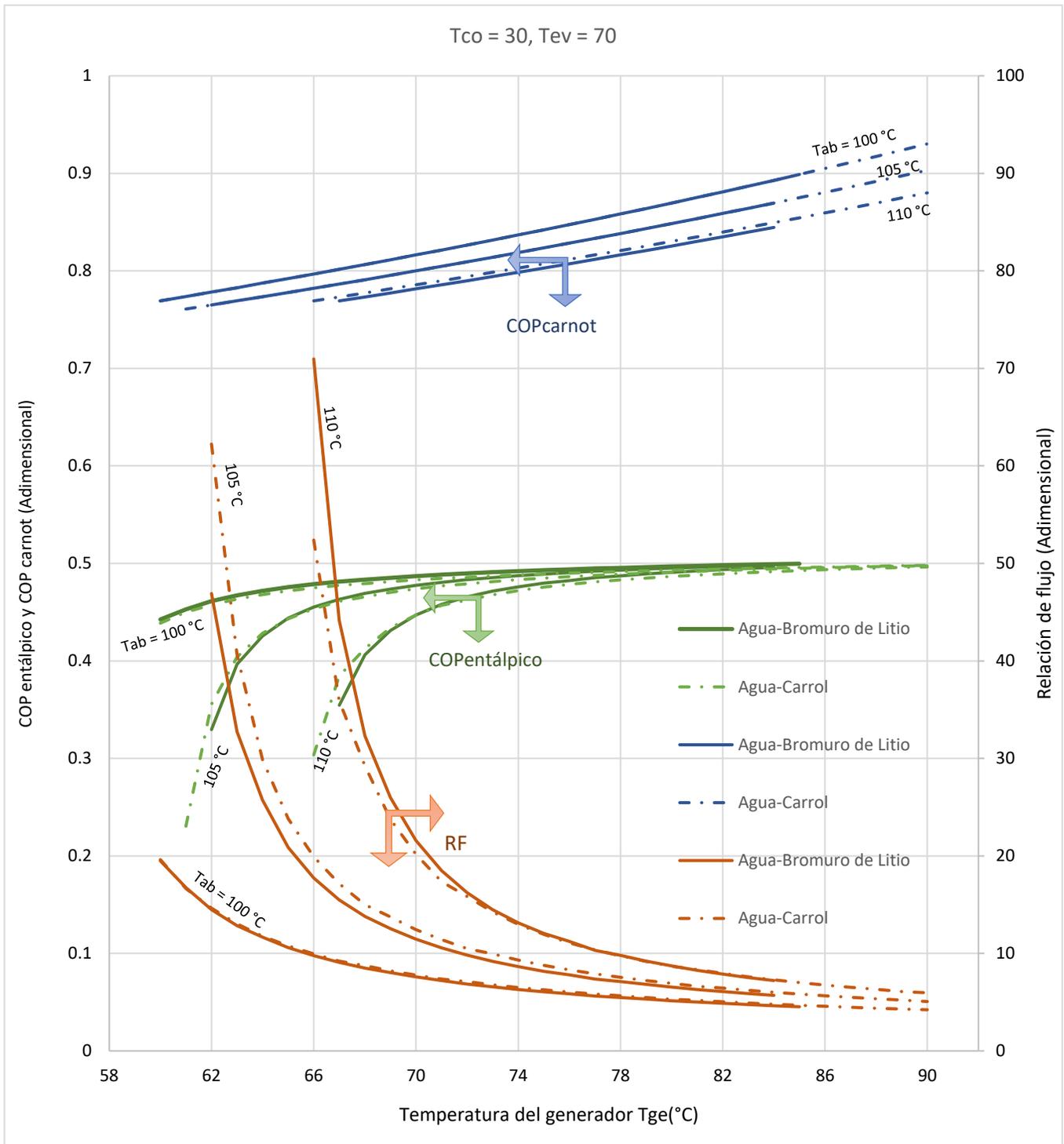


Figura 4.3 Comportamiento del COP_{carnot} , $COP_{entálpico}$ y RF en relación con la temperatura del generador, para una temperatura de condensación de 30 °C y una temperatura de evaporación de 70 °C tanto para la mezcla agua-bromuro de litio como para la mezcla agua-Carrol.



4.3 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA EFICIENCIA DEL ECONOMIZADOR EN EL TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN.

Como se mencionó en el apartado 2.5.2 la incorporación de un economizador en el diseño de un Transformador Térmico por Absorción tiene como objetivo precalentar la solución fuerte de la mezcla de trabajo existente entre el generador y el absorbedor. Dependiendo el grado de recuperación de calor directamente de la eficiencia del economizador. Por esta razón, en este apartado se analizará la influencia que tiene la eficiencia del absorbedor en el coeficiente de operación del Transformador Térmico.

La figura 4.4 muestra el comportamiento del coeficiente de operación en función del incremento de temperatura con posibles eficiencias en el economizador trabajando con la mezcla agua-Carrol y con los siguientes valores de temperatura: $T_{EV} = T_{GE} = 80\text{ °C}$, $T_{CO} = 25\text{ °C}$ y T_{AB} variando de 100 a 140 °C. De manera similar la figura 4.5 ilustra el mismo efecto pero esta vez incrementando la temperatura del condensador a 30 °C.

Como se puede observar, ambas gráficas muestran el mismo comportamiento ante variaciones en la eficiencia del economizador. Esto implica que, para variaciones del GTL inferiores a 33 °C, los valores del coeficiente de operación no varían significativamente por lo cual el uso de un economizador no es recomendable en un diseño, pues encarecería notablemente el costo del equipo sin beneficios reales. Por el contrario, para valores del GTL superiores a 33 °C, se observa como la eficiencia del intercambiador de calor de solución influye directamente en los resultados del coeficiente de operación, resaltando así la importancia del uso este dispositivo de acuerdo a la aplicación que se requiera.



CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

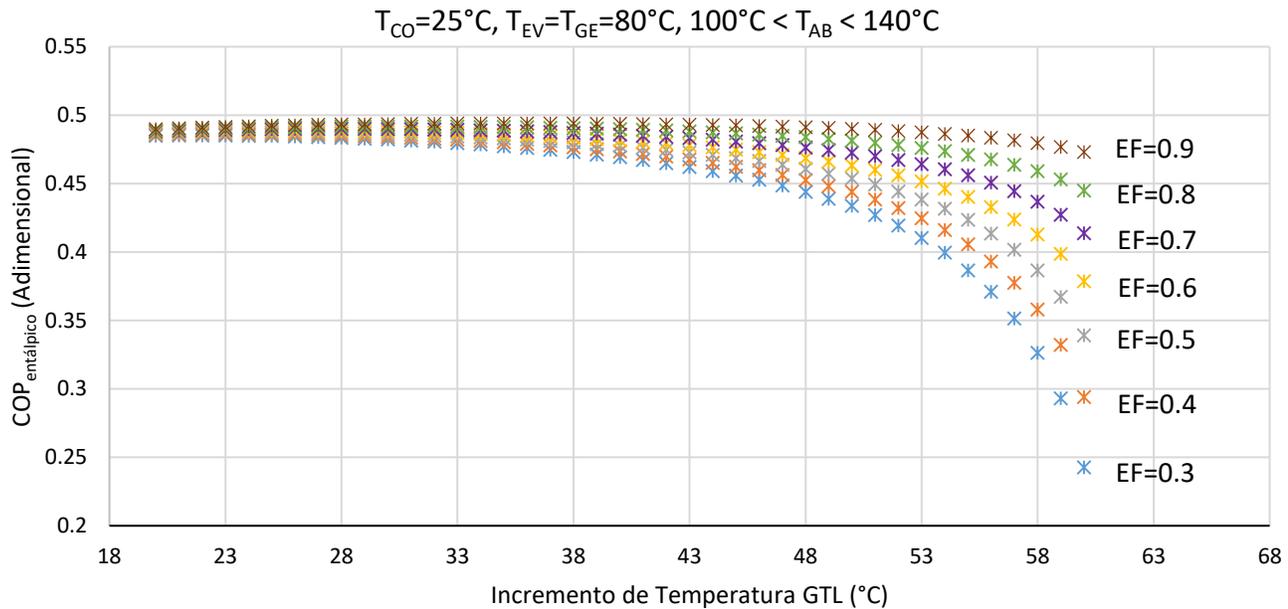


Figura 4.4 Representación del comportamiento de $\text{COP}_{\text{entálpico}}$ en función del GTL variando la eficiencia en el economizador para la mezcla agua-Carrol, para una $T_{co} = 25^{\circ}\text{C}$.

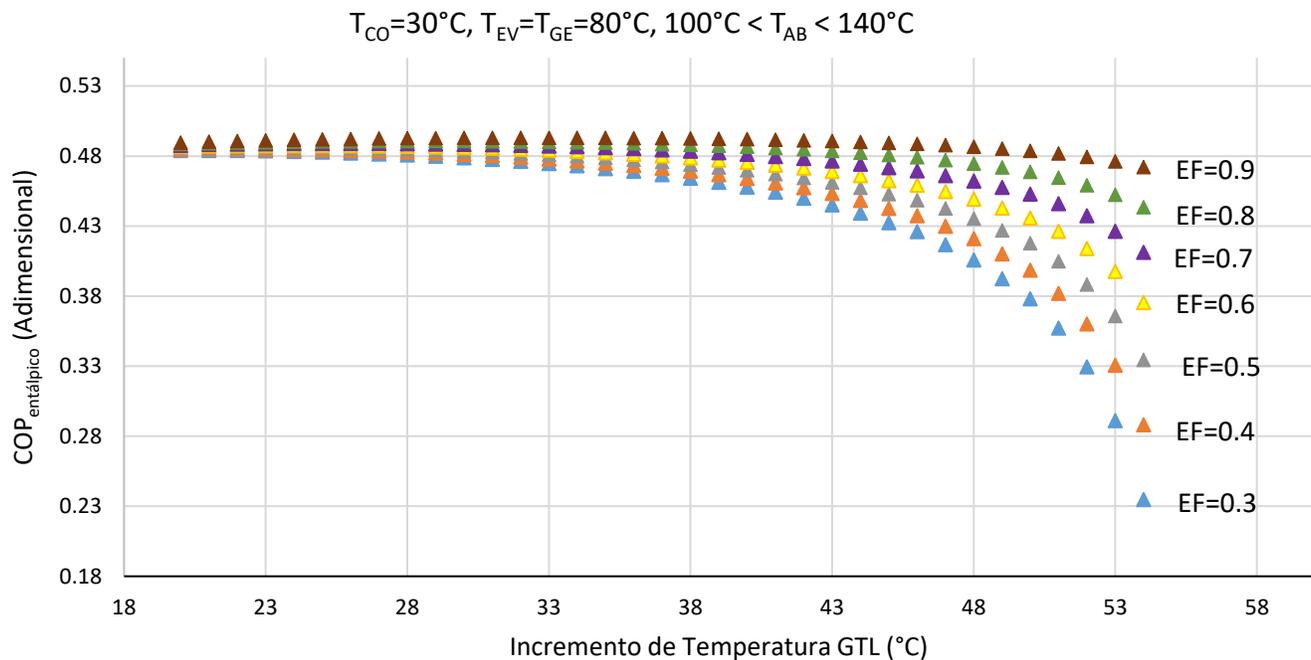


Figura 4.5 Representación del comportamiento de $\text{COP}_{\text{entálpico}}$ en función del GTL variando la eficiencia en el economizador para la mezcla agua-Carrol, para una $T_{co} = 30^{\circ}\text{C}$.



4.4 ESTUDIO DE LA SENSIBILIDAD DE LAS BOMBAS DE OPERACIÓN DENTRO DEL DISEÑO DEL TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN.

De acuerdo a lo referido en la sección 2.6, uno de los parámetros más importantes en el diseño de un Transformador Térmico por Absorción es la relación de flujo (RF), definida como la razón de flujo másico desde el absorbedor hacia el generador entre el flujo másico del fluido de trabajo (Eisa *et al.* 1986).

La figura 4.6 muestra gráficamente el comportamiento del coeficiente de operación y la relación de flujo en función de la temperatura del absorbedor la cual varía de 100 °C a 125 °C para la mezcla agua-bromuro de litio. Además, se mantiene constante la temperatura del condensador en 25 °C y las temperaturas de evaporación y generación iguales a 75 °C.

También en la figura 4.6, se observa que conforme se incrementa la temperatura del absorbedor, se produce un aumento en la relación de flujo, así como una disminución del $COP_{entálpico}$. Este comportamiento se debe a que un incremento la temperatura de absorción a una misma presión en el evaporador produce un aumento en la X_{AB} , y el mantenerse constante la X_{GE} implica una reducción en la diferencia de concentraciones de los fluidos fuerte y débil, incrementándose entonces la RF y provocando una disminución en el coeficiente de operación y en la carga térmica de salida en el absorbedor (Q_{AB}).

Por lo tanto, existe una relación inversa entre la relación de flujo y el coeficiente de operación entálpico a medida que incrementa la temperatura de absorción. Por esta razón el estudio de la relación de flujo es de gran importancia en el desempeño del TTA.

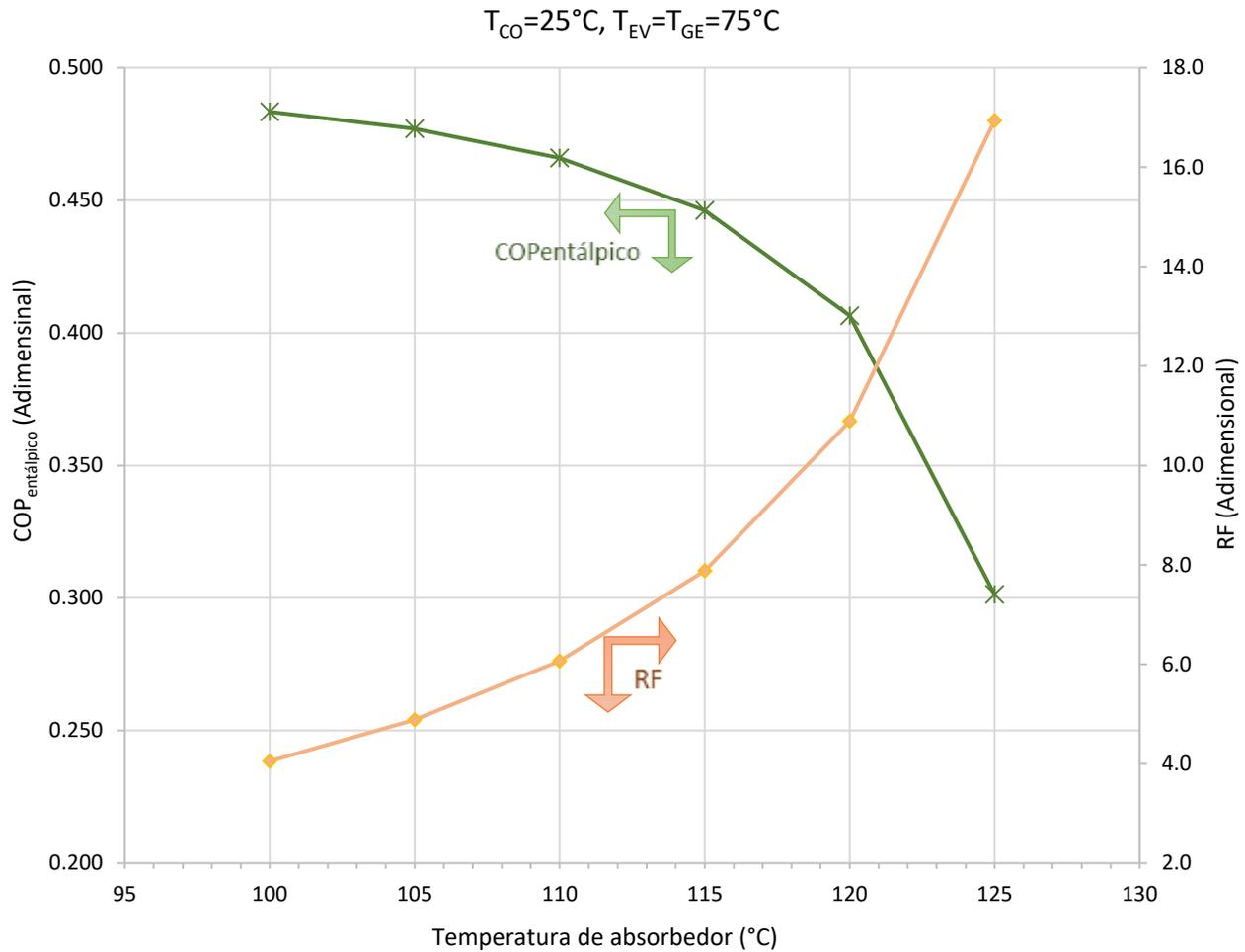


Figura 4.6 Comparación de coeficientes de operación entrálpico y relaciones de flujo en función de la Temperatura del absorbedor para las mezcla agua-bromuro de litio.

En la configuración del Transformador Térmico por Absorción (Figura 2.4), se utilizan 2 bombas en su diseño, la primera bomba se utiliza para impulsar el fluido proveniente del condensador con dirección al evaporador y la segunda bomba se utiliza para desplazar la solución fuerte saliente del generador e ingresarla al absorbedor. Considerando la ecuación (2.8), donde se muestra la dependencia del $\text{COP}_{\text{entrálpico}}$ con respecto al trabajo consumido por las bombas, es necesario un análisis de sensibilidad de estas en el funcionamiento del TTA.



Por lo anterior, se realiza un análisis de sensibilidad para determinar el efecto del trabajo de ambas bombas sobre el coeficiente de operación. Para ello, se toman como referencia la capacidad de las bombas utilizadas físicamente en el Laboratorio de Ingeniería Térmica Aplicada (LITAP) del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP), cada una de 32 W.

La Tabla 4.1 ilustra diferentes temperaturas de absorción en un rango de variación de 100 °C a 125 °C, con intervalos de 5 °C, bajo las condiciones de operación siguientes: temperatura del evaporador y generador iguales a 75 °C y temperatura del condensador a 25 °C. Primero, se calcula el coeficiente de operación sin tener en cuenta el trabajo de las bombas (ecuación 4.2), segundo se realiza el mismo procedimiento pero incluyendo el trabajo de las bombas (ecuación 4.3) y por último, se analiza la variación porcentual de cada una (ecuación 4.4).

$$COP_{\text{entálpico sin bombas}} = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE} + Q_{EV}} \quad (4.2)$$

$$COP_{\text{entálpico con bombas}} = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE} + Q_{EV} + W_1 + RF * W_1} \quad (4.3)$$

$$\% \text{Variación} = \frac{COP_{\text{sin bombas}} - COP_{\text{con bombas}}}{COP_{\text{con bombas}}} * 100 \quad (4.4)$$

Como se puede apreciar, para temperaturas entre 100 °C y 105 °C el porcentaje de variación alcanza solo el 5%, por encima del valor de este rango de temperaturas en el absorbedor, la variación porcentual se incrementa. Por tanto, sería recomendable para temperaturas mayores a los 105 °C considerar el trabajo consumido por las bombas en el cálculo del $COP_{\text{entálpico}}$, ya que afectan el coeficiente de operación con un error mayor al 10%.



Tabla 4.1 Sensibilidad de las bombas en el diseño de un TTA.

Condiciones de operación	T _{AB} (°C)	COP _{entálpico sin bomba}	COP _{entálpico con bomba}	Variación (%)
T _{EV} =T _{GE} =75°C T _{CO} = 25°C	100	0.4830	0.4640	4
	105	0.4770	0.4546	5
	110	0.4660	0.4394	6
	115	0.4460	0.4136	7.3
	120	0.4070	0.3653	10
	125	0.3010	0.2510	16.7

4.5 TEMPERATURAS DE OPERACIÓN DE PROCESOS INDUSTRIALES.

Muchos procesos dentro del sector industrial generan desperdicios energéticos que pueden ser recuperados y reincorporados a un proceso industrial con el fin de reducir las emisiones de gases nocivos al medio ambiente y disminuir la quema de combustibles fósiles. La recuperación de esta energía no solo es vital para la protección del medio ambiente sino que además contribuye al ahorro de energía (Chejne, 2015).

En el sector industrial las oportunidades de recuperación de calor residual dependen de los rangos de temperatura de las fuentes de calor de desecho, clasificándose en: baja, media y alta, de acuerdo al rango de temperatura en que se encuentren. En el caso de fuentes residuales de baja temperatura ($T < 230^{\circ}\text{C}$) existen distintas tecnologías que permiten su recuperación, entre las que se encuentra la bomba de calor por absorción y en particular el TTA.

Diversos procesos en la industria requieren calor a bajas temperaturas de trabajo, la tabla 4.2 muestra un resumen de las diferentes aplicaciones industriales que presentan bajas temperaturas de operación, así como el rango de temperatura correspondiente (Farjana, 2018).

Como se puede observar en la tabla 4.2, muchas operaciones en la industrias trabajan con calor a baja temperatura. La recuperación de calor residual mediante el uso de un TTA es una tecnología viable y factible para proporcionar la temperatura requerida para estos procesos (Farjana, 2018).



CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Tabla 4.2 Principales sectores industriales y sus áreas de aplicación donde se requiere calor de proceso a baja temperatura, clasificados según la etapa del proceso y el rango de temperatura.

Sector	Proceso	Rango de temperatura (°C)	
Químico	Reacciones bioquímicas	20-60	
	Destilación	100-200	
	Compresión	105-165	
	Espesamiento	110-130	
	Cocción	80-100	
Alimentos y bebidas	Blanqueado	60-100	
	Escaldado	45-90	
	Evaporación	40-130	
	Cocción	70-120	
	Pasteurización	60-145	
	Limpieza	60-90	
	Esterilización	100-140	
	Templado	40-80	
	Secado	40-200	
	Lavado	30-80	
	Papel	Blanqueado	40-150
		Desincrustración	50-70
Cocción		110-180	
Secado		95-200	
Metal	Decapado	40-150	
	Desengrasado	20-100	
	Galvanoplastia	30-95	
	Fosfatado	35-95	
	Purga	40-70	
	Secado	60-200	
Caucho y plástico	Precalentamiento	50-70	
	Secado	50-150	
Maquinaria y equipamiento	Tratamiento superficial	20-120	
	Limpieza	40-90	
Textil	Blanqueado	40-100	
	Coloreado	40-130	
	Secado	60-90	
	Lavado	50-100	
	Fijación	160-180	
	Presionado	80-100	
Metal	Calentamiento	~ 180	
	Lavado	~ 160	

Sector	Proceso	Rango de temperatura (°C)
Leche	Presurización	60-80
	Esterilización	100-120
	Secado	120-180
	Concentrados	60-80
	Agua de alimentación	60-90
Conservas	Esterilización	110-120
	Pasteurización	60-80
	Cocción	60-90
Carne	Blanqueado	60-90
	Lavado	60-90
	Esterilización	60-90
Harina y subproductos	Cocción	90-100
	Esterilización	60-80
Subproductos de la madera	Vigas de difusión térmica	80-100
	Secado	60-100
	Pulpa de preparación	120-170
Ladrillos y bloques	Curado	60-140
	Plástica	Preparación
	Destilación	140-150
	Separación	200-220
	Extensión	140-160
	Secado	180-200
	Mezcla	120-140
Automóvil	Calentamiento de agua	~ 90
	Limpieza	~ 120
	Otros procesos	~ 50
Farmacia	Diferentes procesos	7-180
Agricultura	Secado	~ 80
	Calentamiento de agua	~ 90
Cuero	Recubrimiento	~ 80
	Otros procesos	~ 90
Madera	Vapor	70-90
	Decapado	40-70
	Compresión	120-170
	Cocción	80-90
	Secado	40-150



4.6 INDUSTRIA TEXTIL: CASO DE ESTUDIO

4.6.1 Industria textil.

La industria textil es muy significativa para la economía a nivel mundial, tanto en términos de generación de empleo como en exportaciones. A nivel nacional este ramo ha logrado exportar 4,695 millones de dólares anualmente y se ha colocado como el quinto proveedor a nivel mundial (INEGI, 2019).

Según datos mostrados por INEGI (2019), en la producción industrial de México se ha visto una disminución en general de 1.5% aproximadamente, pero los subsectores que se refieren a la producción de textiles y prendas de vestir se mantuvieron con un leve crecimiento durante noviembre de 2018 con respecto al mismo período del año anterior.

Las entidades de México que destacan por ser localidades textiles son: Estado de México, Puebla, Campeche, Hidalgo, Tlaxcala, Yucatán, Chihuahua y Durango.

Debido a la importancia de este sector industrial en la economía nacional, es necesario implementar tecnologías que ahorren la energía desaprovechada en la industria, además de disminuir los contaminantes emitidos a la atmósfera producto de la quema de combustibles fósiles.

Una opción viable para lograr un considerable ahorro de la energía de desecho en la industria textil es la integración de un TTA en un proceso de este sector industrial, aprovechando la energía útil del absorbedor dentro de la misma industria o en otro proceso.

4.6.2 Integración de un Transformador Térmico en la industria textil.

Según CONAGUA (2019), en el Reporte del Clima en México en el mes de abril de 2019, la temperatura promedio global se ubicó 0.93 °C por arriba del promedio del siglo XX, siendo el segundo mes de abril más cálido desde 1880.

En México, durante abril de 2019 la temperatura máxima promedio a nivel nacional fue de 31.5 °C, 1° por arriba del valor promedio histórico (1981-2010). Los valores promedios de temperatura máxima



mayores a 35 °C se presentaron en la vertiente del Pacífico, desde Sonora hasta Chiapas, Península de Yucatán, regiones puntuales del sur de San Luis Potosí y Puebla, mientras que en Baja California, Baja California Sur, Chihuahua, Durango, Estado de México, Tlaxcala y Ciudad de México de valores puntuales de entre 20 °C y 25 °C.

Varias de las industrias textiles en México se encuentran en estados donde el clima es caluroso, según datos reportados por INEGI (2019), lugares como Yucatán en épocas de verano pueden alcanzar temperaturas máximas de hasta 38 °C.

La industria textil presenta diversos procesos que trabajan con temperaturas intermedias como muestra la Tabla 4.3. En algunos procesos se recupera el calor de desecho para reutilizarlo o bien hacer uso de él en algún proceso secundario (Brückner *et al.* 2015).

Tabla 4.3 Procesos dentro la industria textil.

Proceso	Temperatura (° C)
Calefacción en seco	88
Planchado	100
Blanqueado	60-100
Teñido	100-160
Secado	75-250
Vapor	100-130

Como se muestra en la tabla anterior, es posible reutilizar calor en los diferentes procesos dentro de la industria textil y realizar la integración a partir de estos procesos con el TTA.

4.6.3 Caso de estudio: Integración de un TTA de simple etapa acoplado a la industria textil.

La Figura 4.7 muestra un esquema que representa la adaptación del ciclo termodinámico de un TTA simple al sumidero de energía de la industria textil para diferentes procesos.



$20\text{ °C} < T_{CO} < 50\text{ °C}$, variando en 5 °C

$60\text{ °C} < T_{EV} < 90\text{ °C}$, variando en 5 °C

$60\text{ °C} < T_{GE} < 90\text{ °C}$ variando en 5 °C

$100\text{ °C} < T_{AB} < 150\text{ °C}$ variando en 1 °C

Para realizar el análisis se consideran dos soluciones de trabajo: agua-bromuro de litio y agua-Carrol. Para ambas soluciones de trabajo se utilizó el programa desarrollado en Matlab y se realizaron las simulaciones con el software, considerando un margen de seguridad para prevenir la cristalización.

Análisis de resultados:

La Figura 4.8 muestra la variación del coeficiente de operación con respecto a la temperatura del absorbedor, para la operación de un Transformador Térmico por Absorción, con una efectividad en el economizador de 0.7. En la misma figura se representan seis temperaturas diferentes del condensador variando de 30 °C a 50 °C en intervalos de 5 °C , manteniendo constantes e iguales las temperaturas en el evaporador y generador en 80 °C .

En esta gráfica se muestra como el coeficiente de operación disminuye a medida que se incrementa la temperatura del absorbedor lo cual es un comportamiento reportado en la literatura de los Transformadores Térmicos por Absorción Además, al incrementar la temperatura del condensador cuesta más trabajo incrementar la temperatura del absorbedor. Esto ocurre debido a que al elevar la temperatura del condensador operando con la misma temperatura en el generador, aumenta la presión y esto causa que se opere a una concentración menor de absorbente por lo que disminuye la absorción y se obtiene un menor coeficiente de operación, así como una menor temperatura útil en el absorbedor.

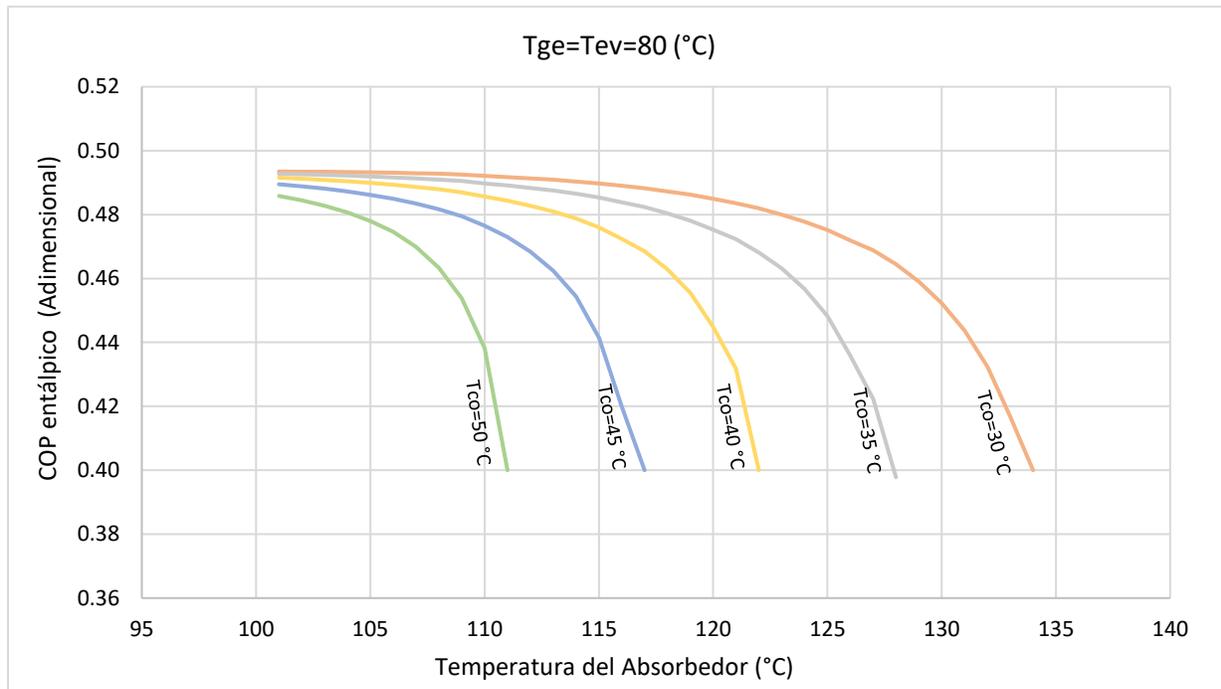


Figura 4.8 Comportamiento del COP_{entálpico} respecto a la temperatura del absorbedor para la mezcla agua-bromuro de litio ($T_{EV} = T_{GE} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$).

Como se puede observar la temperatura de condensación con valores óptimos es a $30 \text{ }^\circ\text{C}$, para un COP_{entálpico} de 0.40 se puede alcanzar una temperatura de absorción de $134 \text{ }^\circ\text{C}$. Sin embargo, para una temperatura de condensación de $50 \text{ }^\circ\text{C}$ teniendo en cuenta el mismo COP_{entálpico} se logra incrementar la temperatura del absorbedor solo hasta $111 \text{ }^\circ\text{C}$. Esto demuestra como al aumentar la temperatura del condensador es más difícil obtener mayores temperaturas de absorción bajo las mismas condiciones. Esto implica un análisis de ubicación geográfica del sistema de recuperación de calor, debido a que en lugares muy calurosos la recuperación será menor, así como la temperatura de salida útil en el absorbedor.

Por tanto, si se requiere trabajar con una temperatura de absorción determinada, mientras menor sea la temperatura de condensación, se obtienen mayores resultados en el comportamiento del COP_{entálpico}. Así mismo, para un mismo COP_{entálpico} a menores temperaturas de condensación se alcanzan las máximas temperaturas de absorción.

En México se tienen antecedentes del diseño del primer TTA comercial de componentes dúplex y geometría helicoidal para recuperación de calor de desecho realizado por la Dra. Morales en colaboración



con la empresa ALDETEC para la industria textil. El proyecto presenta posibilidades futuras de implementarse en Mérida capital de Yucatán, donde se alcanzan en épocas de verano temperaturas muy elevadas (Demesa y Morales. 2016).

De acuerdo con los datos recogidos en el Reporte del Clima en México 2019, en Yucatán la temperatura máxima en épocas de verano es alrededor de 38 °C. Considerando esta estadística, se escogió para realizar el análisis una temperatura de condensación de 40 °C. Aunque, en este caso de estudio además se realiza el análisis a una temperatura de condensación de 30 °C por ser la de mejor comportamiento y con ella comparar los resultados obtenidos.

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran el comportamiento del coeficiente de operación entálpico y de la concentración de la solución concentrada en fluido de trabajo (X_{GE}) en función de la temperatura del generador y evaporador para temperaturas de condensación de 40 °C y 30 °C respectivamente.

En la figura 4.9 se puede observar como el valor de $COP_{entálpico}$ aumenta ligeramente con el incremento de temperatura, alcanzado un $COP_{entálpico}$ máximo de 0.492, cuando se suministran 90 °C. Así como también se observa que a medida que se aumenta la temperatura de generación y evaporación se obtienen mayores valores de X_{GE} , alcanzando para $T_{GE} = T_{EV} = 90$ °C un valor de X_{GE} de 62.15%.

Para la figura 4.10 trabajando con una $T_{CO} = 30$ °C, al incrementar la temperatura de la fuente residual se obtienen resultados similares, sin embargo, para este caso a T_{GE} y T_{EV} mayores a 85 °C se corre el riesgo de cristalización. Alcanzando para una $T_{GE} = T_{EV} = 85$ °C un valor de X_{GE} de 65.02%.

Por lo que, a $T_{CO} = 40$ °C se recomienda trabajar con temperaturas de generación y evaporación por debajo o igual a los 90 °C, mientras que para $T_{CO} = 30$ °C se debe operar con fuentes residuales inferiores a 85 °C ya que en ambos casos a mayores temperaturas se corre el riesgo de cristalizar la solución en el generador, debido a que puede cristalizar a concentraciones mayores de 70%.

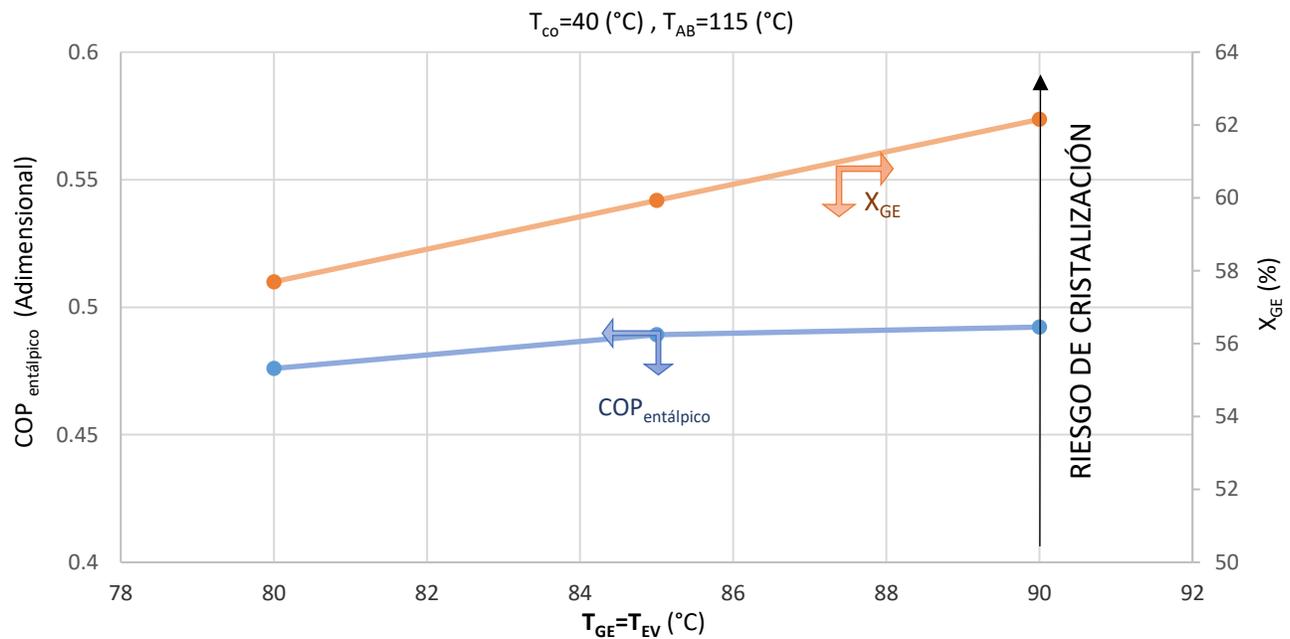


Figura 4.9 Comportamiento del $COP_{entalpico}$ respecto a la fuente suministrada y su riesgo de cristalización para la mezcla agua-bromuro de litio, $T_{co}=40\text{ }^\circ\text{C}$.

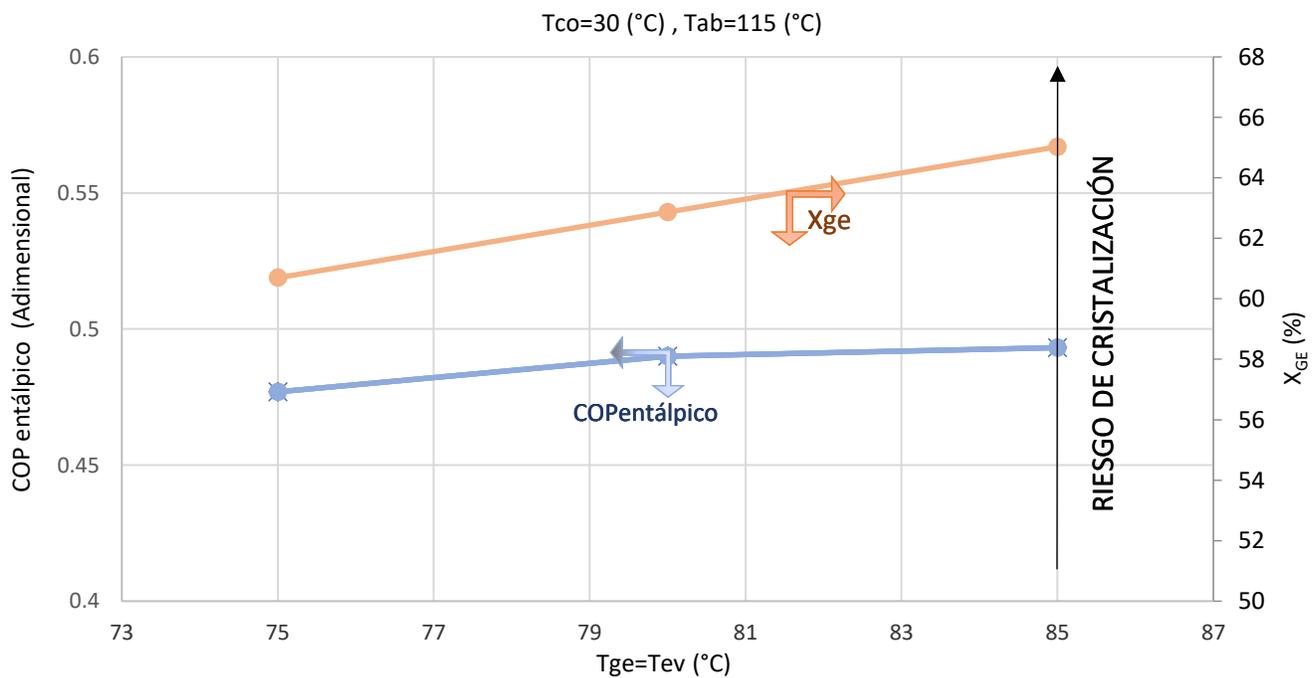


Figura 4.10 Comportamiento del $COP_{entalpico}$ respecto a la fuente suministrada y su riesgo de cristalización para la mezcla agua-bromuro de litio para una $T_{co}=30\text{ }^\circ\text{C}$.



Las figuras 4.11 y 4.12 muestran el coeficiente de operación en función de la temperatura del absorbedor, tanto para la solución de trabajo agua-bromuro de litio como para agua-Carrol, considerando una temperatura del condensador de 40 °C para la figura 4.11 y una temperatura del condensador de 30 °C para la figura 4.12. Ambas soluciones operan con tres condiciones iguales en las temperaturas de generación y evaporación variando en 5 °C, de 80 °C a 90 °C para el primer caso y de 80 °C a 85 °C para el segundo caso.

En ambas figuras se distingue claramente como a medida que se incrementa la temperatura del absorbedor se produce una disminución del coeficiente de operación entálpico para las dos mezclas. Además, se observa como para una misma temperatura de absorción a medida que se incrementa la temperatura de generación y evaporación se logran mayores coeficientes de operación.

En la figura 4.11, se observa que para temperaturas de absorción de 113 °C a 118 °C las temperaturas de generación y evaporación de 85 °C y 90 °C presentan $COP_{entálpico}$ prácticamente invariantes, sin embargo no es así para temperaturas de generación y evaporación de 80 °C bajo las mismas condiciones. En este caso para temperaturas del absorbedor mayores a 118 °C la disminución en el valor del coeficiente de operación se nota que depende en gran medida de las temperaturas de generación y evaporación.

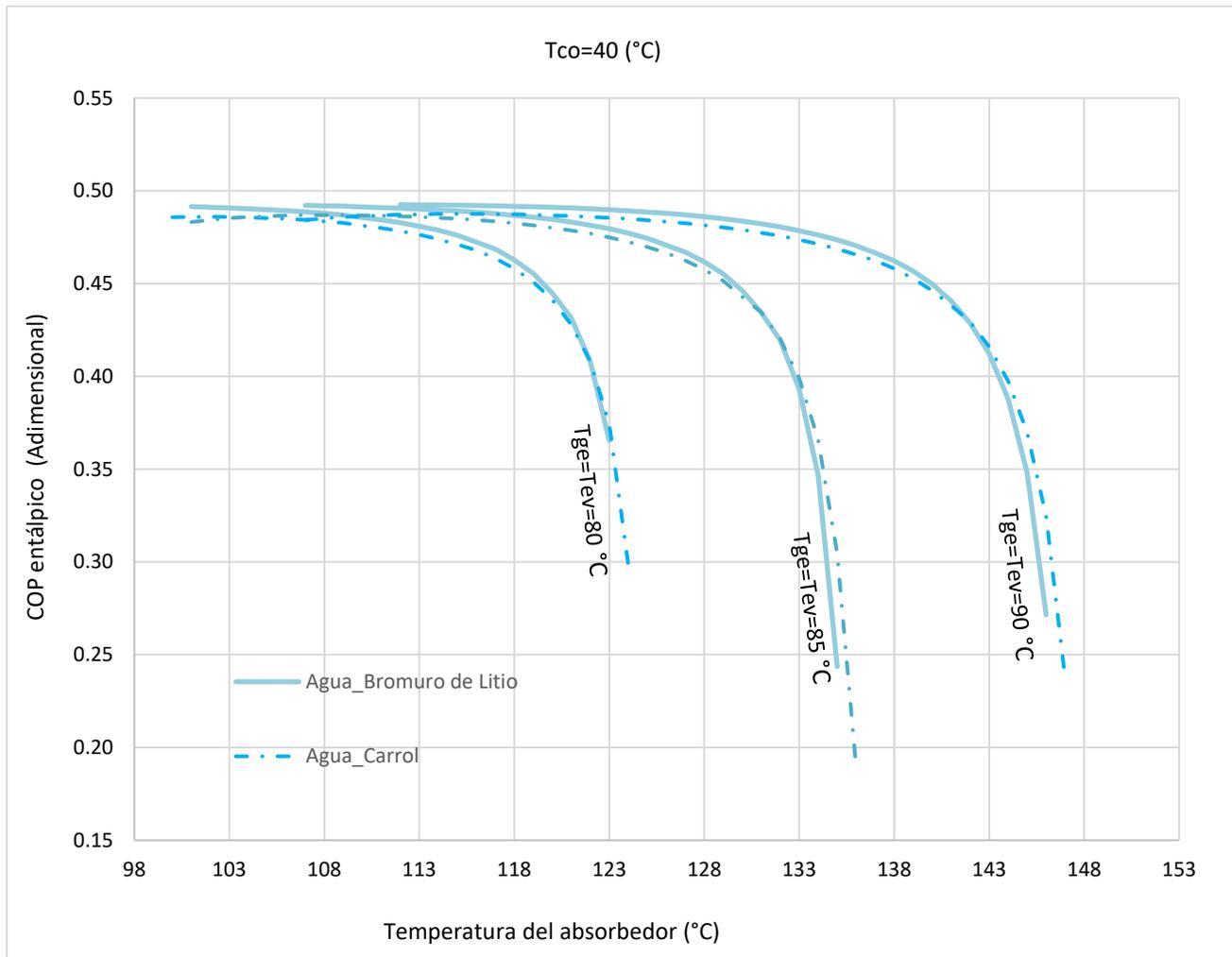


Figura 4.11 Comportamiento del $COP_{entálpico}$ respecto a la temperatura del absorbedor tanto para la solución agua-bromuro de litio como para la solución agua-Carrol, con una $T_{co}=40\text{ }^\circ\text{C}$.

En la gráfica 4.12, debido al riesgo de cristalización que presenta la mezcla agua-bromuro de litio, se observa como para esta solución solo se puede operar el TTA con temperaturas de generación y evaporación de 80 °C, mientras que para la mezcla agua-Carrol se logra operar hasta 85 °C. Operando el TTA con una fuente de residual de 80 °C para la solución agua-bromuro de litio se logra alcanzar un $COP_{entálpico}$ de 0.4 para la máxima temperatura del absorbedor de 134 °C.

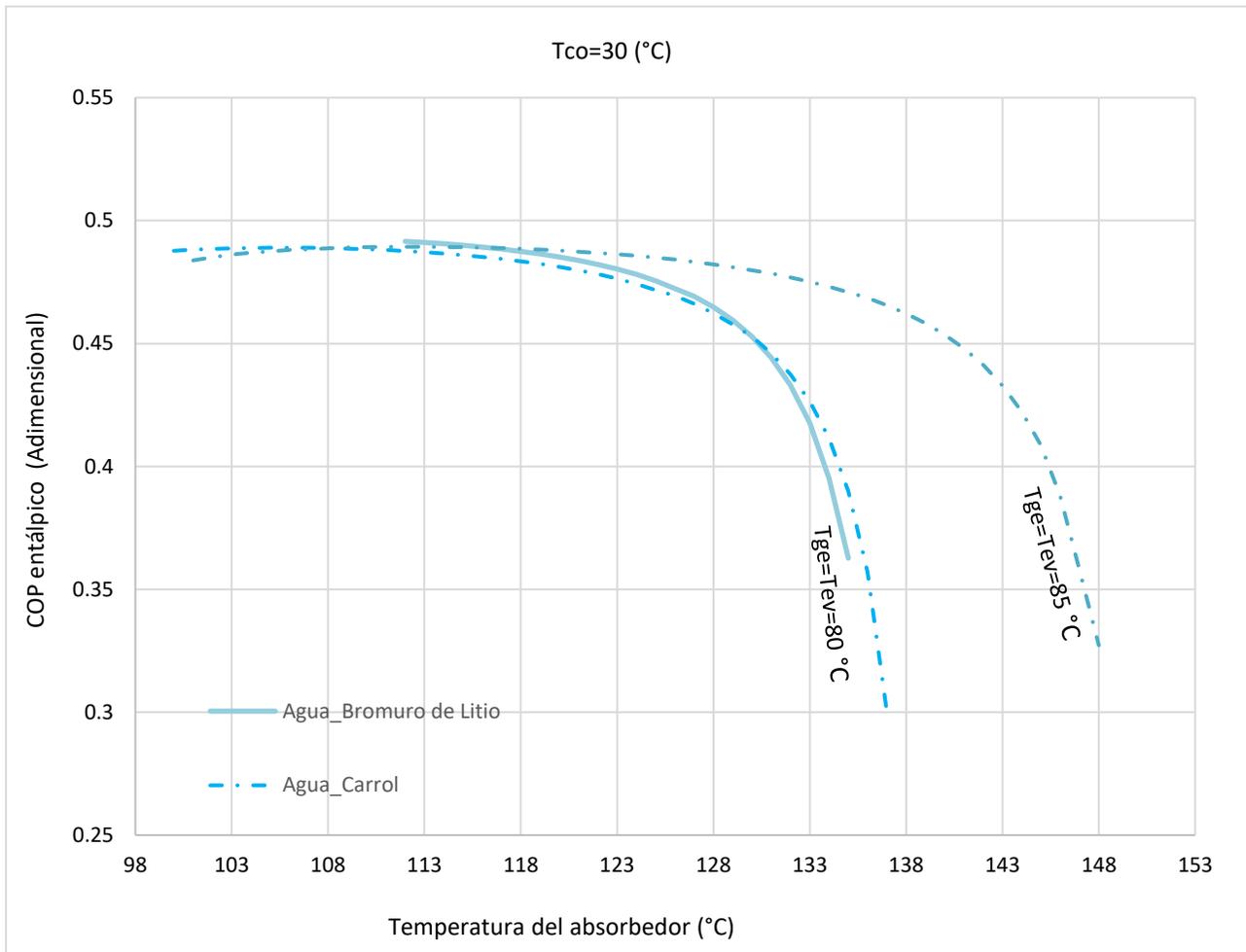


Figura 4.12 Comportamiento del $COP_{entálpico}$ respecto a la temperatura del absorbedor tanto para la solución agua-bromuro de litio como para la solución agua-Carrol, con una $T_{co}=30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Como se mencionó anteriormente debido al riesgo de cristalización que presenta la mezcla agua-bromuro de litio, para una $T_{co} = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, se puede operar el TTA con una $T_{EV}=T_{GE}$ menor $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bajo estas condiciones, realizando una comparación con una $T_{co} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, para un $COP_{entálpico}$ de 0.49, se obtiene una T_{AB} de $119\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la mezcla agua-bromuro de litio, mientras que para la mezcla agua-Carrol apenas se alcanza una T_{AB} de $110\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sin embargo, para $T_{co} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ se puede operar con una $T_{EV}=T_{GE}$ menor o igual a $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, y en este caso para un $COP_{entálpico}$ de 0.49, se obtiene una T_{AB} de $128\text{ }^{\circ}\text{C}$. De acuerdo a este análisis se puede afirmar que



para fuentes de calor residual de igual magnitud se alcanzan mejores resultados para una Tco de 30 °C, por otra parte, para aplicaciones que requieran Tco de 40 °C se logran resultados aceptables aumentando la temperatura de generación y evaporación.

Finalmente, realizando una comparación entre la mezcla agua- bromuro de litio y agua-Carrol en ambas figuras (4.11 y 4.12), se puede observar como a temperaturas de generación y evaporación de 80 °C en la figura 4.11, ambas soluciones se comportan de manera similar, pero a valores superiores a 80 °C la mezcla agua-Carrol ofrece mejores resultados, alcanzando valores ligeramente mayores de temperaturas en el absorbedor. Para la figura 4.12, se observa como hasta valores de COP_{entálpico} de 0.45 la mezcla agua-bromuro de litio ofrece mejores resultados, sin embargo, para valores de COP_{entálpico} menores a 0.45 ocurre lo contrario siendo la mezcla agua-Carrol la que alcanza valores ligeramente mayores de temperaturas en el absorbedor, además que se puede operar con fuente residual de 85 °C.

Análisis de recuperación de calor:

De acuerdo a la Tabla 4.3, es posible reutilizar calor en los diferentes procesos dentro de la industria textil y realizar la integración a partir de estos procesos con el Transformador Térmico por Absorción. La Tabla 4.4 muestra detalladamente las temperaturas de los procesos y algunos equipos utilizados dentro de la industria textilera y que pueden integrarse al TTA (Lockuán, 2012).

Tabla 4.4 Procesos y maquinarias utilizados en la industria textil y que se pueden integrar a un TTA.

Proceso y maquinaria utilizada	Temperatura máxima de trabajo (°C)
(1) Secado (Por contacto con superficies metálicas)	120 -130
(2) Teñido (Máquina teñidora de madejas de hilo)	110
(3) Teñido (Máquinas presurizadas (HT) proceso discontinuo)	130
(4) Teñido (Máquinas teñidora de tejidos en bobinas)	140
(5) Teñido (Máquinas JET)	135-140
(6) Producción de vapor	100-130
(7) Planchado	100



Finalmente, la Tabla 4.5 muestra un resumen del calor que se puede recuperar de acuerdo a las condiciones de operación térmicas del TTA para un flujo de calor de entrada de 283.46 kW, tanto para la mezcla agua-bromuro de litio como para agua-Carrol. En este análisis también se toma en cuenta en el valor del calor recuperado el consumo eléctrico del TTA producido por las bombas de operación de aproximadamente 13 kW cada una, lo cual representa un 9% de la carga total del sistema. Además, se presenta para cada condición los rangos de temperaturas de salida útil y los coeficientes de operación entálpico. Resaltando para cada mezcla el mejor resultado de operación obtenido.

Para cada temperatura de salida del TTA, este se puede acoplar a los diferentes procesos textiles mencionados considerando el tipo de aplicación requerida y las condiciones de operación. De manera general se puede recuperar de un 30% a un 50% del calor residual existente en este sector dependiendo del proceso, lo que implica un gran ahorro energético.

Como se puede observar en la tabla 4.5, trabajando con la mezcla agua – bromuro de litio y una T_{CO} de 30 °C para una fuente residual de 80 °C, se logra alcanzar una temperatura máxima de absorción de 134 °C, un COP máximo de 0.493 y se logra recuperar una cantidad de calor de 114 kW. Este caso es una de las mejores condiciones teniendo en cuenta que trabaja con una menor T_{CO} , sin embargo solo es posible su operación para $T_{GE}=T_{EV}= 80$ °C.

Como se comentó en los resultados anteriores mientras menor es la T_{CO} bajo las mismas condiciones de operación se logran mejores resultados. Esto se puede comprobar en la tabla 4.5 como trabajando el TTA con la solución agua – bromuro de litio para una $T_{GE}=T_{EV}=85$ °C y $T_{CO}=35$ °C se obtienen temperaturas máxima de absorción de 140 °C, un COP máximo de 0.493 logrando recuperar una cantidad de calor de 114 kW, mientras que para una $T_{CO}=50$ °C se alcanzan T_{AB} máximas de 122 °C, un COP máximo de 0.488 y se recupera una cantidad de calor de 112 kW. De igual manera con una $T_{GE}=T_{EV}=90$ °C, para una $T_{CO}=35$ °C se logran alcanzar temperaturas máximas de absorción de 150 °C, un COP máximo de 0.493 y se logra recuperar una cantidad de calor de 114 kW, mientras que para una $T_{CO}=50$ °C se alcanzan T_{AB} máxima de 132 °C, un COP máximo de 0.491 y se recupera una cantidad de calor de 113 kW. Resultando para una $T_{GE}=T_{EV}=85$ °C y $T_{GE}=T_{EV}=90$ °C la opción de mejor resultado la que opera con un $T_{CO}=35$ °C.



Además, se puede observar como para una $T_{CO}=35\text{ °C}$, trabajando con la mezcla agua- bromuro de litio mientras mayor es el valor de la fuente residual mejores resultados se alcanzan. Siendo en este caso, la mejor opción para una $T_{CO}=35\text{ °C}$ trabajar con una fuente residual de 90 °C .

En el caso de la mezcla agua – Carrol, para una $T_{GE}=T_{EV}=80\text{ °C}$ y $T_{CO}=30\text{ °C}$ se obtienen resultados máximos de T_{AB} de 136 °C , COP de 0.487 y recuperación de calor de 112 kW, mientras que para $T_{CO}=50\text{ °C}$ apenas se logran máximos de T_{AB} de 112 °C , además de COP de 0.48 y recuperación de calor de 110 kW. Así mismo, para una $T_{GE}=T_{EV}=85\text{ °C}$, para una $T_{CO}=30\text{ °C}$ se logran alcanzar temperaturas máxima de absorción de 148 °C , un COP máximo de 0.484 y se logra recuperar una cantidad de calor de 111 kW, mientras que para una $T_{CO}=50\text{ °C}$ se alcanzan T_{AB} máxima de 133 °C , un COP máximo de 0.483 y se recupera una cantidad de calor de 111 kW. Bajo esta condición de $T_{CO}=30\text{ °C}$, el sistema no puede operar con una fuente residual de 90 °C . Por tanto, para una $T_{GE}=T_{EV}=80\text{ °C}$ y $T_{GE}=T_{EV}=85\text{ °C}$ la opción de mejor resultado la que opera con un $T_{CO}=30\text{ °C}$.

Trabajando con esta misma mezcla podemos observar como para $T_{CO}=35\text{ °C}$, donde ya se puede trabajar con fuente residual de 90 °C , la mejor opción se alcanza a mayor temperatura de la fuente residual. Siendo en este caso la de mejor opción cuando se opera el TTA con $T_{GE}=T_{EV}=90\text{ °C}$ y $T_{CO}=35\text{ °C}$.



CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Tabla 4.5 Resumen de la cantidad calor recuperado acuerdo a las condiciones de operación para ambas mezclas de trabajo.

Calor de entrada (kW)	Consumo de electricidad del TTA (kW)	Mezclas de trabajo	$T_{EV}=T_{GE}$ (°C)	T_{CO} (°C)	Rango de temperatura de salida T_{AB} (°C)	$COP_{entálpico}$ (adimensional)	Cantidad de calor recuperado considerando el consumo eléctrico (kW)	Proceso donde se puede ingresar
283.46	26	agua- bromuro de litio	80	30	101-134	0.395-0.493	86-114	(1),(2),(3),(6)
				35	101-128	0.356-0.492	75-113	(2),(7)
				40	101-122	0.366-0.491	78-113	(2),(7)
				45	101-117	0.386-0.489	83-112	(2),(7)
				50	101-111	0.40-0.486	87-112	(2),(7)
			85	30	-	-	-	-
				35	107-140	0.346-0.493	72-114	(1),(2),(3),(4),(5)
				40	107-134	0.347-0.492	72-113	(1),(2),(3)
				45	107-128	0.356-0.491	75-113	(2)
				50	107-122	0.373-0.488	80-112	(2)
			90	30	-	-	-	-
				35	112-150	0.389-0.493	84-114	(1),(3),(4),(5)
				40	112-145	0.348-0.492	73-113	(1),(3),(4),(5)
				45	112-139	0.339-0.492	70-113	(1),(3)
				50	112-132	0.4-0.491	87-113	(1),(3)
			agua- Carrol	80	30	100-136	0.3-0.487	59-112
		35			100-129	0.33-0.486	68-112	(2),(7)
		40			100-124	0.32-0.485	65-111	(2),(7)
		45			100-118	0.31-0.484	62-111	(2),(7)
		50			100-112	0.345-0.48	72-110	(2),(7)
		85		30	101-148	0.33-0.484	68-111	(1),(2),(3),(4),(5),(6),(7)
				35	101-141	0.34-0.483	70-111	(1),(2),(3),(4),(5),(6),(7)
				40	101-135	0.31-0.482	62-111	(1),(2),(3),(6),(7)
				45	101-128	0.365-0.482	77-111	(2),(7)
				50	101-123	0.30-0.482	59-110	(2),(7)
		90		30	-	-	-	-
				35	107-150	0.41-0.485	90-111	(1),(2),(3),(4),(5)
			40	107-145	0.38-0.484	82-111	(1),(2),(3),(4),(5)	
45	107-139		0.37-0.484	79-111	(1),(2),(3)			
50	107-133		0.36-0.483	76-111	(1),(2),(3)			



4.7 ANÁLISIS DE LAS EMISIONES DE CO₂ AL MEDIO AMBIENTE DEL PROCESO DE TINTURA Y ACABADO DE UNA EMPRESA TEXTIL.

En el análisis de las emisiones de CO₂ emitidas al medio ambiente se tomará como referencia los datos reportados por Restrepo (2006) en el proceso de planchado de la empresa Carolina S.A. En este proceso se utiliza una caldera con una eficiencia de 84.9% para producir vapor mediante el uso de combustóleo, lo cual genera grandes cantidades de CO₂ al ambiente.

Análisis de emisiones de CO₂ considerando combustóleo como combustible en la caldera:

Para realizar este estudio primeramente se debe conocer la cantidad de combustóleo utilizada para el proceso de planchado y para ello se usarán las ecuaciones 4.5 y 4.6:

$$Q = m * \Delta H \quad (4.5)$$

$$m = \frac{Q}{\Delta H} \quad (4.6)$$

Donde:

- m: Flujo másico [kg/h];
- ΔH: Poder calorífico del combustóleo [MJ/kg];
- Q: Cantidad de energía liberada por unidad de tiempo [MJ/h].

En la ecuación 4.5, ΔH representa el poder calorífico del combustible, el cual se define como *la cantidad de calor liberado cuando se quema por completo una unidad de combustible y los productos de la combustión se enfrían a la temperatura ambiente*. Por ejemplo, el poder calorífico promedio del carbón es alrededor de 28 000,000 kJ/ton (es decir, se liberan 28 000,000 kJ de calor al quemar una tonelada de carbón). Mientras Q representa *la cantidad de energía por unidad de tiempo*, esto es, calor desechado al medio ambiente durante el proceso de combustión de cualquier combustible, esto implica cierto nivel de contaminación térmica, además de las emisiones de CO₂ (Cengel, Boles y Kanoglu, 2018).



En la ecuación 4.6 se muestra el despeje del flujo másico (m), que representa la cantidad de combustible que se requiere suministrar a la caldera por cada hora de funcionamiento.

Por lo anterior, sustituyendo valores en la ecuación 4.6 se podrá conocer el consumo de combustóleo en el proceso de planchado. Considerando el poder calorífico del combustóleo (ΔH) y la cantidad de energía (Q) con valores de 42.2772 MJ/kg y 188.4 MJ/h, respectivamente (Restrepo, 2006), se obtiene:

$$m = \frac{188.4 \text{ MJ/h}}{42.2772 \text{ MJ/kg}}$$

$$m = 4.4564 \text{ kg/h}$$

Una vez determinada la cantidad de combustóleo requerida en el proceso (4.4564 kg/h), se debe calcular el valor de las emisiones de CO_2 equivalentes de acuerdo al factor de emisiones (FE), en este caso del combustóleo con la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones [tCO}_2\text{equivalentes]} = (\text{FE}) * \text{Consumo de combustible} \quad (4.7)$$

Donde:

FE: Factor de emisiones del combustóleo [kg de CO_2 /kg de combustóleo]. Considerando un FE de 3.05 kg de CO_2 /kg para el combustóleo (INECC, 2014).

Entonces, sustituyendo en la ecuación 4.7, el cálculo de emisiones sería:

$$\text{Emisiones [kgCO}_2\text{equivalentes]} = \left(3.05 \text{ kg de } \frac{\text{CO}_2}{\text{kg de combustóleo}}\right) * \left(4.4564 \text{ kg de } \frac{\text{kg de combustóleo}}{\text{h}}\right)$$

$$\text{Emisiones [kgCO}_2\text{equivalentes]} = 13.592 \text{ kg de } \frac{\text{CO}_2}{\text{h}}$$



Estas emisiones de kg de CO_{2equivalentes} calculadas anteriormente son en una hora, por lo que multiplicando por 24 se obtienen las emisiones de kg de CO_{2equivalentes} por día y multiplicando por 365, se obtienen las emisiones de kg de CO_{2equivalentes} por año, las cuales serían de 119006.44 kg CO_{2equivalentes} o 119 tCO_{2equivalentes/año}.

Análisis de emisiones de CO₂ considerando gas LP como combustible en la caldera

Realizando la metodología antes mencionada y considerando el gas LP como combustible en la caldera, que posee un poder calorífico de 45.72 MJ/kg (Soriano, 2018) y haciendo uso de la ecuación 4.6 se obtiene la cantidad de gas LP requerido para el proceso:

$$m = \frac{188.4 \text{ MJ/h}}{45.72 \text{ MJ/kg}}$$

$$m = 4.12 \text{ kg/h}$$

Luego, utilizando la ecuación 4.7 se puede calcular el valor de las emisiones de CO_{2equivalentes}, de acuerdo al factor de emisiones (FE) para el gas LP, el cual tiene un valor de 2.96 kg de CO₂/kg de gas LP (INECC, 2014).

$$\text{Emisiones [kgCO}_{2\text{equivalentes}}] = \left(2.96 \text{ kg de } \frac{\text{CO}_2}{\text{kg de gas LP}}\right) * \left(4.12 \text{ kg de } \frac{\text{kg de gas LP}}{\text{h}}\right)$$

$$\text{Emisiones [kgCO}_{2\text{equivalentes}}] = 12.195 \text{ kg de } \frac{\text{CO}_2}{\text{h}}$$

Estas emisiones se multiplican por 24 y luego por 365 y se obtienen las emisiones de CO_{2equivalentes} por año, las cuales serían de 106.83 tCO_{2equivalentes/año}.



Análisis de emisiones de CO₂ considerando Gas Natural como combustible en la caldera.

Al igual que en los casos anteriores, si se considera ahora el Gas Natural (GN) como combustible en la caldera, el cual posee un poder calorífico de 45.03 MJ/kg (Cengel, Boles y Kanoglu, 2018). Mediante la ecuación 4.6 se obtiene:

$$m = \frac{188.4 \text{ MJ/h}}{45.03 \text{ MJ/kg}}$$

$$m = 4.184 \text{ kg/h}$$

Finalmente, de acuerdo con la ecuación 4.7 se obtienen las emisiones de CO_{2equivalentes} para este combustible, considerando un factor de emisiones (FE) del gas natural con un valor de 2.69 kg de CO₂/kg de gas natural (INECC, 2014).

$$\text{Emisiones [kgCO}_{2\text{equivalentes}}] = \left(2.69 \text{ kg de } \frac{\text{CO}_2}{\text{kg de gas natural}} \right) * \left(4.184 \text{ kg de } \frac{\text{kg de gas natural}}{\text{h}} \right)$$

$$\text{Emisiones [kgCO}_{2\text{equivalentes}}] = 11.255 \text{ kg de } \frac{\text{CO}_2}{\text{h}}$$

Realizando el mismo procedimiento descrito en los dos casos anteriores se obtienen las emisiones de kg de CO_{2equivalentes} por año, las cuales serían de 98593.8 kg CO_{2equivalentes} o 98.593 tCO_{2equivalentes}/año.

La tabla 4.6 muestra un resumen de las emisiones de CO_{2equivalentes} emitidas al año de acuerdo a los diferentes combustibles analizados. En la misma se puede observar que utilizando como combustible el combustóleo se generan mayores emisiones de CO_{2equivalentes} al medio ambiente en el año respecto al uso del gas LP y el gas natural, siendo este último el de menor valor de emisiones de CO_{2equivalentes} en el año.



CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN



Tabla 4 6 Emisiones de CO₂equivalentes emitidas al año referente a los diferentes combustibles utilizados.

Tipo de combustible	Emisiones de CO₂equivalentes/año
Combustóleo	119 toneladas
Gas LP	106.83 toneladas
Gas Natural	98.593 toneladas



CAPÍTULO V.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS.

CONCLUSIONES

Como conclusiones principales de este trabajo de investigación se tienen las siguientes:

- Se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva y se encontraron 4 trabajos de Transformadores Térmicos por Absorción acoplados a procesos industriales para recuperación de calor. Lo cual representa un área de oportunidad para realizar investigación en el campo de las aplicaciones industriales.
- Se estudió, analizó y comprendió el funcionamiento de un TTA para plantear el modelo termodinámico, considerando todas las variables y parámetros de operación de un TTA.
- Se desarrolló un código computacional mediante el software MatLab para simular las condiciones de operación de un TTA en aplicaciones industriales.
- Se verificó y validó el simulador desarrollado con los resultados de los modelos termodinámicos publicados por Eisa *et al.* (1986), Rivera *et al.* (1994), Rivera y Romero (1998), se concluye que el modelo termodinámico programado en MatLab reproduce con muy buena precisión los resultados publicados y por lo tanto es confiable para simular otras condiciones de operación.
- Se realizó el análisis del desempeño de un TTA cuando existen iguales temperatura en la fuente residual. Considerando una carga térmica en el evaporador de 1 kW y una eficiencia del economizador $EF = 0.7$ para ambas mezclas, agua-bromuro de litio y agua-Carrol. De este análisis se determinó que:



- Al incrementar la fuente residual para un mismo valor de temperatura de salida se obtiene un mayor rendimiento de operación del TTA.
- Si en la operación de los TTA, se cuenta con un amplio intervalo de temperatura de la fuente, se puede optar por la mezcla agua-Carrol, mientras que si se está limitado entonces se puede operar con la mezcla agua-bromuro de litio.

También se analizó el rendimiento de un TTA cuando existen diferencias de temperatura en la fuente residual y se concluyó lo siguiente:

- Es recomendable utilizar diferentes temperaturas de generación y evaporación ($T_{EV} \neq T_{GE}$), cuando la temperatura de generación se encuentre por encima de la temperatura de evaporación, de lo contrario se debe trabajar con temperaturas de igual valor en la fuente residual, con el objetivo de no sacrificar los valores del $COP_{entálpico}$.
- Respecto a la inclusión de un economizador en el diseño de un Transformador Térmico por Absorción se mostró que para variaciones del GTL inferiores a 33 °C, los valores del COP no varían significativamente por lo cual el uso de un economizador no es recomendable en su diseño. Sin embargo, para valores de incremento de temperatura superiores a 33 °C, la eficiencia del intercambiador de calor de solución influye directamente en los resultados del coeficiente de operación.
- Se desarrolló un análisis de la sensibilidad de las bombas respecto al coeficiente de operación y se encontró que sería recomendable tener en cuenta el trabajo consumido por las bombas para temperaturas mayores a los 105 °C ya que pueden afectar el coeficiente de operación.
- Si se requiere trabajar con una temperatura de absorción determinada dentro del intervalo de temperatura estudiado (100 °C – 150 °C), mientras menor sea la temperatura de condensación, se obtienen mayores resultados en el comportamiento del $COP_{entálpico}$. Así mismo, para un mismo $COP_{entálpico}$ a menores temperaturas de condensación se alcanzan las máximas temperaturas de absorción.



- Para temperaturas $T_{co}=40\text{ °C}$ se recomienda trabajar con temperaturas de generación y evaporación por debajo o igual a los 90 °C , mientras que para $T_{co}=30\text{ °C}$ se debe operar con fuentes residual menor a 85 °C ya que en ambos casos a mayores temperaturas se corre el riesgo de cristalizar la solución en el generador, debido a que puede cristalizar a concentraciones mayores de 70%.
- Para lugares con temperaturas ambientes superiores a 40 °C no se recomienda utilizar esta tecnología.
- Además, se concluye que utilizando la mezcla agua- Carrol se logra trabajar con mayores temperaturas en el absorbedor en comparación con la mezcla agua-bromuro de litio para temperaturas generación- evaporación y coeficientes de operación similares.
- En cuanto al análisis de recuperación de calor considerando las condiciones de operación para ambas mezclas de trabajo, resultan como mejores opciones:
 - Para la mezcla agua-bromuro de litio las condiciones de operación son: $T_{EV}=T_{GE} = 80\text{ °C}$, $T_{CO} = 30\text{ °C}$, alcanzado una T_{AB} máxima de 134 °C , así como un $COP_{entálpico\ máximo}$ de 0.493, logrando una recuperación de calor de 114 kW y se puede reutilizar en los procesos de: secado por contacto de superficie metálica, teñido con maquina teñidora de madejas de hilo, teñido por proceso discontinuo y procesos de producción de vapor.
 - Para la mezcla agua- Carrol las condiciones de operación son las siguientes: $T_{EV}=T_{GE} = 90\text{ °C}$, $T_{CO} = 35\text{ °C}$, alcanzado una T_{AB} máxima de 150 °C , así como un $COP_{entálpico\ máximo}$ de 0.485, logrando una recuperación de calor de 111 kW y se puede reutilizar este calor en los procesos de: secado por contacto de superficie metálica, teñido con maquina teñidora de madejas de hilo, teñido por proceso discontinuo, teñido con máquinas de tejido en bobinas y teñido con máquinas JET.
- Se realizó un análisis de emisiones de CO_2 para tres tipos de combustibles utilizados en México (Combustóleo, Gas LP y Gas Natural) en procesos industriales. Con base en los resultados



obtenidos, se puede afirmar que si se acopla un Transformador Térmico por Absorción (TTA) y se utiliza como fuente de calor residual en la industria textil, y además el calor útil obtenido en el absorbedor se utiliza en el proceso de planchado, se concluye lo siguiente:

- Con respecto al combustóleo se dejarían de emitir 119 toneladas de CO_{2equivalentes} por año al medio ambiente. Además, se lograría un ahorro económico, pues se dejarían de consumir 39.038 toneladas de este combustible al año.
- En el caso usar Gas LP se dejarían de emitir al medio ambiente alrededor de 106.83 toneladas de CO_{2equivalentes} anuales y se dejarían de consumir 36.091 toneladas de gas LP al año.
- Finalmente, si se usara Gas Natural como combustible se dejarían de emitir al medio ambiente alrededor de 98.593 toneladas de CO_{2equivalentes} al año y se dejarían de consumir 36.65 toneladas de GN anuales.

De manera general se concluye que el uso e implementación de un Transformador Térmico por Absorción (TTA) para la recuperación de calor industrial permite el ahorro de energía en la industria textil y contribuye a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por lo tanto, es una alternativa sustentable.



PERSPECTIVAS:

Con la finalidad de continuar desarrollando investigación básica y aplicada, así como proponer la implementación de tecnologías sustentables en la industria, se plantean las siguientes perspectivas:

- Desarrollar un estudio experimental en el cual se reproduzcan las condiciones de operación determinadas en las conclusiones de este trabajo tanto para la mezcla agua-bromuro de litio como para la mezcla agua-Carrol, con el fin de comprobar que son posibles de alcanzar.
- Instalar e implementar en la industria textil mexicana Transformadores Térmicos por Absorción, considerando las condiciones de operación comprobadas experimentalmente y así contribuir con el ahorro energético de dicha industria.
- Realizar un estudio tecno-económico de recuperación de inversión para mostrar la viabilidad de la implementación de esta tecnología en la industria textil.
- Análisis detallado de emisiones de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero con el objetivo de mostrar que se puede contribuir al cuidado del medio ambiente mediante el uso de esta tecnología.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Abrahamsson, K., Gidner, A. y Jernqvist, A. (1995).** *Design and experimental performance evaluation of an absorption heat transformer with self-circulation.* Heat Recovery System & CHP; 15, (3), pp. 257 - 272.
- **Adrienne, B.L. y Srinivas G. (2011).** *Comparative assessment of alternative cycles for waste heat recovery and upgrade.* Energy; 36, pp. 4492 - 4504.
- **Alonso, D., Cachot, T. y Hornut, J.M. (2003).** *Experimental study of an innovative absorption heat transformer using partially miscible working mixtures.* International Journal of Thermal Sciences; 42, pp. 631 - 638.
- **Aly, G., Abrahamsson, K. y Jernqvist, A. (1993).** *Application of absorption heat transformers for energy conservation in the oleochemical industry.* International Journal of Energy Research; 17 (7), pp. 571 - 582.
- **Barragán, D. (2007).** Manual de interfaz gráfica de usuario en Matlab. República Del Ecuador. Disponible en: https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10740/19/%255B_matlab%255D_MATLAB_GUIDE.pdf.
- **Bazán, I. (2019).** *Análisis energético de dos configuraciones con y sin seguimiento para prototipos de colectores cilindro-parabólicos.* Universidad Autónoma del estado de Morelos, México.
- **Best, R. y Rivera, W. (1994).** *Thermodynamic design data for absorption heat transformers. Part six: operating on water-Carrol.* Heat Recovery System & CHP; 14 (4), pp. 427 - 436.



-
- **Best, R., Rivera, W. y Hernandez, J. (1992).** *Thermodynamic design data for absorption heat transformers-part 5. Operating on ammonia-sodium thiocyanate.* Heat Recovery System & CHP; 12 (4), pp. 347 - 356.

 - **Best, R., Rivera, W., Piltowsky, I. y Holland, F.A. (1990).** *Thermodynamic design data for absorption heat transformers-part four. Operating on ammonia-lithium nitrate.* Heat Recovery System & CHP; 10 (5e6), pp. 539 - 548.

 - **Best, R., Eisa, M.A.R. y Holland, F.A. (1987).** *Thermodynamic design data for absorption heat transformers-III. Operating on ammonia water.* Heat Recovery System & CHP; 7(3), pp. 259 - 272.

 - **Bhardwaj, P.K., Kaushik S.C. y Jain S., (2003).** *Finite time optimization of an irreversible vapor absorption heat transformer system.* Energy Conversion and Management; 44, pp. 1131 - 1144.

 - **Bourouis, M., Coronas, A., Romero, R.J. y Siqueiros, J. (2004).** *Purification of sea water using absorption heat transformers with water-(LiBr + LiI + LiNO₃ +LiCl) and low temperature heat sources,* Desalination; 166, pp. 209 - 214.

 - **Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L. F. y Lävemann. E. (2015).** *Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies.* Applied Energy; 151, pp. 157 - 167.

 - **Cengel, Y., Boles, M. y Kanoglu, M. (2018).** *Termodinámica.* Novena edición. Mc Graw Hill.

 - **Cengel, Y. y Boles, M. (2006).** *Termodinámica.* Quinta edición. Mc Graw Hill.

 - **CEPAL, N. (2019).** *La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. Objetivos, metas e indicadores mundiales.*
-



-
- **Chejne, F., Alean, J.D., Gómez, C.A., López, O.D., Vélez, J.F., Betancur, L.A., Guerra del Río, J.F., Muraca, G., Omaña, M.M. y Isaza, C.A. (2015).** *Recuperación de energía en procesos industriales*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas.

 - **Colorado-Garrido, D., Santoyo-Castelazo, E., Hernández, J.A., García-Valladares, O., Siqueiros, J. y Juarez-Romero, D. (2009).** *Heat transfer of a helical double-pipe vertical evaporator: Theoretical analysis and experimental validation*. *Applied Energy*; 86, pp. 1144 - 1153.

 - **Comisión Nacional del agua CONAGUA (2019).** Reporte del Clima en México Abril. Página oficial, disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatología/Diagnóstico%20Atmosférico/Reporte%20del%20Clima%20en%20México/RC-Abril19.pdf>.

 - **Comisión nacional para el uso eficiente de la energía CONNUE (2020).** Página oficial, disponible en: <https://www.gob.mx/conuee/articulos/se-presenta-el-mapa-de-calor-de-mexico>.

 - **Cortés, E. y Rivera W. (2010).** *Exergetic and exergoeconomic optimization of a cogeneration pulp and paper mill plant including the use of a heat transformer*. *Energy*. 35, pp. 1289 - 1299.

 - **Currie, J. y Pritchard, C. (1994).** *Energy recovery and plume reduction from an industrial spray drying unit using an absorption heat transformer*. *Heat Recovery Systems and CHP*; 14 (3), pp. 239 - 248.

 - **Deloitte, (2019).** *Tendencias de industrias*. D. Econosignal. Analítica sectorial.

 - **Demesa, N., Hernández, J.A., Siqueiros, J. y Huicochea, A. (2018).** *Heat transfer coefficients for helical components inside an Absorption Heat Transformer*. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 120, pp. 342–349.
-



-
- **Demesa, N. y Morales, L.I. (2016).** Reporte Técnico Del Proyecto “*Diseño y desarrollo de un Transformador Térmico por Absorción (TTA) a nivel piloto para el ahorro energético de la Industria Textil*”. ALDETEC, CIICAp, CONACyT.
 - **Demesa, N., Hernández, J.A., Siqueiros, J., García, J.C. y Huicochea, A. (2015).** *Improvement of the performance of an absorption heat transformer through a single effect process to obtain freshwater.* Applied Thermal Engineering. 78, pp.162 - 171.
 - **Dereje, A.S., Currás, M.R., Salavera, D., García, J., Bruno, J.C. y Coronas, A. (2014).** *Performance analysis of absorption heat transformer cycles using ionic liquids based on imidazolium cation as absorbents with 2,2,2-trifluoroethanol as refrigerant.* Energy Conversion and Management. 84, pp. 512 - 523.
 - **Devotta S. y Patwardhan V.S. (1989).** *Short course and workshop on heat pumps and energy conservation.* Chemical Engineering Division, National Chemical Laboratory, NCL and University of Salford (U.K.). pp 1114, 4.7 - 4.8.
 - **Donnellan P., Cronin K., Acevedo Y. y Byrne E. (2014).** *Economic evaluation of an industrial high temperature lift heat transformer.* Energy. 73, pp. 581 - 591.
 - **Eisa, M.A.R. (1996).** *Applications of heat pumps in chemical processing.* Energy Convers. Mgmt Vol. 37, No. 3, pp. 369-377.
 - **Eisa, M.A.R., Best, R. y Holland, F.A. (1986).** *Thermodynamic design data for absorption heat transformers-Part I. Operating on Water-Lithium Bromide.* Heat recovery system, 6(5), pp. 421 - 432.
 - **Escalante, C. A. (2002).** *Bombas de calor, fundamentos y aplicaciones industriales.* Monografía presentada para obtener el título de Ingeniero Químico Industrial, Universidad Autónoma de Yucatán.
-



-
- **Escobar, R.F., Juárez D., Siqueiros, J., Irlés, C., y Hernández, J.A. (2008).** *On-line COP estimation for waste energy recovery heat transformer by water purification process.* Desalination 222, pp. 666 - 672.
 - **Farjana, S.H., Huda, N., Parvez, M.A. y Saidur, R. (2018).** *Solar process heat in industrial systems-A global review.* Renewable and Sustainable Energy Reviews 82, pp. 2270-2286.
 - **Federal Ministry for Economic Affairs and Energy BMWi, (2007).** Renewable Energy Sources in Figures national and international development. Centre for Solar Energy and Hydrogen Research Baden-Württemberg (ZSW), Stuttgart, Federal Environment Agency (UBA), Department I 2.5, Dessau-Roßlau.
 - **Fujii, T., Kawamura, H., Uchida, S. y Nishiguchi, A. (2009).** *A single-effect absorption heat transformer for waste heat recovery in industrial use.* Conf Proceedings Paper. HPP-CONF9.
 - **Fujii, T., Uchida, S. y Nishiguchi, A. (2010).** *Development activities of low temperature waste heat recovery appliances using absorption heat pumps.* International Symposium on Next-generation Air conditioning and Refrigeration Technology, 17 - 19.
 - **Gidner, A., Jernqvist, A., y Aly, G. (1996).** *An energy efficient evaporation process for treating bleach plant effluents.* Applied Thermal Eng; 16(1), pp. 33 - 42.
 - **Gomez-Arias, E., Ibarra e Bahena, J., Velázquez - Avelar, L., Romero, R.J., Rodríguez - Martínez, A. y Montiel González, M. (2015).** *Temperature and concentration fields in a generator integrated to single stage heat transformer using water/Carrol mixture.* Journal of Thermal Science 23, (6), pp. 564 – 571.
 - **Gomri, R. (2009).** *Energy and exergy analyses of seawater desalination system integrated in a solar heat transformer.* Desalination. 249, pp. 188-196.
-



-
- **Gränfors, A., Nilsson, B., Jernqvist, Å, y Aly, G. (1997).** *Dynamic simulation of an absorption heat transformer incorporated with an evaporation plant.* Comput Chem Eng; 21, pp. 715 - 720.

 - **Hamidi, A., Parham, K., Atikol U., y Shahbaz A.H. (2015).** *A parametric performance analysis of single and multi-effect distillation systems integrated with open-cycle absorption heat transformers.* Desalination. 371, pp. 37-45.

 - **Holland, F. A. (1990).** *Fundamentos y aspectos económicos de las bombas de calor en el Manual sobre Tecnología de Bombas de Calor,* Programa de Cooperación e Investigación entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, y la Universidad de Salford, Reino Unido, ISBN 968-6314-03-2.

 - **Holland F.A., Siqueiros J., Santoyo S., Heard C.L., Santoyo E.R., (1999).** *Water purification using heat pumps,* E & FN Spon, London.

 - **Horus I. y Kurt B. (2010).** *Absorption heat transformers and an industrial application.* Renewable Energy. 35: pp. 2175-2181.

 - **Holmgren M. (2010).** *X-steam function of Matlab R2018a for water and steam thermodynamic properties based on IAPWS IF97 standard.* <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/9817>.

 - **Huicochea, A., Rivera, W., Martínez, H., Siqueiros, J., y Cadenas, E. (2013a).** *Analysis of the behavior of an experimental absorption heat transformer for water purification for different mass flux rates in the generator.* Applied Thermal Eng. 52, pp. 38-45.

 - **Huicochea A., Romero R.J., Rivera W., Gutierrez-Urueta G., Siqueiros J., y Pilatowsky I. (2013b).** *A novel cogeneration system: a proton exchange membrane fuel cell coupled to a heat transformer.* Applied Thermal Engineering. 50: pp. 1530–5.
-



-
- **Huicochea, A. y Siqueiros, J. (2010).** *Improved efficiency of energy use of a heat transformer using a water purification system.* Desalination. 257: pp. 8-15.

 - **Huicochea, A. y Siqueiros, J. (2009).** *Increase of COP for an experimental heat transformer using a water purification system.* Desalination Water Treat. 12, pp. 305-312.

 - **Huicochea, A., Siqueiros, J., y Romero, R.J. (2004).** *Portable water purification system integrated to a heat transformer.* Desalination; 165: pp. 385–91.

 - **Ibarra-Bahena, J., Romero, R.J., Velázquez-Avelar, L., Valdez-Morales, C.V. y Galindo-Luna, Y.R. (2015).** *Experimental thermodynamic evaluation for a single stage heat transformer prototype build with commercial PHEs.* Applied Thermal. Eng. 75, pp. 1262–1270.

 - **IEA Heat Pump Programme, (2014).** *Application of industrial heat pumps.* Final Report, part 1 Annex 35.

 - **Incropera, F.P., y Dewitt, D. P. (1999).** *Fundamentos de Transferencia de Calor:* Cuarta Edición. Prentice Hall.

 - **International Energy Outlook IEO (2020).** Página Oficial, disponible en: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo>.

 - **Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI, (2020).** *México ingresó en abril en fase de recesión aguda.* Disponible en: <https://idic.mx/2020/06/26/mexico-ingreso-en-abril-en-fase-de-recesion-aguda/>

 - **Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC, (2014).** *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México.* Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/110131/CGCCDBC_2014_FE_tipos_combustibles_fosiles.pdf.
-



-
- **Johnson, I., Choate, W.T., y Davidson, A. (2008).** *Waste heat recovery. Technology and opportunities in US industry.* BCS, Inc., Laurel, MD (United States).

 - **Kripalani, V.M., Srinavasa, S., y Krishna, M.V., (1984).** *Performance analysis of a vapor absorption heat transformer with different working fluid combinations.* Heat Recovery Systems 4 (3), pp. 129-140.

 - **Kurem, E., y Horuz, I. (2001).** *A comparison between ammonia water and water–lithium bromide solutions in absorption heat transformers.* Int Commun Heat Mass Transf; 28: pp. 427–38.

 - **Lattemann, S., y Höpner T. (2008).** *Environmental impact and impact assessment of seawater desalination.* Desalination, Vol. 220, Issues 1-3, pp 1-15.

 - **Lockuán, F.E. (2012).** *La industria textil y su control de calidad. Tintorería.* Disponible en. <http://fidel-lockuan.webs.com>.

 - **Lugo, S., Morales, L.I., Best, R., Gómez, V.H., y García-Valladares O. (2019).** *Numerical simulation and experimental validation of an outdoor-swimming pool solar heating system in warm climates.* Solar Energy. Vol. 189: pp. 45-56.

 - **Ma, X., Lan, Z., Hao, Z., Wang, Q., Bo, S., y Bai, T. (2014).** *Heat transfer and thermodynamic performance of LiBr/agua absorption heat transformer with vapor absorption inside vertical spiral tubes.* Heat Transfer Eng. 35, pp. 1130–1136.

 - **Ma, X., Chen, J., Li, S., Sha, Q., Liang, A., Li, W., Zhang, J., Zheng, G., y Feng, Z. (2003).** *Application of absorption heat transformer to recover waste heat from a synthetic rubber plant,* Appl. Therm. Eng. 23, pp. 797-806.

 - **McNelly L.A. (1979).** *Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide.* ASHRAE Transactions, pp. 413-434.
-



-
- **Meza, M., Marquez-Nolasco, A., Huicochea, A., Juarez, D-Romero y Siqueiros, J. (2014).** *Experimental study of an absorption heat transformer with heat recycling to the generator.* Exp. Therm. Fluid Sci. 53, pp. 171-178.

 - **Mostofizadeh C, y Kulick, C. (1998).** *Use of a new type of heat transformer in process industry.* Appl Therm Eng; 18(9-10): pp. 857-74.

 - **Nomura, T. y Nishimura, N. (1992).** Thermal performance and evaluation of superheated steam drying system using solar-assisted absorption heat transformer. Drying Technology, 10(3), pp. 659-677.

 - **Parham, K., Khamooshi, M., Daneshvar, S., Assadi, M., y Yari, M. (2016).** *Comparative assessment of different categories of absorption heat transformers in water desalination process.* Desalination 396, pp. 17-29.

 - **Pataskar, S.G., Adyanthaya, S.D., Devotta, S., y Holland, F.A. (1990).** *Performance of an experimental absorption heat transformer using aqueous LiBr, LiCl, and LiBr/LiCl solutions.* Int. Eng. Chem. Res. 29 (8), pp. 1658-1662.

 - **Qin, X., Chen, L., y Sun F. (2008).** *Performance of real absorption heat-transformer with a generalized heat transfer law.* Appl. Therm. Eng. 28, pp. 767-776.

 - **Qin, X., Chen, L., Sun F, y Wu, C. (2005).** *Performance of an endoreversible four-heat reservoir absorption heat-transformer with a generalized heat transfer law.* Int. J. Ambient Energy, 26(4).

 - **Qin, X., Chen, L., Sun F., y Wu, C. (2004).** *The Optimal performance of an endoreversible four-heat-reservoir absorption heat-transformer,* Open Syst. & Inf. Dyn. 11, pp. 147-159.
-



-
- **Reimann, R. y Biermann, W. J., (1984).** *Development of a single family absorption chiller for use in solar heating and cooling system*, Phase III Final Report, Prepared for the U. S. Department of Energy under contract EG-77-C-03-1587, Carrier Corporation.

 - **Restrepo, A.H. Burbano, J.C. y Carranza, Y.A. (2006).** *Estudio de la factibilidad técnico-económico para la recuperación de calores residuales en la empresa manufacturera Carolina S.A.* Scientia et Technica, pp. 0122-1701.

 - **Rivera, W., Best, R., Cardoso, M.J., y Romero, R.J. (2015).** *A review of absorption heat transformers.* Applied Thermal Engineering. 91, pp. 654-670.

 - **Rivera, W., Huicochea, A., Martínez, H., Siqueiros, J., Juarez, D., y Cadenas, E. (2011).** *Exergy analysis of an experimental heat transformer for water purification.* Energy 36, pp. 320-327.

 - **Rivera, W., Cerezo, J., Rivero, R., Cervantes, J., y Best, R. (2003).** *Single stage and double absorption heat transformers used to recover energy in a distillation column of butane and pentane.* International Journal of Energy Research, 27(14): pp. 1279–1292.

 - **Rivera, W. (2000).** *Experimental evaluation of single-stage heat transformer used to increase solar pond's temperature.* Sol. Energy 69 (5), pp. 369-376.

 - **Rivera, W., Romero, R.J., Best, R., y Heard, C.L. (1999).** *Experimental evaluation of a single-stage heat transformer operating with the water/Carrol mixture.* Energy 24, pp. 317-326.

 - **Rivera, W., Romero, R.J., y Cardoso, M.J. (1998).** *Theoretical comparison of single stage and advanced absorption heat transformers operating with water/lithium bromide and water/carrol mixtures.* Int. J. Energy Res. 22, pp. 427-442.
-



-
- **Rivera, W., Best, R., Hernández, J., Heard, C.L., y Holland, F.A. (1994).** *Thermodynamic study of advanced absorption heat transformers - I. Single and two stage configuration with exchanger.* Heat Recovery Systems & CHP, Vol 14, No 2, pp. 173-184.
 - **Romero, R.J. (1996).** *Estudio de las mezclas bromuro de litio-agua y Carrol-agua en Transformadores Térmicos por Absorción de una etapa.* Tesis de maestría. UNAM.
 - **Scott, M., Jernqvist, A., Olsson, J., y Aly, G. (1999).** *Experimental and theoretical study of an open multi-compartment absorption heat transformer for different steam temperatures. Part I: hydrodynamic and heat transfer characteristics.* Appl. Therm. Eng. 19, pp. 279-298.
 - **Secretaria de Energía SENER, (2020).** Documentos: *Balance Nacional de Energía 2020, Inventario Nacional de Energías Renovables.* Prospectiva del Sector Energético 2020. Disponible en: www.sener.gob.mx.
 - **Secretaria de Energía SENER, (2019).** Documentos: *Balance Nacional de Energía 2019, Inventario Nacional de Energías Renovables.* Prospectiva del Sector Energético 2019. Disponible en: www.sener.gob.mx.
 - **Soriano, R.G. (2018).** *Dispositivo de medición de la energía entregada por dispositivos solares térmicos.* Universidad Nacional Autónoma de México.
 - **Sekar, S., y Saravanan, R. (2011).** *Experimental studies on absorption heat transformer coupled distillation system.* Desalination 274, pp. 292-301.
 - **Shi L., Yin J., Wang X., y Zhu M. (2001).** *Study on a new ejection absorption heat transformer.* Applied Energy. Volume 68. pp 161-171.
 - **Siqueiros J., y Romero R.J. (2007).** *Increase of COP for water purification systems. Part I: increase heat source temperature.* Applied Thermal Engineering. 27: pp. 1043-1053.
-



-
- **Srinivas, G., Sekar, S., Saravanan, R., y Renganarayanan, S. (2009).** *Studies on a water based absorption heat transformer for desalination using MED.* Desalination Water Treat. 1, pp. 75-81.

 - **Sun F., Qin, X., Chen, L., y Wu, C. (2005).** *Optimization between heating load and entropy-production rate for endoreversible absorption heat-transformers,* Appl. Energy. 81, pp. 434-448.

 - **Wu, W., Wang. B., Shi. W., y Li. X. (2014).** *Absorption heating technologies: A review and perspective.* Applied Energy 130, pp. 51–71.

 - **Wu, S., y Chen, J. (2005).** *Parametric optimum design of an irreversible heat transformer based on the thermo-economic approach,* Appl. Energy. 80, pp. 349-365.

 - **Xu, Z., Wang, R., (2017).** *Absorption heat pump for waste heat reuse: current states and future development.* Frontiers in Energy. 2017; 11(4): pp.414-36.

 - **Yari, M. (2012).** *A novel cogeneration cycle based on are compression supercritical carbon dioxide cycle for waste heat recovery in nuclear power plants.* Int. J. Exergy. 10: pp. 346–64.

 - **Yin, J., Shi, L., Zhu, M.S., y Han, L.Z. (2000).** *Performance analysis of an absorption heat transformer with different working fluid combinations,* Appl. Energy. 67, pp. 281-292.

 - **Zhang K., Liu Z., Li Y., Li Q., Zhang J., y Liu H. (2014).** *The improved CO₂ capture system with heat recovery based on absorption heat transformer and flash evaporator.* Applied Thermal Engineering. 62: pp. 500-506.

 - **Zhuo, C.Z., y Machielsen, C.H.M., (1994).** *Thermodynamic assessment of an absorption heat transformer with TFE-Pyr as the working pair.* Heat Recovery Syst. & CHP. 14(3), pp. 265-272.
-



APÉNDICE A

USO DE XSTEAM DE MATLAB PARA PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DEL AGUA

El X Steam para MatLab es una implementación de la formulación estándar IAPWS IF97. El mismo proporciona datos termohidráulicos precisos para agua y vapor y mezclas de agua y vapor en la región:

0°C < temperature < 2000°C for
0.00611 bar a < pressure < 100 bar

0°C < temperature < 1000°C for
0.00611 bar a < pressure < 1000 bar

A.1 Utilizando el software MatLab para obtener las propiedades termodinámicas del H₂O:

El código XSteam se usa utilizando la instrucción: **Out=XSteam ('function name', In1, In2)**. Además las funciones válidas de Steam se muestran a continuación:

Tabla A.1 . Funciones válidas de temperatura.

Function	In 1	In 2	Out
Tsat_p	p		Temperatura de saturación
T_ph	p	h	Temperatura como una función de la presión y entalpía
T_ps	p	s	Temperatura como una función de la presión y entropía
T_hs	h	s	Temperatura como una función de la entropía y entalpía



APÉNDICES



Tabla A.2 Funciones válidas de presión.

Function	In 1	In 2	Out
psat_T	T		Presión de saturación
p_hs	h	s	Presión como una función de la entropía y entalpía

Tabla A.3 Funciones válidas para entalpía.

Function	In 1	In 2	Out
hV_p	p		Entalpía de vapor saturada
hL_p	P		Entalpía de líquido saturada
hV_T	T		Entalpía de vapor saturada
hL_T	T		Entalpía de líquido saturada
h_pT	P	T	Entalpía como una función de la presión y temperatura
h_ps	P	s	Entalpía como una función de la presión y entropía
h_px	P	x	Entalpía como una función de la presión y concentración
h_Tx	T	x	Entalpía como una función de la concentración y temperatura



APÉNDICE B

PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LA MEZCLA AGUA – BROMURO DE LITIO

B.1 Cálculo de la temperatura de saturación o concentración de la mezcla agua- bromuro de litio.

Para determinar la temperatura de saturación de la mezcla agua- bromuro de litio, se utiliza la ecuación (B.1.1), propuesta por McNeely en el año 1979 y válida cuando:

$$-20\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{REF} < 110\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$5\text{ }^{\circ}\text{C} < T_{SOL} < 180\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$45\% < X_{SOL} < 70\%.$$

$$T_{SOL} = (T_{REF} * \sum_{I=0}^3 A_I X_{SOL}^I) + \sum_{I=0}^3 B_I X_{SOL}^I \quad (\text{B.1.1})$$

Donde:

T_{SOL} : Temperatura de la solución; [° C]

T_{REF} : Temperatura de referencia del agua; [° C]

X_{SOL} : Concentración de la solución; [% peso]

Las constantes para resolver la ecuación B.1.1 son las siguientes (Tabla B.1):

Tabla B.1 Valores de los coeficientes para el cálculo de la temperatura o concentración de la solución.

I	A	B
0	-2.00755	124.937
1	0.16976	-7.7165
2	$-3.13336 * 10^{-3}$	0.152286
3	$1.97668 * 10^{-5}$	$-7.9509 * 10^{-4}$



B.2 Cálculo de la entalpía de saturación para la mezcla agua- bromuro de litio.

La entalpía de saturación para la mezcla agua- bromuro de litio se puede determinar por la ecuación B.2.1, propuesta por Alefeld (Torres 1997), válidas para los siguientes intervalos:

$$5^{\circ} \text{C} < T_{\text{SOL}} < 180^{\circ} \text{C}$$

$$45\% < X_{\text{SOL}} < 70\%$$

$$H = 2.326 * \left[\sum_{l=0}^4 A_l X^l + \left(\sum_{l=0}^4 B_l X^l * (1.8 * T_{\text{SOL}} + 32) \right) + \left(\sum_{l=0}^4 C_l X^l * (1.8 * T_{\text{SOL}} + 32)^2 \right) \right] \quad (\text{B.2.1})$$

Donde:

H: Entalpía de saturación; [kJ/Kg]

T_{SOL} : Temperatura de la solución; [° C]

X_{SOL} : Concentración de la solución; [% peso]

Las constantes para resolver la ecuación B.2.1 son las siguientes (Tabla B.2):

Tabla B.2 Valores de los coeficientes para el cálculo de la entalpía de saturación de la solución.

I	A	B	C
0	$-1.01507 * 10^3$	4.68108	$-4.9107 * 10^{-3}$
1	$7.9538 * 10^1$	$-3.037766 * 10^{-1}$	$3.83184 * 10^{-4}$
2	-2.358016	$8.44845 * 10^{-3}$	$-1.078963 * 10^{-5}$
3	$3.031583 * 10^{-2}$	$-1.047721 * 10^{-4}$	$1.3152 * 10^{-7}$
4	$-1.400261 * 10^{-4}$	$4.80097 * 10^{-7}$	$-5.897 * 10^{-10}$

La siguiente figura muestra el diagrama de temperatura, concentración y presión para la mezcla agua-LiBr. Tomada de McNeely (1979).

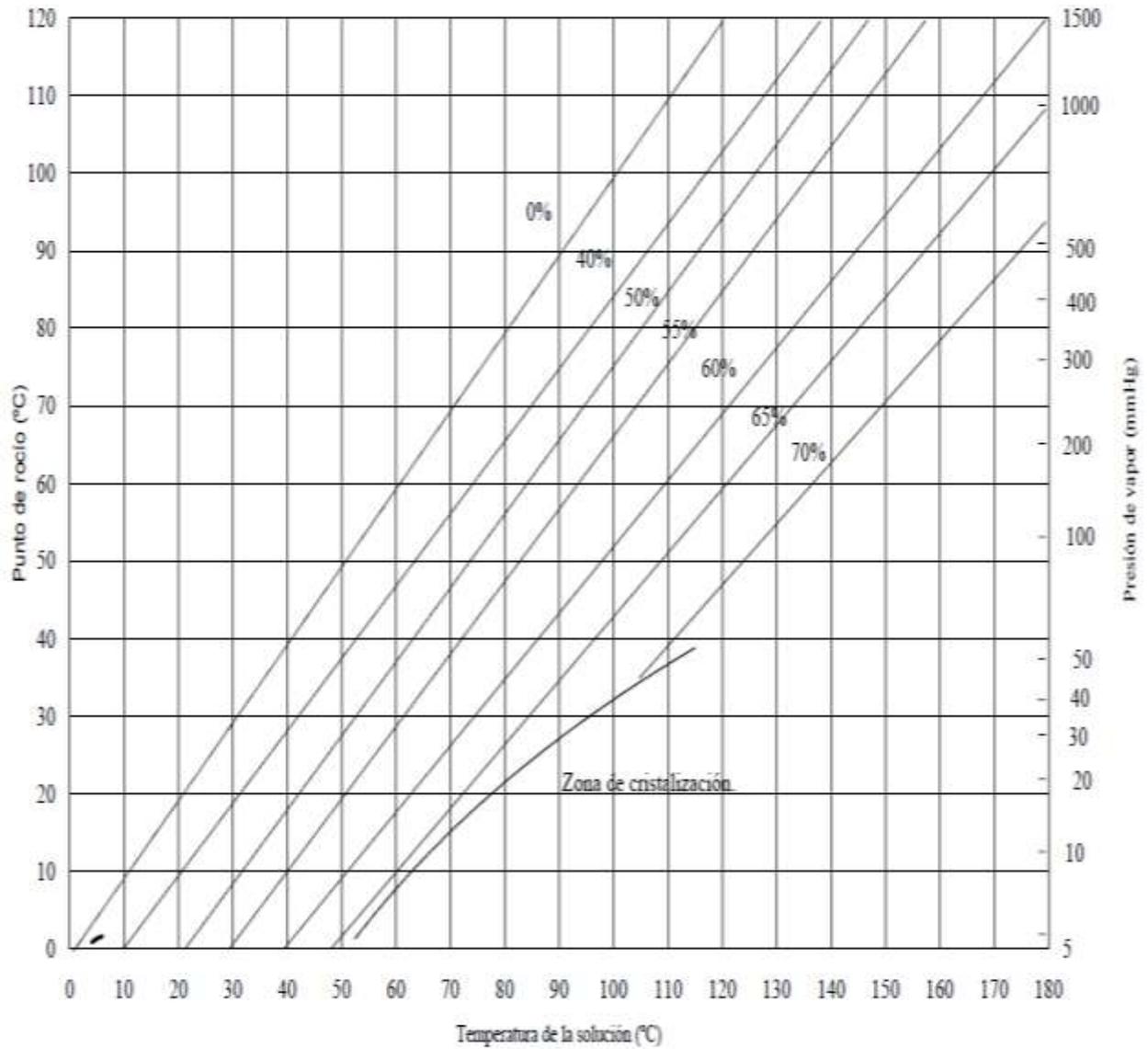


Figura B.1 Diagrama de temperatura, concentración y presión para la mezcla agua - LiBr. McNeely (1979).



APÉNDICE C

PROPIEDADES TERMODINÁMICAS DE LA MEZCLA AGUA – CARROL

C.1 Cálculo de la concentración de la mezcla agua-Carrol.

Para determinar la concentración de la solución en equilibrio de la mezcla agua – Carrol, obtenida de Carrier Corporation, (Reimann y Biermann (1984)) se tuvo en cuenta las ecuaciones siguientes:

$$T_{SOL} = (M * T_{SD}) + B \quad (C.1.1)$$

Para:

$$B = -210.71 + 10.907 * X - 0.18574 * X^2 + 9.3912 * 10^{-4} * X^3 \quad (C.1.2)$$

$$M = 1.663 - 0.32372 * X + 4.9701 * 10^{-4} * X^2 - 2.96363 * 10^{-6} * X^3 \quad (C.1.3)$$

Donde:

T_{SOL} : Temperatura de la solución; [° C]

T_{SD} : Temperatura de la solución dada; [° C]

X : Concentración de la solución; [% peso]

C.2 Cálculo de la temperatura de solución para la mezcla agua-Carrol.

El cálculo de la temperatura de la solución en equilibrio de la mezcla agua – Carrol, obtenida de Carrier Corporation, (Reimann y Biermann (1984)) se obtiene de las ecuaciones siguientes:

$$T_{SOL} = \frac{(T_R - B)}{M} \quad (C.2.1)$$



Para:

$$B = -210.71 + 10.907 * X - 0.18574 * X^2 + 9.3912 * 10^{-4} * X^3 \quad (C.2.2)$$

$$M = 1.663 - 0.32372 * X + 4.9701 * 10^{-4} * X^2 - 2.96363 * 10^{-6} * X^3 \quad (C.2.3)$$

Donde:

T_{SOL} : Temperatura de la solución; [° C]

T_R : Temperatura del refrigerante; [° C]

X : Concentración de la solución; [% peso]

C.3 Cálculo de la entalpía de solución para la mezcla agua-Carrol.

Para obtener la entalpía de la solución de la mezcla agua – Carrol, tomadas de Carrier Corporation, (Reimann y Biermann (1984)) se utilizan las ecuaciones siguientes:

$$H = T_{SOL}^2 + T_A + (T_{SOL} * C) + S \quad (C.3.1)$$

Para:

$$S = 1197.190135 - 53.49325167 * X + 0.7482707211 * X^2 - 0.0031541588 * X^3 \quad (C.3.2)$$

$$C = -2.41786903 + 0.2400371279 * X - 4.021956 * 10^{-3} * X^2 + 2.09546 * 10^{-5} * X^3 \quad (C.3.3)$$

$$T_A = 0.019006407 - 7.928478 * 10^{-4} * X + 1.15277 * 10^{-5} * X^2 - 5.81 * 10^{-8} * X^3 \quad (C.3.4)$$



Donde:

T_{SOL} : Temperatura de la solución; [° C]

H : Entalpía de la solución; [kJ/Kg]

X : Concentración de la solución; [% peso]

La Figura. C.1 muestra el diagrama de temperatura, concentración y presión para para la mezcla agua-Carrol. Reimann y Biermann (1984).

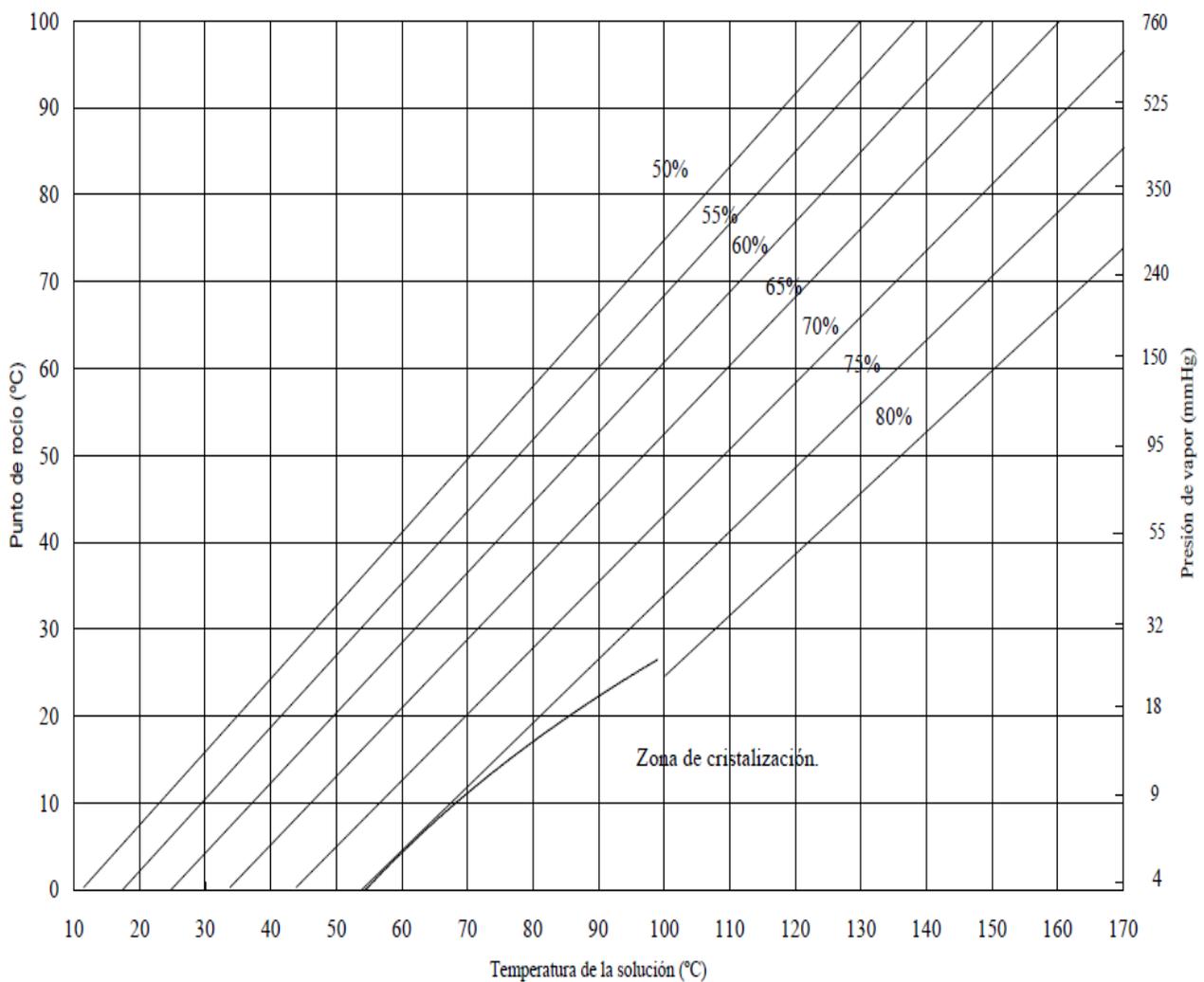


Figura C.1 Diagrama de temperatura, concentración y presión para para la mezcla agua-Carrol. Reimann y Biermann (1984).

