



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UN
INTERCAMBIADOR DE CALOR EVAPORADOR-
ABSORBEDOR CON UNA TEXTURA MEJORADA,
ACOPLADO A UN TRANSFORMADOR TÉRMICO POR
ABSORCIÓN**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRÍA EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

I. M. IRÁN ORTIZ RIVERA

ASESOR:

Dr. David Juarez Romero

SINODALES:

**Dr. Jose Alfredo Hernández Pérez
Dr. Armando Huicochea Rodríguez
Dr. Víctor Manuel Velázquez Flores
Dr. Javier Delgado Gonzaga**

CUERNAVACA, MORELOS

2020



Cuernavaca, Morelos, a 02 de septiembre de 2020.

DR. ROSENBERG JAVIER ROMERO DOMÍNGUEZ
COORDINADOR DEL POSGRADO EN
INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
P R E S E N T E

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la TESIS titulada: "Evaluación experimental de un intercambiador de calor Evaporador-Absorbedor con una textura mejorada, acoplado a un transformador térmico por absorción" que presenta el alumno **Irán Ortiz Rivera**, para obtener el título de **Maestría en Ingeniería y Ciencias Aplicadas**.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es **APROBATORIO**

Atentamente

DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ
DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ
DR. VICTOR MANUEL VELAZQUEZ FLORES (FCQel)
DR. JAVIER DELGADO GONZAGA
DR. DAVID JUÁREZ ROMERO

Se adiciona efirma UAEM



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

ARMANDO HUICOCHEA RODRIGUEZ | Fecha:2020-08-03 08:51:18 | Firmante
 PQLly9I4+-8NrvOA4C8C1a8pQFG1KGlex4zFSLjW09pk9vs52CfwnhKQjVo9Gwju3IFC+Kdl7z1UV2Wyp5LCO0D6KjBV6xo1Jc4BP5k9hHAF77eVc5n83zW07AyyZmE9cLlIkJwdBB9U21C+DObP8jDsJDDnF6p2cvQu49jACfT185V26Uc3059hwYky1Om932xbRdO4UYFo9yAZqEr+Kycmw4IkJg6Bkg2kL9VUVYn8gmp3pYRUZ9AR15xbGAYPT11qcpuc3UuJucGPaQjcn7MyhndPqdWoi588vRKBEkmtgrdeGJae2x3wWmdx5VwpFaQKfZzMTeyQ==

JOSE ALFREDO HERNANDEZ PEREZ | Fecha:2020-08-03 12:30:12 | Firmante
 YIGRgnWX/Bp5FvXIHsp8BhwpAKwdT3ZcwUC7aM6FbhXQYgm+Kddm03ZUOmvyqHclbmd0byCKgw52KerUuV991YXOArfdyKRGzY2toQ5f0U1VxywDctf8d966NqTUGZeNEheHQIDd1LmFfKMLRPGkk+JDMoQ3QLAFMf8CbSyc83mo1K9NjFeVkaX9hI1I2KTwku+ahBDQXW8d8uw8QUWHGObd2CJhdEzdfZLQ3Hk4GVHhdP46pCHmOTC D+8Yd3emOMbZHOcvKXJQZY2sCR9oCCP29bWdCddqYv9dpc4XwodJf9bo6g+rPkIX90gjIqRyvAg==

DAVID JUAREZ ROMERO | Fecha:2020-08-03 12:47:36 | Firmante
 v4+OHKXNfJ5KXKFambhIR9rjLJ5YigM2IP8GpcjVJLJVRlqWfhtZ5KDRXogeIb9Gr5yhVtdGgCCPB0cYm0UJ+TuKqW2stG+FcCK1DrKISNwFIPzZM0B9OYh2xvRLuLujl0g/26vzpXEPjRlmiCDma4Zo5V0LsuV+XvcyvrCj09rjgn92U2CaApG6Qq4V/m9uTUAo39WwosYBkccVQZFhCIWwEe9s56vy2xmb1xWEy6CxrP0g2Qg/8CcepAmvEkhemHhI A7UofnJuuGscniHEMoBkkaateJ7W4RzE8cF2ppHxEWYg68w0BUEQ15T7MMprHgw==

JAVIER DELGADO GONZAGA | Fecha:2020-08-10 12:08:40 | Firmante
 vYB9j1YryYSFIF1jmbzV3ekvyZ2bW53j8KQYc9+WPnncmRmWjJh478WGhK06TJ7y8VnCDurVWOPkI/zicL56FWUqYHHmTDrjmQKQKGPByPvaLJ7bU4YxXoUgO+LlCLpUvOZUJZxOivW8OyChYb20Xc+gbKNw4PDIRyedolcu0IMgRWOVgHqNI+FBn27BKqZzl627clu0ycr54sds9W9GhcMozvz4003mpCR4I1fwa7mMPGNoIXGa8G4mr9qKD1rRZ2jgTzXFsGeR0K9YVj+06Ps09AsGRcxcuWmK87aFqnUf868rU7RejAP/Wpc6ZxBwAw==

VICTOR MANUEL VELAZQUEZ FLORES | Fecha:2020-08-11 13:36:27 | Firmante
 ACu5nbb+wKXVgfeZEvr13MV0q7fKf84pMLbXG6HLjyPL15vnlul15QKIDL8wID8V7TymX3mE+cMI7Wj4CmvHPMHJgPzRLveR9zhzaxKf94eJe1LNeImB9400BdwEjxuvJADbzchiORsA7Kbu6k488WLaHSDQyysqQqOrFVsxKfmKchjHGlaxIPn8qT/AqzZgMvYEdN8u0RcGy26m9+gT8QmP53JoC4CQldh9vb1uPaxYKqjTewraJuvB10mLxZKJKVJDD wle+TEW87qcpZwHCSVAr94VzJqt36dntWGRXk8bzW8g1o60vX225FPXwRHAJ7oN3vqeQ==

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



yh6IX2

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/WZ6IA/bDxmV5mAdfdzX5rsWbeqDoD>

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca a la evaluación experimental de un Evaporador helicoidal por película descendente con una textura mejorada en la superficie de la helicoidal, el cual se encuentra acoplado a un Transformador Térmico por Absorción con una mezcla de trabajo LiBr-H₂O. Este Evaporador se encuentra de forma concéntrica con un Absorbedor helicoidal que al igual que el Evaporador también es de película descendente. Ambos componentes se encuentran en una misma coraza. Al Evaporador se le realizó un acabado áspero en la superficie de la helicoidal el cual se realizó mediante un sistema de lanzamiento de materiales abrasivos con aire a presión sobre la superficie de la helicoidal, con el propósito de mejorar la distribución de la película descendente y en consecuencia incrementar, la potencia térmica en este componente. Los parámetros que se evaluaron en el Evaporador fueron los flujos suministrados de refrigerante de: 7.24×10^{-4} , 8.85×10^{-4} y 9.65×10^{-4} kg/s y de los fluidos de calentamiento: 0.0550, 0.1264 y 0.1848 kg/s junto con las temperaturas de operación, las cuales se variaron de 68 a 80.5 °C. Como resultados se obtuvieron potencias en el Evaporador y Absorbedor de 1.81 kW y 1.91 kW respectivamente. Se realizó una comparación de las potencias con la superficie lisa, las cuales fueron de 1.60 kW en el Evaporador y 1.70 kW en el Absorbedor. La comparación indica que hubo un incremento de 13.12 % en el Evaporador y 12.35% en el Absorbedor.

ABSTRACT

This work focuses on the experimental evaluation of a helical evaporator for falling film with an improved texture on the surface of the helical, which is coupled to a thermal transformer by absorption with a mixture of work LiBr-H₂O. This evaporator is located in a concentric way with a helical absorber that as well as the evaporator is also of falling film. Both components are in the same shell. The evaporator is made a finish as a but on the surface of the Helical which was carried out by means of a launching system of abrasive materials with pressurized air on the surface of the helical, with the purpose of improving the distribution of the falling film and consequently the thermal power in this component, the parameters that were evaluated in the evaporator were the flows supplied of refrigerant of 7.24×10^{-4} , 8.85×10^{-4} and 9.65×10^{-4} of the heating fluids of which have been, and of those which have of the ones that are at the temperatures of the 0.0550 , 0.1264 and 0.1848 kg/s along with the operation which varied from 68 to 80.5 °c at 2 °c intervals, obtaining as results power in the evaporator and absorber of 1.81 kw and 1.91 kw respectively, a comparison of the powers was made with the smooth surface which were 1.60 kw in the evaporator and 1.70 kw in the absorber which indicates that there was an increase of 13.12% in the evaporator and 12.35% in the absorber.

CAPÍTULO I
ANTECEDENTES

1.1 Antecedentes: Superficies mejoradas para la transferencia de calor	11
1.2 Problema de investigación	17
1.3 Justificación	17
1.4 Hipótesis	18
1.5 Objetivos	18
1.6 Estructura de la tesis	19

CAPÍTULO II
MARCO TEÓRICO

2.1 Intercambiadores de calor	20
2.2 Intercambiadores de calor helicoidales	24
2.2 Humectabilidad de superficies	24
2.3 Transformadores Térmicos por Absorción por componentes individuales ...	26
2.4 Transformadores Térmicos por Absorción de componentes dúplex	27

CAPÍTULO III
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.2 Descripción del Transformador Térmico por Absorción	30
3.1 Descripción del Evaporador-Absorbedor	32
3.2 Circuito de la mezcla Absorbente	34
3.3 Circuito del Refrigerante	35
3.4 Circuito del agua a destilar	36
3.5 Instrumentación del EV-AB	37
3.6 Mejoras realizadas al EV-AB	38
3.7 Descripción de las pruebas experimentales	40
3.8 Balance de masa y energía en el componente dúplex EV-AB	43

CAPÍTULO IV
ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Análisis de incertidumbre	50
4.2 Análisis de resultados en el circuito del refrigerante	51
4.3 Análisis de textura del Evaporador.....	58
4.4 Análisis de resultados en el circuito de la mezcla absorbente	59
4.5 Análisis de resultados en el circuito del agua a destilar	66

CAPÍTULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones	68
5.2 Recomendaciones	70

<i>REFERENCIAS</i>	72
<i>Apéndice 1 Diagrama de tubería e instrumentación del TTA</i>	76
<i>Apéndice 2 servicios auxiliares</i>	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Técnicas disponibles para mejorar la transferencia de calor	13
Tabla 3.1 Capacidades de diseño de los componentes del TTA	31
Tabla 3.2 Instrumentación instalada en el EV-AB	37
Tabla 3.3 Condiciones de operación Delgado-Gonzaga (2018)	42
Tabla 4.1 Valores promedio de las incertidumbres.....	51
Tabla 4.2 Potencias obtenidas con textura lisa y textura Sandblast	53
Tabla 5.1 Comparación de resultados entre textura lisa y Sandblast	70
Tabla A1. Bomba centrífuga del agua de calentamiento del EV y GE	77
Tabla A2. Bomba de desplazamiento positivo del circuito de la mezcla de trabajo	77
Tabla A3. Bomba presurizadora agua a destilar	78
Tabla A4. Enfriador comercial (Chiller) para el CO.....	78
Tabla A5. Fuente de calor para el GE	78
Tabla A6. Fuente de calor para el EV	79
Tabla A10. Sensores de temperatura pt-100.....	79
Tabla A8. Transductor de presión circuito de agua impura	80
Tabla A9. Manovacúmetro del EV-AB y GE-CO.....	80
Tabla A11. Flujómetro para mezcla de trabajo salidas del GE y del AB	80
Tabla A12. Flujómetro para Refrigerante entrada al EV	81
Tabla A13. Flujómetro para el agua a destilar	81
Tabla A14. Flujómetros del agua de calentamiento.....	81
Tabla A15. Flujómetro para agua de enfriamiento del CO	81
Tabla A7. Adquisidor de datos	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Superficie mecanizada para favorecer la ebullición Webb (1972)	14
Figura 1.2 (a) Diferentes tubos usados para mejorar la transferencia de calor a) tubo con inserto, b) tubo corrugado, c) tubo dimpled	15
Figura 1.3 (a) Sección transversal de una superficie porosa (b) partículas usadas para crear superficies porosas Webb, R. L. (2004) (c) MEB Electroerosión recubrimiento de Boro Jiang, W. (2011).....	15
Figura 1.4 Pilares de silicio (a) pilares con altura de 10 μm (b) pilares con altura de 20 μm Chu, K. H. (2012) (c) MEB capa de titanio con espesor de 70 nm sobre nanopilares Du, K., (2011)	16
Figura 2.1 IC de tubos concéntricos a diferentes regímenes de flujo Çengel & Ghajar, (2011).....	21
Figura 2.2 Escenarios posibles de humectabilidad sobre superficies a) parcialmente humectado, b) totalmente humectado y c) no humectado	25
Figura 2.3 Ángulo de contacto de un líquido sobre un sólido	25
Figura 2.4 Ángulo de contacto de un líquido sobre un sólido con superficie curva	26
Figura 2.5 Componentes principales de un Transformador Térmico por Absorción dentro de un ciclo termodinámico	27
Figura 2.6 TTA con componentes dúplex en un ciclo termodinámico Presión Temperatura	28
Figura 3.1 Componentes principales del TTA	31
Figura 3.2 Características geométricas del componente dúplex EV-AB	33
Figura 3.3 Circuito de la mezcla de trabajo del TTA.....	34
Figura 3.4 Circuito del refrigerante	35
Figura 3.5 Circuito de agua a destilar.....	36
Figura 3.6 Abrasivos usados en la textura Sandblast	38
Figura 3.7 Flujómetro instalado para el agua de calentamiento del EV.....	39
Figura 3.8 Especificaciones transductor de presión instalado	40

Figura 3.9 Variables utilizadas en las pruebas experimentales del EV	40
Figura 3.10 Corrientes de temperatura en estado estable del TTA.....	41
Figura 3.11 Banco experimental para pruebas de escurrimiento	43
Figura 3.12 Diagrama usado para balances de masa y energía en el EV-AB...	44
Figura 4.1 Potencias térmicas alcanzadas durante la evaluación del EV-AB....	52
Figura 4.2 comportamiento de $Q_{EV,ext}$ en función de $\dot{m}_{EV,Ref}$	54
Figura 4.3 Comportamiento de $Q_{EV,ext}$ en función de $T_{EV,in}$ y $\dot{m}_{EV,hw}$	55
Figura 4.4 Comportamiento de $\alpha_{EV,flm}$ en función de $\dot{m}_{EV,Ref}$	56
Figura 4.5 Comportamiento de $\alpha_{EV,hw}$ en función de $\dot{m}_{EV,hw}$ a diferentes temperaturas de operación	57
Figura 4.6 Humectabilidad de la helicoidal a) Textura Sandblast y b) Textura lisa	58
Figura 4.7 Potencias del AB $Q_{AB,ext}$ obtenidas durante las evaluación experimental	59
Figura 4.8 $Q_{AB,ext}$ en función de $Q_{EV,ext}$ a diferentes flujos de refrigerante.....	60
Figura 4.9 Comportamiento de $Q_{AB,ext}$ en función de ΔX_{LiBr} (% en LiBr-H ₂ O)	61
Figura 4.10 $\alpha_{AB,flm}$ en función de $\dot{m}_{EV,Ref}$ a diferentes intervalos de temperatura y agua de calentamiento.....	62
Figura 4.11 Comportamiento de $\alpha_{AB,ad}$ en función de $\dot{m}_{EV,Ref}$, $\dot{m}_{EV,hw}$ y $T_{EV,hw,in}$	63
Figura 4.12 Distribución de la película descendente y perfil de temperatura sobre el cuerpo del AB	64
Figura 4.13 Comparativa del incremento de $Q_{AB,ext}$ entre la textura lisa y la textura Sandblast.....	65
Figura 4.14 Tasa de destilado a diferentes condiciones de operación del EV-AB	66
Figura 4.15 Diagrama con variables de temperatura del circuito de agua a destilar	67

Nomenclatura

AB	Absorbedor
Ar	Número de Arquímedes
B	Bomba
CO	Condensador
Cp	Calor específico [kJ/kgK]
D	Diámetro [m]
EC	Economizador
EV	Evaporador
F	Flujómetro
GE	Generador
h	Entalpía [kJ/kg]
\dot{m}	Flujo másico [kg/s]
Nu	Número de Nusselt
P	Presión [Pa]
Pr	Número de Prandt
Q	Potencia térmica [kW]
R	Radio [m]
Re	Número de Reynolds
S	Sensor
T	Temperatura [°C]
TTA	Transformador Térmico por Absorción
X	Concentración % en peso LiBr-H ₂ O

Subíndices

ac	Agua de calentamiento
ai	Agua impura
ad	Agua destilada
in	Entrada
out	Salida
int	Interno
ext	externo
Ref	Refrigerante

Símbolos Griegos

μ	Viscosidad dinámica [Pa·s]
Γ	Flujo másico/longitud [kg/ms]
δ	Espesor de película [m]
k	Conductividad térmica [W/m°C]
ρ	Densidad [kg/m ³]
α	Coficiente de transferencia calor [W/m ² °C]

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES

Introducción

Este capítulo presenta una breve revisión bibliográfica de trabajos teóricos y experimentales sobre superficies con texturas mejoradas para la transferencia de calor con cambio de fase, enfocándose en los aspectos de ebullición y evaporación. Se presentan trabajos sobre evaporadores y absorbedores. Se plantea el problema de investigación y la justificación. Asimismo, se menciona la hipótesis y se formulan el objetivo general y los objetivos específicos de este trabajo.

1.1 Antecedentes: Superficies mejoradas para la transferencia de calor

Con los constantes avances en los métodos de micro y nano-fabricación con las que se pueden diseñar las superficies sólidas, se ha provocado un gran interés en el tema de la ingeniería de superficies para la transferencia de calor con cambio de fase. El desarrollo de micro tecnologías ha hecho posible y factible el control de alta resolución de la textura superficial para distintas aplicaciones sobre escalas de longitud que van desde los niveles moleculares hasta centímetros. En esta revisión se mencionan las diversas técnicas disponibles para estas superficies, debido a la importancia que tienen en innumerables aplicaciones industriales, así como en diversos sectores de investigación científica y tecnológica.

Esencialmente se consideran tres procesos para el cambio de fase, los cuales son: ebullición, condensación y congelación; sin embargo, la ebullición y la condensación se presentan en diversos problemas de ingeniería como pueden ser ciclos de potencia o refrigeración, por ejemplo, en los

evaporadores en los que ocurre el proceso de ebullición debido a que en ellos hay involucrados grandes flujos de calor, Holman (1999). En el caso de la ebullición, ésta se lleva a cabo en la interfase sólido-líquido cuando el líquido se pone en contacto con una superficie la cual mantiene una temperatura superior a la temperatura de saturación del líquido. Por su parte, la evaporación se realiza en la interfase vapor-líquido cuando la presión de vapor es menor que la presión de saturación del líquido Cengel (2004).

Dentro de estos procesos la superficie en la cual se lleva a cabo el cambio de fase juega un papel muy importante debido a que hay características en la textura de estas superficies que benefician este cambio. Estas características dependen del fluido y del gradiente de temperatura. Los coeficientes de transferencia de calor más grandes se desarrollan cuando la fase continua y discreta del fluido se encuentran en contacto con la superficie sólida, Patankar (2010). Existen diversas técnicas las cuales proporcionan texturas óptimas para la transferencia de calor con cambio de fase. En general, una superficie con una textura áspera mejora la transferencia de calor en comparación con una lisa, debido a que existe mayor área de contacto para la transferencia de calor y mayor número de sitios para la nucleación Webb (1981). Para crear estas texturas ásperas existen diversos métodos, los cuales pueden ser maquinados o por desbastes de abrasivos con las cuales se obtienen texturas simples, pero con una mayor transferencia de calor. Los procesos químicos y electroquímicos también son usados como métodos para producir texturas más pronunciadas y complejas como superficies porosas Hendren (2009), las cuales benefician la nucleación. La **Tabla 1.1** presenta una clasificación de las diferentes técnicas disponibles para aplicaciones de transferencia de calor con cambio de fase.

Tabla 1.1 Técnicas disponibles para mejorar la transferencia de calor, Attinger (2014)

Categoría	Tipo de proceso	Método de fabricación	Distribución del patrón	Forma y tamaño	Material
Mecanizado	Sustractivo	Sandblast	Aleatorio	Aleatorio (μm)	Cobre
		Mecanizado	Regular	Controlado (μm -mm)	Acero
		Electroquímico	Aleatorio	Controlado (10-200nm)	Alúmina
Recubrimientos	Aditivo	Sinterizado	Aleatorio	Complejo (μ -mm)	Partículas de oxido
		Electrospray	Aleatorio	Aleatorio y complejo	Partículas cBN sobre XC-co
		Pegado	Aleatorio	Controlado (1-100 μm)	Metal o partículas cerámicas
Litografía	Aditivo o sustractivo	Fotolitografía y litografía de haz de electrones	Regular	Controlado (nm-100 μm)	Pilares metálicos sobre Si
		Litografía de haz de electrones	Regular	Controlado (100 nm - 1 μ)	

Para el caso del mecanizado Berenson (1962) realizó un estudio en el cual analizó el flujo de calor en ebullición nucleada para superficies rugosas mediante un proceso de desbaste por abrasivos (Sandblast) se observó que el coeficiente convectivo mejoró en un 600 por ciento debido a las variaciones en el acabado superficial. Webb (1972) patentó una superficie aletada (**Figura 1.1**). Dichas aletas fueron dobladas una atrás de la otra, con la finalidad de crear una textura con pequeñas cavidades las cuales son capaces de promover y sostener la nucleación. Chowdhury y Winterton (1985) presentan en sus trabajos un efecto claro de la rugosidad, manifestando un incremento de la transferencia de calor al incrementarse la rugosidad.

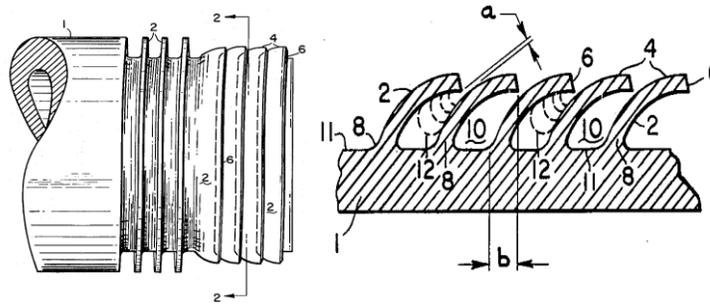


Figura 1.1 Superficie mecanizada para favorecer la ebullición Webb (1972)

Kang (2000) realizó ensayos en un recipiente con agua saturada a presión atmosférica para tubos horizontales y verticales. Sus resultados indican que el incremento de la rugosidad superficial mejora la transferencia de calor. El autor destaca que con una rugosidad mayor se producirán más burbujas de mayor tamaño y con mayor frecuencia. Jones (2009), estudió la influencia de la rugosidad superficial en la ebullición nucleada para lo cual utilizó diversos acabados superficiales. Observó que la relación entre el coeficiente de transferencia de calor y el flujo de calor varía con la modificación del conjunto fluido-superficie debido a que varía la humectabilidad y el ángulo de contacto y, por tanto, la nucleación. Los tubos con insertos, corrugados o tubos dimpled García (2012) también son usados para incrementar la transferencia de calor (**Figura 1.2**). A diferencia de los trabajos mencionados, éstos proporcionan una mayor área y regímenes de flujo de mayor turbulencia. Los tubos corrugados se fabrican comúnmente en muchos metales tales como cobre, aleaciones de cobre y acero mientras que los tubos dimpled se fabrican de forma más artesanal.

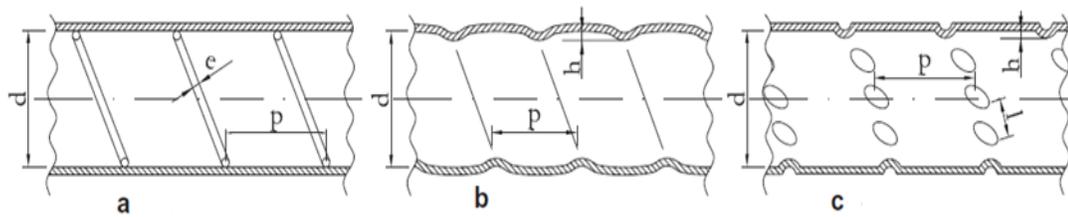


Figura 1.2 (a) Diferentes tubos usados para mejorar la transferencia de calor a) tubo con inserto, b) tubo corrugado, c) tubo dimpled

Las texturas también pueden ser agregadas a las superficies por medio de recubrimientos los cuales pueden ser más complejos en su geometría y con mayor selección en cuestión de materiales. Existen diversos métodos incluyendo sinterización, Zhou (2012), recubrimientos por spray, recubrimiento por inmersión Jiang (2013), recubrimiento por plasma y por pegado Jiang (2011). Las estructuras superficiales hechas con técnicas de recubrimiento tienden a ser complejas y distribuidas aleatoriamente en tamaño y forma

Figura 1.3 El grosor del recubrimiento puede variar de unos cuantos nanómetros a cientos de micrómetros.

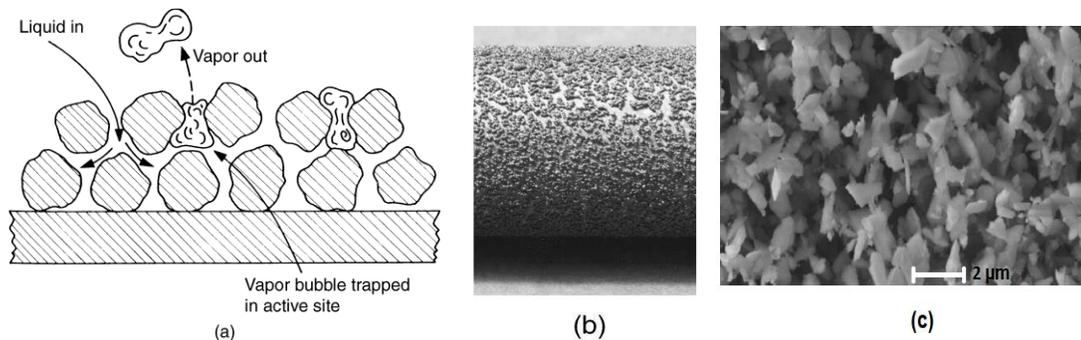


Figura 1.3 (a) Sección transversal de una superficie porosa (b) partículas usadas para crear superficies porosas Webb (2004) (c) MEB Electro-spray recubrimiento de Boro Jiang (2011)

La litografía es otra forma de crear texturas en diferentes superficies. En comparación con el maquinado y los recubrimientos, ésta proporciona formas y tamaños más exactos (**Figura 1.4**). Los patrones generados pueden ser de escalas de micrómetros o de escalas de nanómetros utilizando la litografía por haz de electrones, Du (2011). Una de las limitantes en estas técnicas es su elevado costo de fabricación

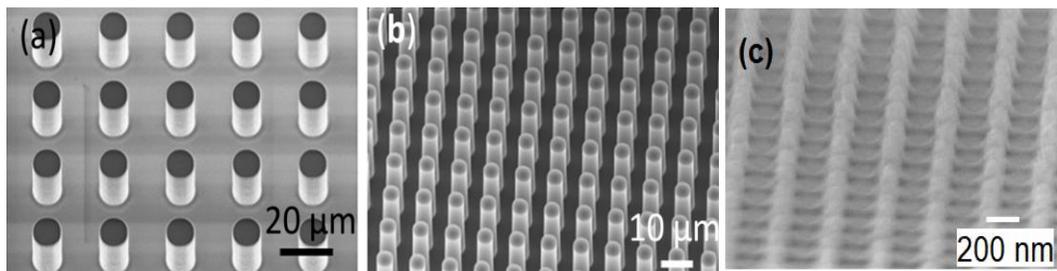


Figura 1.4 Pilares de silicio (a) pilares con altura de 10 µm (b) pilares con altura de 20 µm Chu (2012), (c) MEB capa de titanio con espesor de 70 nm sobre nanopilares Du (2011)

Las diferentes técnicas para mejorar la transferencia de calor con cambio de fase han demostrado cada vez un mayor grado de sofisticación con el que se pueden diseñar las superficies. Estas técnicas abarcan métodos mecánicos, físicos o químicos que pueden implicar el aporte de otro material en escalas que van desde nanómetros hasta milímetros para cambiar las propiedades superficiales. Por una parte, esto ha mejorado la transferencia de calor en diversos componentes térmicos; por otra parte, contribuye al ahorro energético por permitir el aumento de eficiencia.

1.2 Problema de investigación

El componente dúplex Evaporador-Absorbedor (EV-AB) es un intercambiador de calor el cual está acoplado a un Transformador Térmico por Absorción (TTA). Éste se encuentra en el laboratorio de Ingeniería Térmica Aplicada del CIICAp-UAEM. Análisis previos de este componente realizados por Delgado (2018) donde experimentalmente se registraron potencias máximas en el EV y AB de 1.60 y 1.70 kW respectivamente, demuestran que las potencias están por debajo de las de diseño 2 kW Demesa (2010) lo cual repercute en un bajo desempeño del TTA.

1.3 Justificación

El TTA es una máquina térmica que permite la revalorización de la energía térmica residual de algún proceso industrial, o de una fuente de energía renovable. El TTA se conforma de cuatro intercambiadores de calor: Evaporador y Absorbedor, Generador y Condensador. Cada uno de ellos desempeña un papel muy importante dentro del ciclo termodinámico de esta máquina térmica, por lo cual cada componente depende de los otros para funcionar de forma óptima. En el primer análisis realizado al TTA Morales (2014) reporta los primeros resultados experimentales con este TTA. Entre sus conclusiones se enfatiza que el Evaporador limita el rendimiento del Absorbedor lo cual repercute en el rendimiento general del TTA. Un análisis posterior realizado por Delgado (2018) demostró que uno de los factores que afectan la potencia térmica del Evaporador es su correcta humectabilidad que es esencial en intercambiadores de calor helicoidales por película descendente. Por lo anterior se pretende implementar una textura a las helicoidales del Evaporador y Absorbedor para tener una mejor transferencia de calor en las helicoidales en estos componentes.

1.4 Hipótesis

Las texturas ásperas o rugosas de las superficies tienen más altos los coeficientes de transferencia de calor a diferencia de las superficies con texturas lisas, debido a que presentan mayor área de contacto para el intercambio de calor y mayor turbulencia en el flujo del fluido. Por lo tanto, a menudo las superficies de los tubos se hacen intencionalmente ásperas corrugadas o con aletas con el fin de mejorar el coeficiente de transferencia de calor por convección y conducción. Un factor a considerar de estas texturas es que tienen mayor retención de fluido, lo cual es un elemento importante en intercambiadores de calor de película descendente con cambio de fase. Considerando una mayor área de contacto y una mayor retención del fluido en el Evaporador y Absorbedor, éstos incrementarían sus potencias térmicas.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Mejorar las potencias en el Evaporador y Absorbedor mediante la implementación de una textura mejorada para la transferencia de calor sobre las helicoidales de estos componentes

1.5.2 Objetivos específicos

- Determinar factores que afectan las potencias térmicas en el Evaporador y en el Absorbedor mediante pruebas de humectabilidad en las superficies de las helicoidales.
- Implementar mejoras en el componente dúplex EV-AB
- Determinar los intervalos de operación que lleven a los componentes Evaporador y Absorbedor a un mejor desempeño

1.6 Estructura de la tesis

En el capítulo dos se describe el marco teórico sobre el cual se basa este trabajo. Se mencionan los diferentes tipos de intercambiadores de calor enfocándose a los de tipo helicoidal. De igual forma se hace mención de bombas de calor y transformadores térmicos por absorción.

En el capítulo tres se presenta la metodología de este trabajo. Se describe el Evaporador y Absorbedor que se evaluó. Se describe el transformador térmico por absorción en el cual se llevaron a cabo las pruebas experimentales junto con el ciclo termodinámico que sigue esta máquina térmica. Por último, se realizan los balances de masa y energía en el evaporador y absorbedor.

En el capítulo cuatro se muestran y discuten los resultados obtenidos durante las pruebas experimentales. Se muestra el funcionamiento del equipo operando bajo ciertas condiciones de estabilidad, para posteriormente hacer un análisis de los resultados obtenidos.

En el capítulo cinco se reportan las conclusiones y posteriormente se dan a conocer las recomendaciones.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Introducción

En este capítulo se mencionan los conceptos generales sobre intercambiadores de calor, bombas de calor y transformadores térmicos, se describe su funcionamiento y componentes que constituyen estas máquinas térmicas. Por último, se señala la importancia de la textura de las superficies para la humectabilidad de superficies.

2.1 Intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor (IC) son equipos que hacen intercambio de calor entre dos o más fluidos en los que existe un gradiente de temperatura sin que éstos se mezclen. Prácticamente todo sistema térmico necesita uno o más intercambiadores de calor para funcionar. Son numerosos los ejemplos en los que son usados para diversas aplicaciones. Éstas incluyen producción de energía, procesos químicos, ingeniería ambiental, aire acondicionado, refrigeración y calefacción. Los intercambiadores de calor difieren de las cámaras de mezclado en el sentido de que no permiten que se combinen los dos fluidos que intervienen. Los intercambiadores de calor se pueden clasificar bajo los siguientes criterios, propuestos por Kakaç (2002):

- Recuperadores o regeneradores
- Contacto directo o indirecto
- Geometría: flujo paralelo a contra flujo o flujo cruzado
- Mecanismo de transferencia: con o sin cambio de fase

El tipo de intercambiador más simple está formado por dos tubos concéntricos de distintos diámetros el cual se denomina intercambiador de tubos concéntricos. La **Figura 2.1** muestra un dibujo esquemático de este intercambiador.

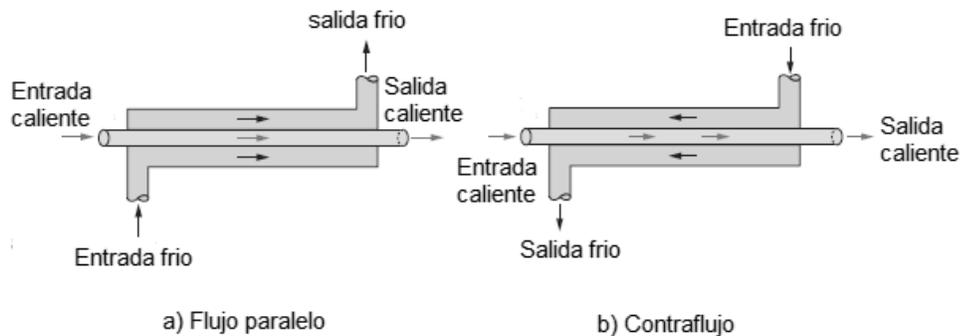


Figura 2.1 IC de tubos concéntricos a diferentes regímenes de flujo Çengel & Ghajar, (2011).

Los intercambiadores de calor se pueden considerar como aparatos de flujo estacionario. Como tales el gasto de masa de cada fluido permanece constante y las propiedades de los fluidos como la temperatura y la velocidad en cualquier entrada o salida siguen siendo las mismas. Con estas suposiciones la primera ley de la termodinámica requiere que la velocidad de la transferencia de calor desde el fluido caliente sea igual a la transferencia de calor hacia el frío. Por lo que se puede enunciar de la siguiente forma:

$$\dot{Q} = \dot{m}_c C_{pc} (T_{c,sal} - T_{c,ent}) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C_{ph} (T_{h,sal} - T_{h,ent}) \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Por lo común un intercambiador de calor está relacionado con dos fluidos que fluyen separados por una pared sólida, el calor se transfiere del fluido caliente hacia la pared por convección, después a través de la pared por conducción y, por último, de la pared hacia el fluido frío de nuevo por convección. Cualesquiera efectos de la radiación suelen incluirse en los coeficientes de transferencia de calor por convección. Así las resistencias térmicas pueden describirse como la resistencia interna por convección, la resistencia de la pared que separa a los dos fluidos de trabajo en este caso por conducción y por último la resistencia externa por convección del fluido frío. Así la ecuación que describe este fenómeno puede enunciarse de la siguiente manera:

$$R = R_{total} = R_i + R_{pared} + R_{ext} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_{ext} A_{ext}} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

En el análisis de los intercambiadores de calor resulta conveniente combinar todas las resistencias térmicas que se encuentran en la trayectoria del flujo de calor del fluido caliente hacia el frío en una sola resistencia R y expresar la razón de la transferencia de calor entre los dos fluidos como:

$$Q = U A_s \Delta T = U_i \dot{A}_i \Delta T = U_{ext} A_{ext} \Delta T \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde U es el coeficiente global de transferencia de calor, agrupando la ecuación se puede expresar de la siguiente forma:

$$\frac{1}{U A_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_{ext} A_{ext}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

En la ecuación anterior se puede apreciar que existen dos coeficientes de transferencia de calor totales lo cual nos indica que hay dos áreas superficiales para la transferencia de calor las cuales en general no son iguales entre sí. Por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor global U de un

intercambiador de calor no tiene sentido si no se especifica el área sobre la cual se basa. Cuando la pared del tubo es pequeña y la conductividad térmica del material del mismo es alta, como suele ser el caso, la resistencia térmica de dicho tubo es despreciable $R_{pared} \approx 0$ y las superficies interior y exterior del mismo son semejantes $A_i = A_{ext.} = A_s$. Entonces la ecuación 5 para el coeficiente de transferencia de calor total se puede simplificar para quedar de la siguiente forma:

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_{int}} + \frac{1}{h_{ext.}} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Dónde h_{int} y h_{ext} son los coeficientes de transferencia de calor de adentro y fuera del tubo de tal forma que la transferencia de calor está en función del coeficiente más bajo. Estos coeficientes se determinan en función del número de Nusselt Ec.7 en donde este número representa el mejoramiento de la transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación con la conducción a través de la misma capa. Entre mayor sea el número de Nusselt, más eficaz es la convección. Un número de Nusselt de $Nu = 1$ para una capa de fluido representa transferencia de calor a través de ésta por conducción pura Çengel (2011).

$$Nu = \frac{hLc}{k} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

El término Lc representa la longitud característica de la superficie de intercambio de calor. Este parámetro depende de la geometría del intercambiador de calor. Existen diversos métodos para mejorar la transferencia de calor como, por ejemplo, el aumento de la turbulencia en los fluidos de intercambio de calor o el aumento de la superficie de intercambio de calor.

2.2 Intercambiadores de calor helicoidales

Se han investigado diferentes métodos y técnicas para mejorar la transferencia de calor en intercambiadores. Éstas se han clasificado en dos categorías principales, Bergles (1983): técnicas activas que requieren generación externa (vibración o campos electromagnéticos) y técnicas pasivas que no necesitan generación externa (geometrías especiales). Uno de los métodos pasivos usado muy frecuentemente es el de tubos en espiral o tubos helicoidales la cual ha sido objeto de varios estudios. Las tasas de transferencia de calor en los intercambiadores helicoidales son más altas en comparación con los tubos rectos, por lo cual son ampliamente utilizados en aplicaciones industriales. Debido a la alta eficiencia en la transferencia de calor y el volumen compacto, los intercambiadores de tubo en espiral se utilizan ampliamente en calderas, frigoríficos, reactores nucleares, plantas químicas, así como en dispositivos militares y de aire acondicionado. De acuerdo con Ghorbani (2010), su principal aplicación se encuentra en los sistemas solares domésticos de agua caliente (SDHW – Solar Domestic Hot Water); sin embargo, su uso en sistemas de recuperación de calor se encuentra en aumento.

2.2 Humectabilidad de superficies

La humectabilidad es uno de los fenómenos de la textura de la superficie que representa la interacción sólido-líquido. Este parámetro depende de las fuerzas intermoleculares de los materiales en contacto. La fuerza de adhesión entre el líquido y el sólido provoca que el líquido se extienda por la superficie, mientras que la de cohesión del líquido hacen que éste se abulte y tienda a evitarla. Un parámetro muy importante para definir la humectabilidad es el ángulo de contacto entre dos fases (sólido-líquido). Por ejemplo, en la **Figura 2.2** se representa el comportamiento que puede tener una gota de agua sobre

una superficie sólida; posiblemente el líquido no se extenderá por completo, sino que sus bordes formarán un ángulo, Bormashenko (2018).

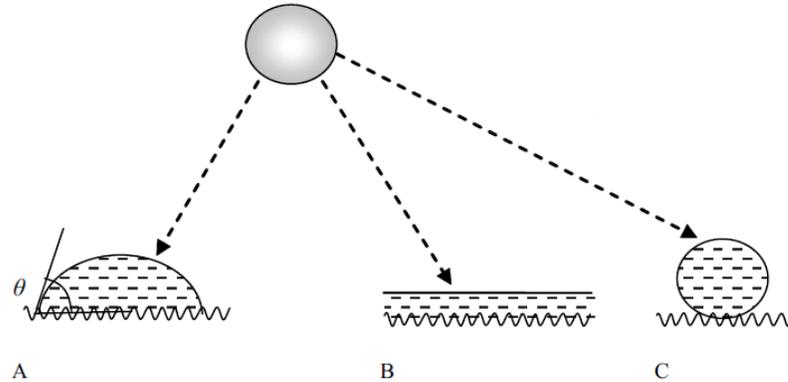


Figura 2.2 Escenarios posibles de humectabilidad sobre superficies a) parcialmente humectado, b) totalmente humectado y c) no humectado

El ángulo de contacto θ es el ángulo que forma el líquido respecto a la superficie de contacto con el sólido (**Figura 2.3**). Está determinado por la resultante de las fuerzas de adhesión y cohesión. Los términos humectado y no humectado se emplean en varias situaciones prácticas y tienden a ser definidos en términos del efecto deseado. Siempre que el ángulo de contacto entre un líquido y un sólido es cercano a cero, el medio es hidrofílico y el líquido tiende a esparcirse sobre el sólido de manera fácil; pero, si el ángulo de contacto es mayor de 90° , el medio es hidrofóbico de modo que el líquido tiende a tomar una forma de esfera y a desplazarse fácilmente sobre la superficie.

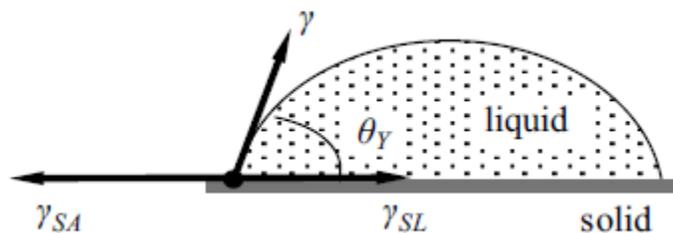


Figura 2.3 Ángulo de contacto de un líquido sobre un sólido

El ángulo de contacto para una superficie curva se ve afectado por la curvatura de la misma superficie (**Figura 2.4**). Para este caso el ángulo de contacto es la diferencia del ángulo aparente $\tilde{\theta}$ y el ángulo que forma la tangente del último punto de contacto del líquido y el sólido θ .

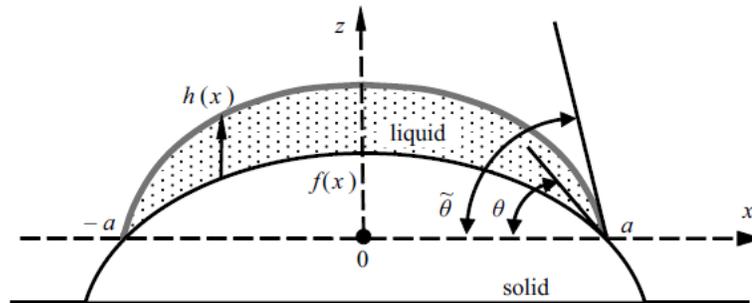


Figura 2.4 Ángulo de contacto de un líquido sobre un sólido con superficie curva

2.3 Transformadores Térmicos por Absorción por componentes individuales

Los Transformadores Térmicos por Absorción (TTA) son un tipo de bomba de calor. Éstas máquinas térmicas elevan la temperatura de una fuente de baja energía térmica a un nivel más alto. Éstos equipos pueden recuperar el calor de desecho de diversos procesos industriales haciéndolos muy atractivos para la revalorización de energía. El calor obtenido puede ser usado en aplicaciones residenciales, comerciales e industriales; por ejemplo, en procesos de calefacción, refrigeración, purificación de efluentes, Holland *et al.* (1999). El TTA opera mediante el ciclo inverso de una bomba de calor por absorción convencional para amplificar el nivel térmico de la fuente de calor, como se muestra en el esquema de la **Figura 2.5**. Los TTA están conformados por diversos intercambiadores de calor los cuales son un Evaporador, Absorbedor, Economizador, Generador y un Condensador. Estos componentes se encuentran separados entre sí mediante corazas individuales y conectados

únicamente mediante tuberías por donde circula la mezcla de trabajo y el refrigerante.

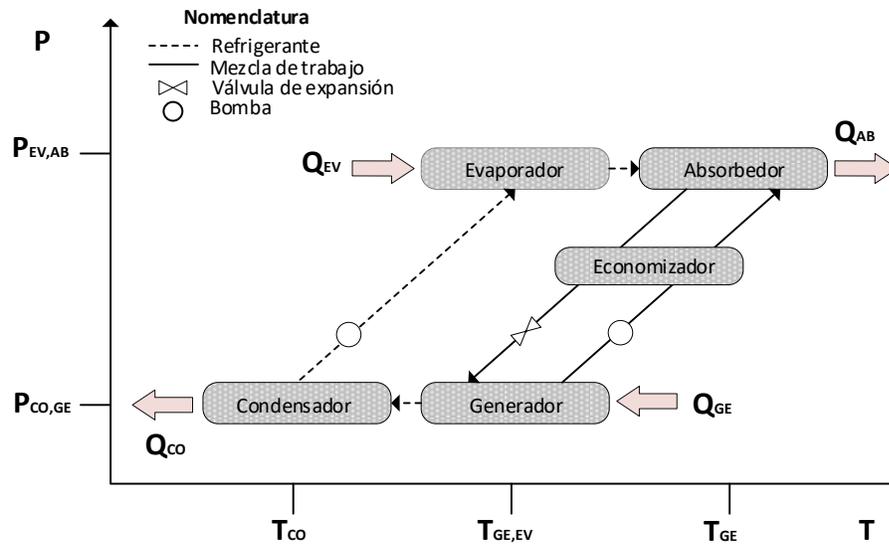


Figura 2.5 Componentes principales de un Transformador Térmico por Absorción dentro de un ciclo termodinámico

En los TTA se emplea una mezcla de trabajo, formada por un par de trabajo (refrigerante y absorbente). El comportamiento del TTA depende de las propiedades termodinámicas, químicas y físicas del refrigerante y absorbente. Los pares de mezcla de trabajo usados más comúnmente son el amoníaco/agua, agua/bromuro de litio y agua/bromuro de litio-etilenglicol.

2.4 Transformadores Térmicos por Absorción de componentes dúplex

Los TTA por componentes dúplex, al igual que los de componentes individuales cuentan con un Evaporador, Absorbedor, Economizador, Generador y un Condensador. Sin embargo, la disposición geométrica de éstos es diferente debido a que el Evaporador y Absorbedor se encuentran acoplados en una misma coraza al igual que el Generador y el Condensador, se consideran como componentes dúplex debido a que realizan operaciones

unitarias en un mismo cuerpo o coraza (**Figura 2.6**). Esta disposición geométrica ofrece ciertas ventajas al ser más compactos que los TTA convencionales ya que se reducen las pérdidas de calor en tuberías y se mejora la estabilidad disminuyendo el tiempo para alcanzar ésta; sin embargo, determinar el comportamiento e interacción entre componentes resulta más complejo debido al limitante de implementar instrumentos de medición en cada operación unitaria.

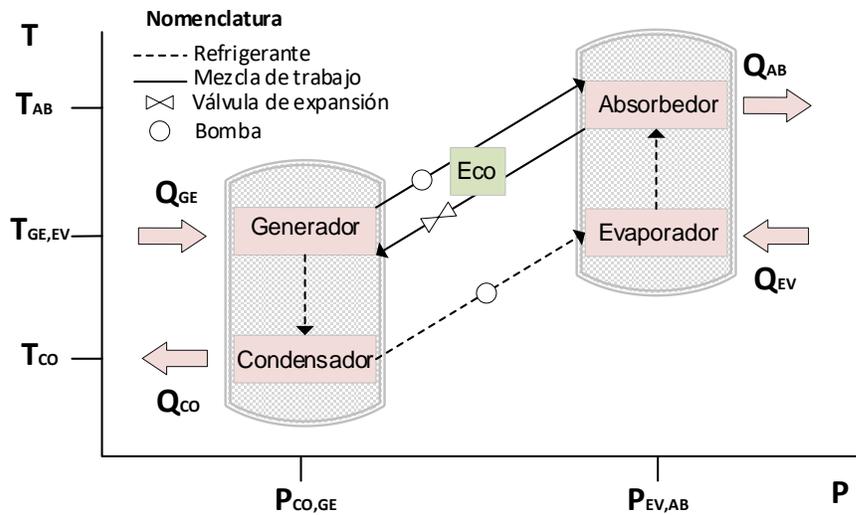


Figura 2.6 TTA con componentes dúplex en un ciclo termodinámico Presión Temperatura

Uno de los principales parámetros de operación de los TTA es el coeficiente real de rendimiento (*COP*), definido como la relación entre el calor útil entregado por el Absorbedor Q_{AB} y el calor total suministrado al sistema en el Generador Q_{GE} y el Evaporador Q_{EV} la cual es una medida de la eficiencia del proceso en un TTA y se define como:

$$COP = \frac{Q_{UTIL}}{Q_{SUMINISTRADO}} = \frac{Q_{AB}}{Q_{GE} + Q_{EV}} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Otro parámetro importante en el comportamiento del TTA es el incremento neto de temperatura (GTL, por sus siglas en inglés Gross Temperature Lift), el cual nos permite ver el incremento del nivel de temperatura en el Absorbedor T_{AB} (calor útil) con respecto a la temperatura del Evaporador T_{EV} (calor de desecho). Debido a que se encuentran a la misma presión, se define con la siguiente ecuación:

$$GTL = T_{AB} - T_{EV} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

La relación de flujo (RF) se utiliza para el diseño y análisis, ya que muestra la relación de los flujos de masa entre el Absorbedor y el Condensador.

$$FR = \frac{X_{GE}}{X_{AB}} = \frac{\dot{m}_{AB}}{\dot{m}_{Ref}} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

En donde X representa el porcentaje en peso de la mezcla de trabajo en el Generador y Absorbedor, mientras que \dot{m} representa los flujos másicos en el Absorbedor y refrigerante.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Introducción

Este capítulo describe el equipo experimental EV-AB el cual se encuentra acoplado a un Transformador Térmico por Absorción en el Laboratorio de Ingeniería Térmica Aplicada F. A. Holland del Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos. Se describe el ciclo termodinámico del EV-AB que sigue dentro del transformador térmico. Se presenta la metodología mediante la cual se llevaron a cabo las pruebas experimentales, así como los balances de materia y energía que se consideraron en el componente dúplex EV-AB.

3.2 Descripción del Transformador Térmico por Absorción

El Transformador Térmico por Absorción está formado principalmente por cinco intercambiadores de calor, los cuales son un Generador (GE), Condensador (CO), Evaporador (EV), Absorbedor (AB) y un Economizador (EC). Todos estos componentes, a excepción del EC, son intercambiadores de calor helicoidales por película descendente con potencias de diseño de 2 kW (**Tabla 3.1**); mientras que el Economizador tiene un arreglo helicoidal de tubos concéntricos a contra flujo con una potencia de diseño de 1.47 kW y un coeficiente global de transferencia de calor de 94.46 W/m²°C Morales-Gómez (2014). El TTA tiene dos componentes, el EV y el AB que realizan operaciones unitarias en un mismo cuerpo al igual que el GE y el CO. La simulación de calor residual se realiza mediante dos fuentes de calor las cuales proveen de agua de calentamiento al EV y al GE. Estas fuentes son depósitos de agua con una capacidad 18 L para fuente del EV y 70 L para fuente del GE.

Tabla 3.1 Capacidades de diseño de los componentes del TTA

Componente	Capacidad de diseño (Demesa-López 2010)
Evaporador (EV)	2 kW
Absorbedor (AB)	
Generador (GE)	
Condensador (GE)	
Economizador (EC)	1.47 kW

El calentamiento de agua se realiza mediante resistencias térmicas, 3 kW para la fuente de calor del EV y 6 kW para la fuente de calor del GE. Ambas con variadores de voltaje para regular las potencias y ajustar sus temperaturas. El CO es alimentado con agua de enfriamiento por medio de un enfriador (Chiller) con una capacidad de 10 kW. El calor útil obtenido del ciclo termodinámico del TTA se usa para la purificación de agua mediante un proceso de destilación simple. La **Figura 3.1** muestra los componentes principales del TTA.

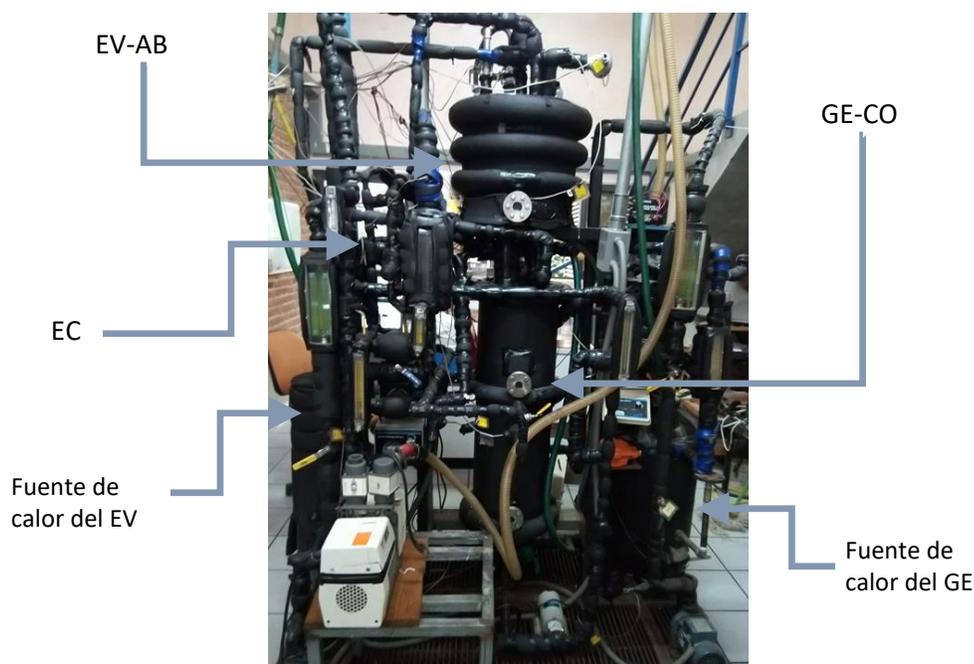
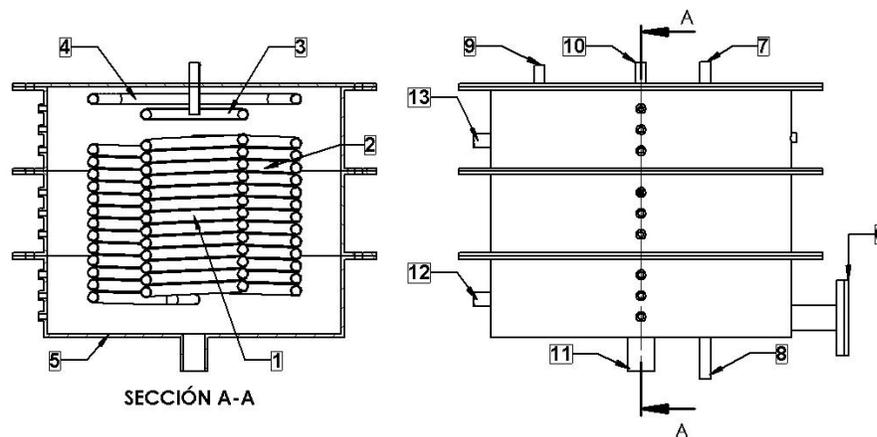


Figura 3.1 Componentes principales del TTA

El par de trabajo es LiBr-H₂O, debido a que es usado ampliamente en sistemas de absorción y se conocen sus propiedades termodinámicas McNelly (1979). El TTA cuenta con una bomba de vacío para alcanzar las condiciones de saturación de la mezcla de trabajo. El intercambio de la mezcla de trabajo entre los componentes del TTA se realiza mediante bombas de desplazamiento positivo y por medio de tubería ½ in de acero inoxidable 316 L para minimizar la corrosión por parte de la mezcla de trabajo, mientras que el agua de calentamiento se recircula por bombas centrifugas y tubería ½ in de acero al carbón cedula 40. Todas las corrientes de fluidos se encuentran instrumentadas con sensores de temperatura a la entrada y salida de cada componente. El **Apéndice 1** muestra un diagrama de tubería e instrumentación del TTA.

3.1 Descripción del Evaporador-Absorbedor

El EV-AB se encuentra acoplado a un Transformador Térmico por Absorción (TTA) para purificación de agua mediante una destilación simple, por medio de la simulación de la recolección de calor de desecho de algún proceso industrial. El EV-AB está constituido por dos intercambiadores de calor helicoidales los cuales se encuentran dentro de una coraza. Cada intercambiador cuenta con su distribuidor de gota. Todos los componentes que constituyen el EV-AB fueron diseñados y construidos en acero inoxidable 316L por Demesa (2010). Ambas helicoidales funcionan como intercambiadores de calor por película descendente. Estas helicoidales se encuentran de forma concéntrica respecto a la coraza, por lo tanto, se considera como un equipo dúplex debido a que se llevan a cabo dos procesos de forma simultánea en una misma coraza, el de evaporación y absorción. Tanto el EV como AB cuentan con igual número de vueltas en las helicoidales, pero con diferentes diámetros de enrollamiento, siendo el EV el que tiene menor diámetro. La **Figura 3.2** muestra las características del EV-AB



Componente	Línea de proceso	Características de las Helicoidales	EV	AB
1.- Evaporador	7.- $\dot{m}_{EV,ac\ out}$	Número de vueltas	13	13
2.- Absorbedor	8.- $\dot{m}_{EV,ac\ in}$	Longitud del tubo (m)	4.65	10.11
3.- Dist. Gota EV	9.- $\dot{m}_{AB,LiBr,in}$	Diámetro ext. de la helicoidal (m)	0.127	0.255
4.- Dist. Gota AB	10.- $\dot{m}_{EV,ref,in}$	Diámetro interno del tubo (m)	0.0111	0.0111
5.- Coraza	11.- $\dot{m}_{AB,LiBr,out}$	Diámetro externo del tubo (m)	0.0127	0.0127
6.- Mirilla	12.- $\dot{m}_{AB,iw\ out}$	Espesor de pared (m)	0.0008	0.0008
	13.- $\dot{m}_{AB,iw\ in}$	Separación entre vuelta (m)	0.003	0.003
		Altura de la helicoidal (m)	0.2	0.2
		Área de transferencia de calor (m ²)	0.18	0.4

Figura 3.2 Características geométricas del componente dúplex EV-AB

El EV-AB también cuenta con dos distribuidores de gota los cuales proveen de refrigerante y mezcla de trabajo a las helicoidales del EV y AB respectivamente. El distribuidor de gota del Evaporador cuenta con 22 orificios con un diámetro de 3 mm distribuidos uniformemente; en cambio, el del Absorbedor cuenta con 70 orificios con un diámetro de 3 mm de igual forma distribuidos uniformemente. El EV tiene la función de generar vapor mediante el refrigerante que suministra su distribuidor de gota sobre su helicoidal. Esto se hace mediante un flujo de agua caliente por dentro de la helicoidal la cual es simulada como calor de desecho de algún proceso industrial. Así mismo, el AB tiene la función de retirar el calor que se genera de una reacción exotérmica, mediante un flujo de agua que circula por la parte interna de la helicoidal de dicho Absorbedor. El EV-EB esta interconectado con el TTA mediante circuitos de refrigerante mezcla absorbente y agua a destilar que distribuyen los fluidos de trabajo y retiran el calor útil del ciclo termodinámico.

3.2 Circuito de la mezcla Absorbente

El absorbente empleado en el circuito bromuro de litio-agua (LiBr-H₂O) el cual es altamente soluble en agua. Al igual que el circuito del refrigerante este se encuentra construido con tubería de acero inoxidable 316 L. El recorrido del absorbente empieza cuando es concentrado por medio de una desorción de agua en el GE y es bombeado mediante una bomba de desplazamiento positivo desde un recolector ubicado en la parte inferior de la helicoidal del GE, hasta un distribuidor de gota situado sobre la helicoidal del AB. Una vez que descende sobre la helicoidal del AB, el absorbente se combina con el vapor de agua que provee el evaporador con la finalidad de propiciar una reacción exotérmica sobre la helicoidal del AB para posteriormente regresar al GE y repetir el ciclo (**Figura 3.3**).

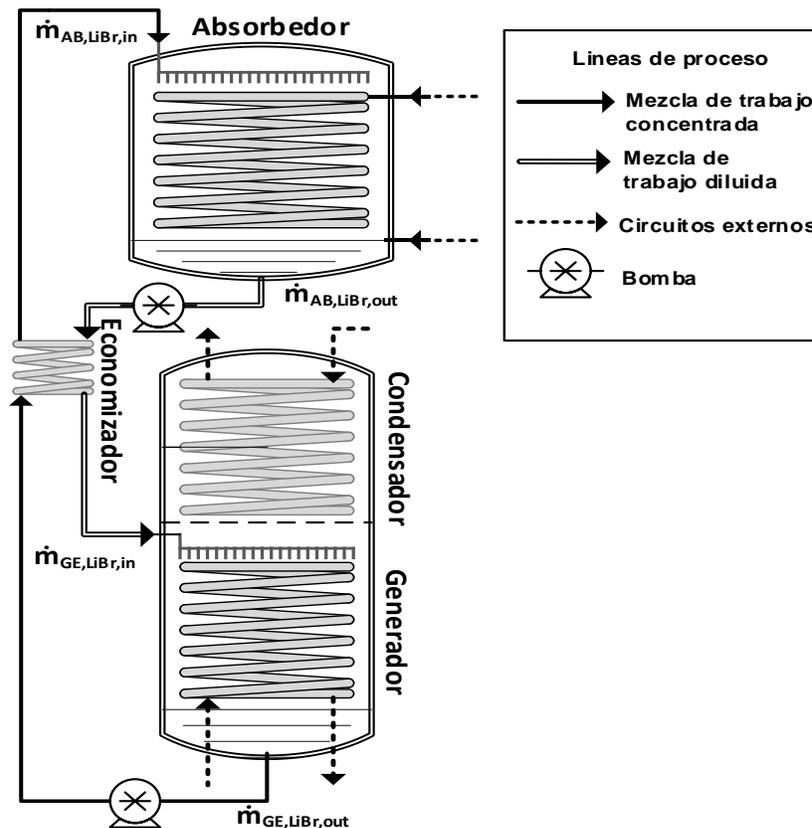


Figura 3.3 Circuito de la mezcla de trabajo del TTA

3.3 Circuito del Refrigerante

El refrigerante utilizado durante el ciclo termodinámico del EV-AB es agua. El circuito empieza cuando esta liberada en fase vapor mediante un proceso de desorción llevado a cabo en el GE. Este vapor asciende de forma vertical a través de una campana sobre el GE para llegar al CO, en el cual se lleva a cabo un cambio de fase de vapor saturado a líquido. Este líquido es almacenado por medio de un recolector para posteriormente ser bombeado hasta un el EV. En el cual se lleva el cambio de fase a vapor saturado para combinarse con la mezcla de trabajo que desciende sobre AB y así propiciar una reacción exotérmica. Una vez combinado con la mezcla de trabajo, éste desciende hasta el GE para repetir el ciclo (**Figura 3.4**).

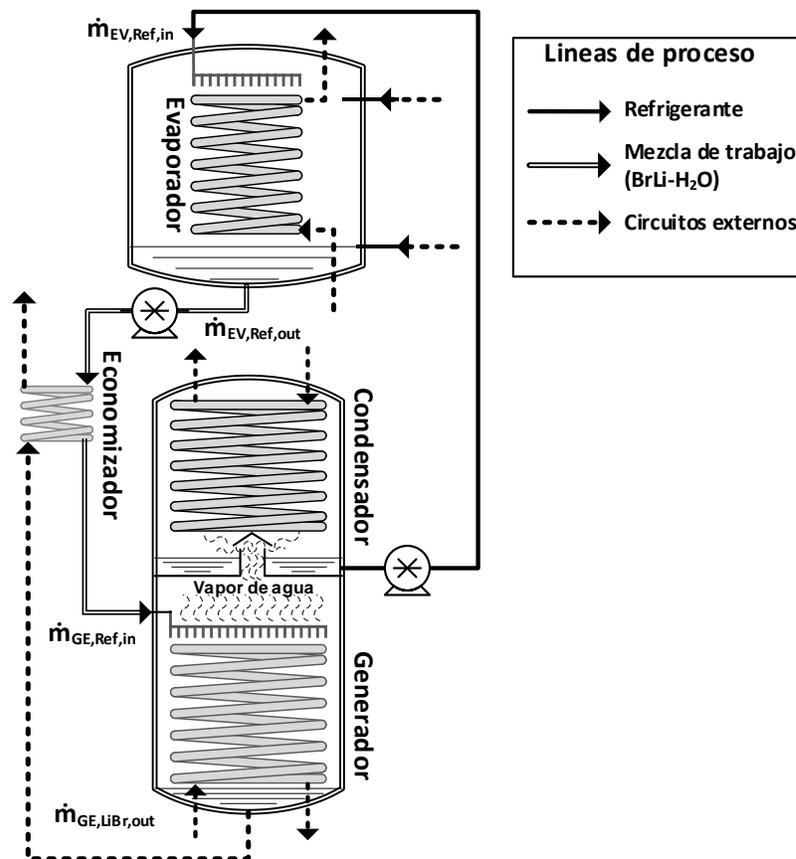


Figura 3.4 Circuito del refrigerante

3.4 Circuito del agua a destilar

El calor liberado de la reacción exotérmica en el EV-AB es recuperado mediante un circuito de agua a destilar la cual retira el calor por la parte interna de la helicoidal. A diferencia de los circuitos del refrigerante y absorbente, éste se encuentra a presión atmosférica. Todo el circuito se encuentra aislado y está constituido por un tanque separador con una capacidad de 6 litros, una sola bomba presurizadora cuyas especificaciones de se presentan en el **Apéndice 2** (servicios auxiliares) un condensador auxiliar y un colector para el agua destilada. Todos estos elementos están conectados mediante tubería de acero al carbón de ½ in NPT cedula 40. El ciclo termodinámico de este circuito empieza recirculando agua desde el tanque separador mediante la bomba presurizadora hacia la helicoidal del AB, con la finalidad de retirar calor de este componente, por lo que sale a una temperatura mayor a la que entra a la helicoidal. Una vez alcanzadas las condiciones de saturación en el tanque separador el vapor asciende por la parte superior del tanque hacia un condensador auxiliar para recolectarse como agua destilada. La **Figura 3.5** muestra este circuito.

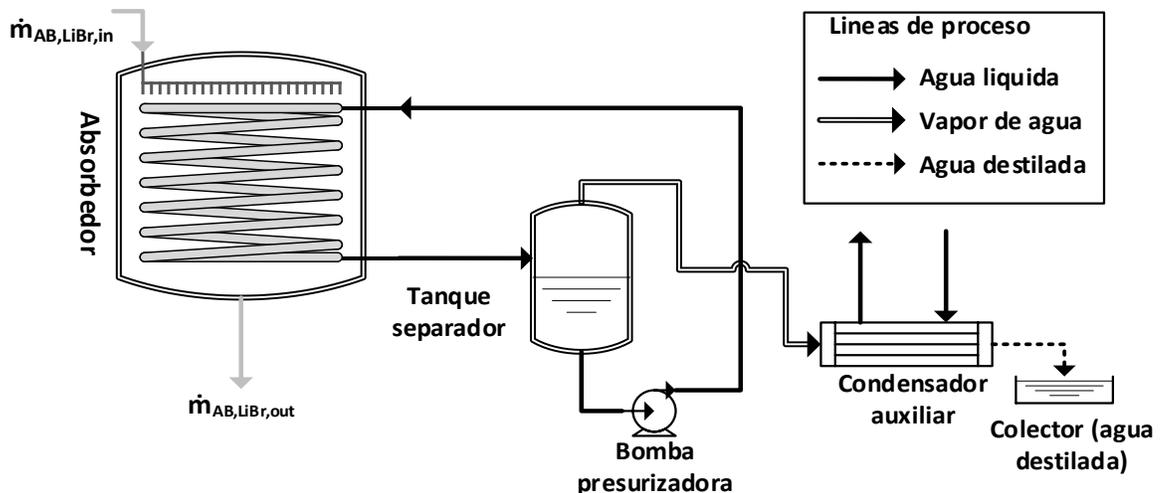


Figura 3.5 Circuito de agua a destilar

3.5 Instrumentación del EV-AB

Para poder conocer las temperaturas de entrada y salida de los fluidos de trabajos, el EV-AB tiene instalado sensores de temperatura tipo PT-100 y RTD. Además, cuenta con transductores de presión en la coraza del EV-AB, los cuales permiten monitorear la presión a la cual se llevan a cabo los procesos de evaporación y absorción. Estos sensores y transductores se encuentran conectados a un adquisidor de datos, que permite visualizar de forma gráfica en una computadora todas las señales que se reciben de los sensores de temperatura y transductores de presión. El EV-AB también cuenta con instrumentación analógica de lectura directa la cual está conformada por medidores de flujo que permiten monitorear y controlar el flujo másico de mezcla absorbente y agua a destilar que se suministra al AB, así como la cantidad de refrigerante y agua de calentamiento del EV. Además de los transductores de presión, se cuenta con dos manovacuómetros que se encuentran en la parte superior de la coraza del EV-AB y del GE-CO. Estos dispositivos permiten conocer la presión durante la operación del equipo experimental de forma visual. La **Tabla 3.2** muestra la instrumentación analógica implementada en el TTA. y el **Apéndice 2** sus especificaciones.

Tabla 3.2 Instrumentación instalada en el EV-AB

Medidores de temperatura	Medidores de presión	Medidores de Flujo
 <p>Sensor RTD</p>	 <p>Manovacuómetro</p>	 <p>Flujómetro de escala directa</p>
 <p>PT-100</p>	 <p>Transductor de presión</p>	 <p>Flujómetro</p>

3.6 Mejoras realizadas al EV-AB

Para incrementar el desempeño y por ende las potencias térmicas en el componente dúplex EV-AB se realizó un acabado Sandblast en la superficie de las helicoidales del EV y AB. Este acabado consiste en la limpieza de una superficie por la acción de un abrasivo granulado expulsado por aire comprimido a través de una boquilla. La limpieza con Sandblast es ampliamente usada para remover óxido, escama de laminación y cualquier tipo de recubrimiento de las superficies preparándolas para la aplicación de un recubrimiento. Dentro de las ventajas que ofrece esta técnica es dejar una superficie áspera y porosa que beneficia la transferencia de calor. El abrasivo usado para realizar esta textura en las helicoidales del EV y AB fue arena de sílice y carburo de silicio respectivamente (**Figura 3.6**).

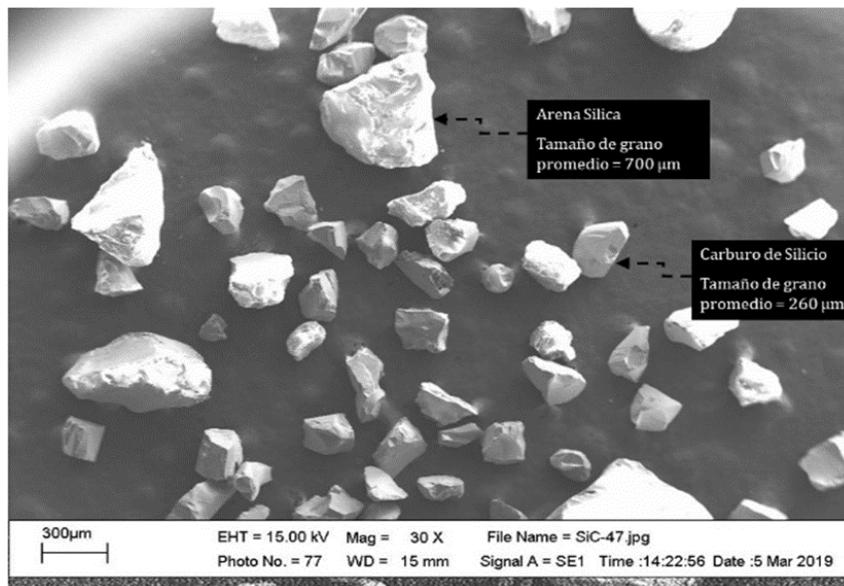


Figura 3.6 Abrasivos usados en la textura Sandblast

Otra mejora realizada al componente dúplex EV-AB fue la implementación de un flujómetro con una escala de medición adecuada al flujo que proporciona

la bomba del agua de calentamiento. Anteriormente los flujómetros instalados en las líneas de los fluidos de calentamiento no contaban con una escala adecuada. Éstos tenían una capacidad para un caudal máximo de 25 LPM, mientras que las bombas solo proporcionan un caudal máximo de 11 LPM, lo que impacta considerablemente en la incertidumbre de las mediciones. Debido a esto se optó por cambiarlos por medidores de una escala más adecuada (**Figura 3.7**).



ESPECIFICACIONES	
Modelo	Cole-Parmer RZ-32447-34
Precisión	± 3 % a escala completa
Repetibilidad	± 0.5 % a escala completa
Máximo flujo	14 LPM
Temp. máxima	93 °C
Presión máxima	200 psi
Conexiones	1" NPT

Figura 3.7 Flujoímetro instalado para el agua de calentamiento del EV

Posterior a la implementación del flujoímetro y con base en pruebas experimentales realizadas en el componente dúplex EV-AB por Delgado-Gonzaga (2018), se tenía cierta incertidumbre sobre las condiciones termodinámicas en el circuito de agua a destilar. Anteriormente se consideraba que el agua impura ingresa al AB como agua saturada y sale del AB como una mezcla de agua saturada y vapor saturado debido a que la temperatura de salida del agua a destilar está por encima de la de entrada al AB. Mediante la instalación de un transductor de presión en la línea del agua a destilar se pueden conocer la presión en esa línea y por ende la temperatura de saturación y las condiciones termodinámicas en ese punto. El transductor instalado en esa línea se presenta en la **Figura 3.8**.



ESPECIFICACIONES	
Modelo	Cole-Parmer RZ-32447-34
Precisión	±0.2 % a escala completa
Temp. máxima	85 °C
Presión máxima	15 PSI
Conexiones	1/4" NPT

Figura 3.8 Especificaciones transductor de presión instalado

3.7 Descripción de las pruebas experimentales

Las pruebas experimentales se enfocaron en la evaluación del EV con una textura Sandblast. Éstas se realizaron bajo diferentes condiciones de operación con variables de flujo másico de agua de calentamiento del EV ($\dot{m}_{EV,hw}$), flujo de refrigerante al EV ($\dot{m}_{EV,Ref}$) y temperatura de entrada al Evaporador ($T_{EV,hw,in}$) debido a que son parámetros que se pueden manipular durante la operación del TTA, a diferencia de la presión y concentración de la mezcla de trabajo. El flujo másico del agua de calentamiento se varió en tres intervalos los cuales fueron 0.0550, 0.1199 y 0.1848 kg/s, para el flujo de refrigerante 7.25×10^{-4} , 8.86×10^{-4} y 9.66×10^{-4} ; mientras que la temperatura se varió desde 68 hasta 80.5 °C en intervalos de 2 °C para cada flujo másico (Figura 3.9).

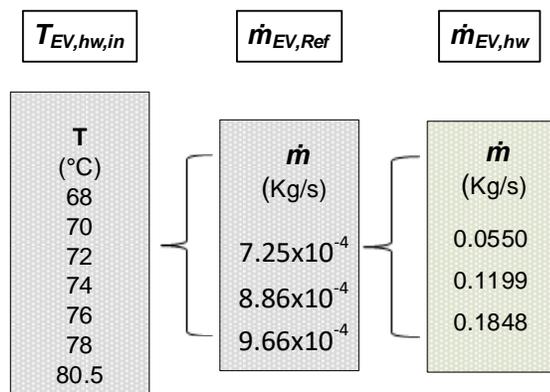


Figura 3.9 Variables utilizadas en las pruebas experimentales del EV

La captura de datos experimentales se realizó bajo condiciones de estado estable en el TTA. El estado estable se consideró cuando las corrientes de temperatura y flujo del agua de calentamiento no presentaron cambios significativos en su comportamiento. Cabe mencionar que el agua de enfriamiento, a diferencia de las de calentamiento, es más difícil de estabilizar debido a que se encuentra en función de condiciones atmosféricas. La **Figura 3.10** muestra esta consideración de estado estable en el TTA.

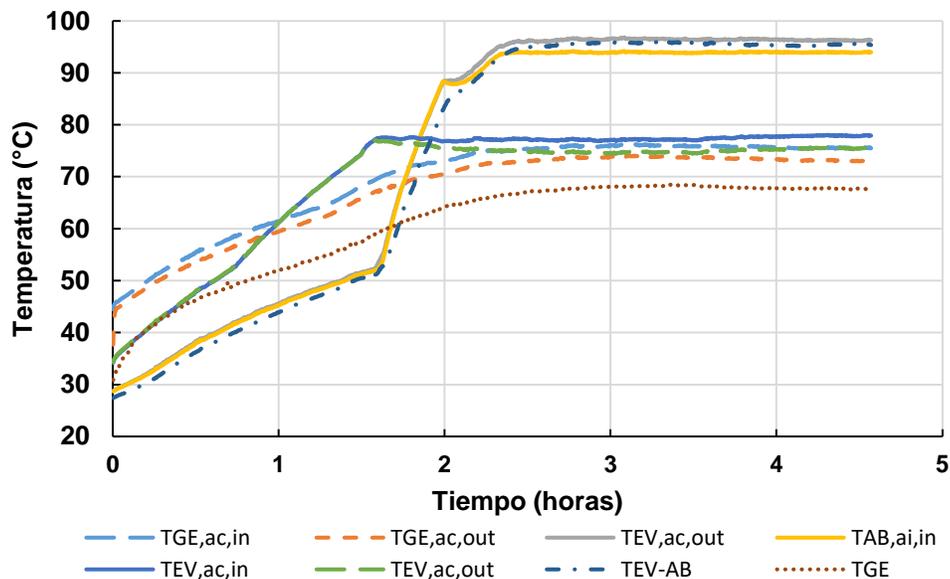


Figura 3.10 Corrientes de temperatura en estado estable del TTA

La comparación del incremento de la potencia térmica de la textura Sandblast con respecto a la textura con el tubo liso se realizó mediante la comparación de una prueba en específico reportada por Delgado-Gonzaga (2018) en donde se obtuvieron las potencias máximas alcanzadas con el EV con textura lisa. En esta comparación se consideraron las condiciones de operación reportadas con el tubo liso en el EV las cuales se presentan en la **Tabla 3.3**. Pese a que es difícil reproducir estas condiciones debido a que variables como la presión

y concentración tienen ciertas oscilaciones, variables como el flujo de agua de calentamiento, refrigerante y temperatura de entrada al EV, sí se replicaron en esta comparación.

Tabla 3.3 Condiciones de operación Delgado (2018)

Variable	Rango de operación	Condiciones de operación
		para potencias máximas Q_{EV} Y Q_{AB}
Flujo másico (kg/s)		
$\dot{m}_{EV,ac}$	0.07220-0.11890	0.11990
$\dot{m}_{EV,ref,in}$	0.00016-0.00088	0.00088
$\dot{m}_{AB,iw}$	0.0520	0.0520
$\dot{m}_{AB,LiBr,in}$	0.0140-0.0238	0.0194
$\dot{m}_{AB,LiBr,out}$	0.0148-0.0245	0.0213
Presión (kPa)		
P_{EV-AB}	5.28-38.32	36.41
Temperatura (°C)		
$T_{EV,hw,in}$	73.20-80.50	80.50
$T_{EV,hw,out}$	71.68-77.50	77.50
$T_{EV,ref,in}$	27.09-37.64	37.64
$T_{EV,ref,out}$	51.03-71.32	71.32
T_{EV}	51.03-71.32	71.32
$T_{AB,iw,in}$	91.16-9470	94.31
$T_{AB,iw,out}$	91.81-98.74	98.74
$T_{AB,LiBr,in}$	66.81-76.83	75.35
$T_{AB,LiBr,out}$	94.11-86.65	94.11
$T_{AB,ref,in}$	51.03-71.32	71.32
T_{AB}	90.70-9826	97.68
Concentración (%)		
$X_{AB,in}$	52.22-58.89	53.26
$X_{AB,out}$	50.17-57.18	50.78

Durante la evaluación experimental, se realizaron pruebas de escurrimiento y de perfil de temperatura en la helicoidal del AB. Ambas, fueron al mismo tiempo, con la finalidad de conocer la distribución de la película sobre este componente. La evaluación se llevó a cabo mediante la implementación de un

banco de pruebas externo al TTA con el AB y su distribuidor de gota (**Figura 3.11**). Para estas pruebas el flujo másico de la mezcla al AB fue $\dot{m}_{AB, LiBr, in} = 0.01661 \text{ kg/s}$ y una temperatura de entrada de mezcla de trabajo al AB de $T_{AB, LiBr, in} = 75 \text{ °C}$

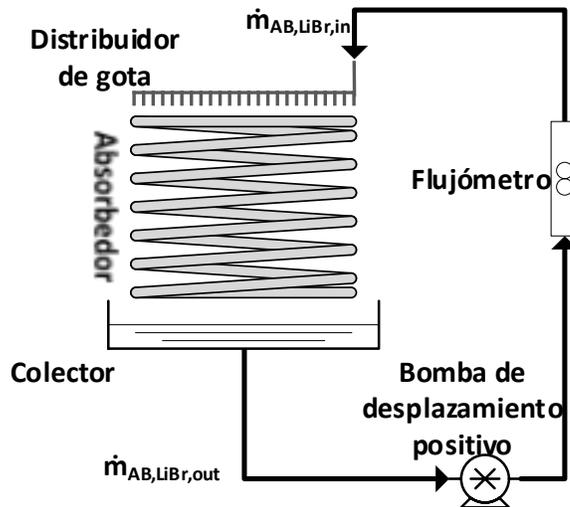


Figura 3.11 Banco experimental para pruebas de escurrimiento

El perfil de temperatura se midió al mismo tiempo que las pruebas de escurrimiento con la finalidad de observar el impacto de las áreas no mojadas en la temperatura del cuerpo del AB. La prueba se realizó mediante una cámara termográfica marca FLIR modelo T430sc. Los resultados de esta prueba se presentan en el capítulo 4.

3.8 Balance de masa y energía en el componente dúplex EV-AB

Los balances de masa y energía se realizaron bajo condiciones de estado estable en el componente dúplex EV-AB, esto es, cuando las corrientes de

temperatura y flujo no presentaron cambios significativos en su comportamiento. Las propiedades termodinámicas del refrigerante (agua) se obtuvieron a partir del software Standard Reference Database 23, versión 9.1 del Instituto Nacional de Normas y Tecnología (NIST por sus siglas en inglés, National Institute of Standards).

Debido a que el EV y AB se encuentran de forma concéntrica uno respecto del otro, se imposibilita la forma de medir la cantidad de vapor que provee el EV al AB, por lo que se asumió que el flujo de refrigerante que entra al EV ($\dot{m}_{EV,Ref,in}$) se evapora en su totalidad en la helicoidal del EV. Bajo esta suposición se realizaron los balances de masa y energía con el diagrama de la **Figura 3.12**.

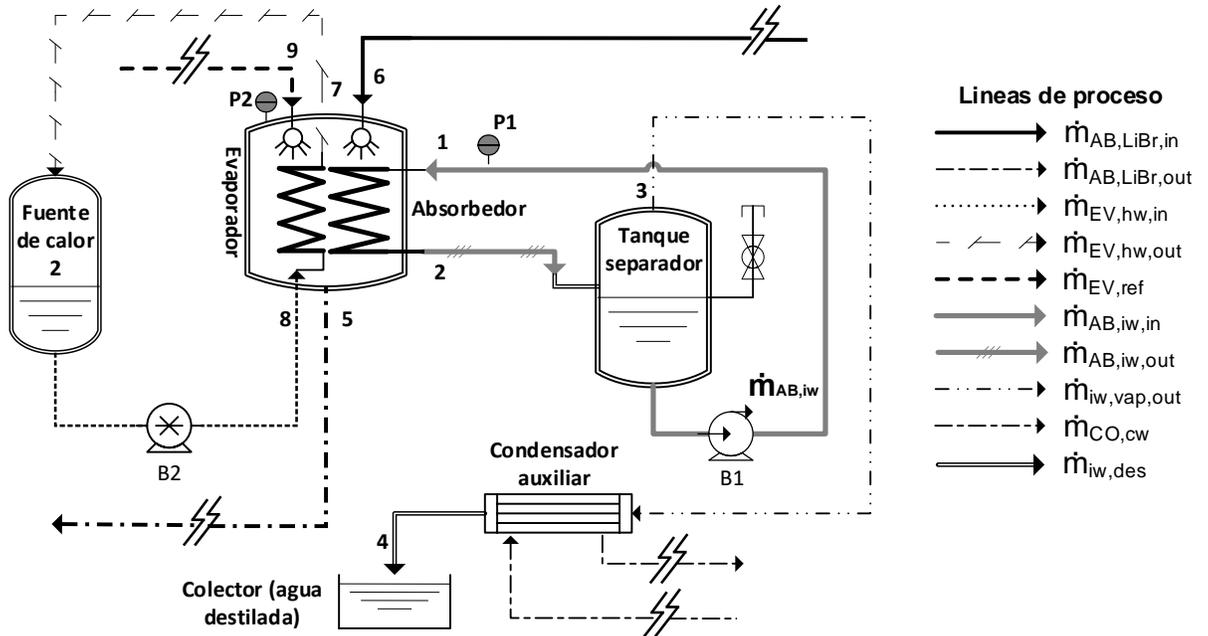


Figura 3.12 Diagrama usado para balances de masa y energía en el EV-AB

Para el balance de masa general se tiene:

$$\sum \dot{m}_{in} = \sum \dot{m}_{out} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Y para el balance de energía se tiene:

$$\sum (\dot{m}_{in} h_{in}) - \sum (\dot{m}_{out} h_{out}) + \sum (\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}) + \dot{W} = 0 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Potencias térmicas externas e internas en el EV:

$$\dot{Q}_{EV,ext} = \dot{m}_8 C p_8 (T_8 - T_7) \quad (\text{Ec. 3.3})$$

$$\dot{Q}_{EV,int} = \dot{m}_{EV,Ref} (h_{Ref,vap} - h_9) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde $h_{Ref,vap}$ de la **Ec. 3.4** es la entalpía del refrigerante en fase vapor saturado

Potencias térmicas externas e internas del AB:

$$\dot{Q}_{AB,ext} = \dot{m}_1 C p_1 (T_2 - T_1) \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$\dot{Q}_{AB,int} = h_6 \dot{m}_6 + h_{Ref,vap} \dot{m}_9 - h_5 \dot{m}_5 \quad (\text{Ec. 3.6})$$

La **Ec. 3.5** solo es aplicable cuando no existe cambio de fase en el agua impura. Para el caso en el que existió se consideró la energía que se utilizó para realizar este cambio de fase **Ec. 3.7**

$$\dot{Q}_{AB,ext} = \dot{m}_1 C p_1 (T_2 - T_1) + \dot{m}_4 h_{fg} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

En donde h_{fg} es la entalpía de cambio de fase la cual depende de la temperatura de saturación local.

Eficiencia térmica de cada componente:

La eficiencia térmica de cada componente se obtuvo mediante el cociente de la potencia térmica obtenida entre la potencia térmica suministrada **Ec. 3.8** para el EV y **Ec. 3.9** para el AB

$$\eta_{EV} = \frac{\dot{Q}_{EV,int}}{\dot{Q}_{EV,ext}} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$\eta_{AB} = \frac{\dot{Q}_{AB,ext}}{\dot{Q}_{EV,int}} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Coeficientes de transferencia de calor:

Debido a la complejidad del fenómeno de transferencia de calor dentro del componente dúplex EV-AB y la limitación de la medición de variables dentro del mismo, se asumió que en el EV la condición del refrigerante es de líquido saturado a la entrada y de vapor saturado a la salida. En la entrada del AB el flujo másico y la temperatura del refrigerante evaporado son considerados iguales a las condiciones de salida del EV.

Parte interna de las helicoidales

El número de Reynolds para la parte interna del EV en donde circula agua de calentamiento y para la interna del AB en donde circula agua a destilar se calculó mediante la siguiente ecuación **Ec. 3.10**:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4 \dot{m}}{D_{int} \pi \mu} \quad (\text{Ec. 3.10})$$

El número de Prandtl se obtuvo en función de las propiedades termofísicas del agua de calentamiento para el EV y en función del agua a destilar en el AB mediante la siguiente ecuación **Ec. 3.11**:

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (\text{Ec. 3.11})$$

El número de Nusselt (Nu_{hel}) se calculó mediante la siguiente ecuación **Ec. 3.12** la cual sirve para una geometría helicoidal Perry y Chilton, (1984)

$$Nu_{hel} = Nu \left[1 + 1.35 \left(\frac{r_{int}}{r_{hel}} \right) \right] \quad (\text{Ec. 3.12})$$

En donde r_{int} y r_{hel} son el radio del interno del tubo y el radio de la helicoidal respectivamente, mientras que Nu es el número de Nusselt para un tubo horizontal con las mismas características que el helicoidal. Este se estimó mediante la siguiente ecuación **Ec. 3.13**.

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$Re \geq 10000 ; 0.7 \leq Pr \leq 160$$

Los coeficientes de transferencia de calor de la parte interna de las helicoidales por donde circula agua de calentamiento y agua a destilar se calcularon mediante la siguiente ecuación **Ec. 3.14**.

$$\alpha_{int} = Nu_{hel} \frac{k_{ac}}{D_{int}} \quad (\text{Ec. 3.14})$$

En donde α_{int} es el coeficiente de transferencia de calor de la parte interna de las helicoidales y k_{ac} es la conductividad térmica del agua de calentamiento o el agua a destilar

Parte externa de la helicoidal (película descendente)

Los coeficientes de transferencia de calor en la parte película descendente del componente dúplex EV-AB se calcularon con base en un área de transferencia de calor de referencia (A_{REF}) y un diámetro de tubo de referencia (D_{REF}) los cuales se consideraron iguales al área y diámetro de un tubo liso. Esto debido a la complejidad de medir el área de transferencia de calor de una superficie con una textura rugosa.

Coefficiente de transferencia de calor del EV (película descendente ($\alpha_{EV, film}$))

En la parte externa de la helicoidal del EV es bañada en forma de goteo por refrigerante en fase líquido saturado para posteriormente cambiar a vapor

saturado. La correlación usada para calcular el número **Nu** para este fenómeno es la que proponen Hu y Jacobi (1996) **Ec 3.15** la cual es usada para números de **Re** bajos como es en este trabajo

$$Nu = 0.113Re^{0.85}Pr^{0.85}Ar^{-0.27}\left(\frac{s}{D_{REF}}\right) \quad (\text{Ec. 3.15})$$

En donde **Ar** es el número de Arquímedes que se obtiene de la **Ec 3.16** y **Re_{film}** el número de Reynolds de la **Ec 3.17**

$$Ar = \frac{D_{REF}^3}{\nu^2} \quad (\text{Ec. 3.16})$$

$$Re_{film} = 4\frac{\Gamma}{\mu} \quad (\text{Ec. 3.17})$$

En donde Γ es el flujo másico por unidad de longitud. Para obtener el coeficiente de transferencia de calor en la parte película descendente se usó la **Ec 3.18**

$$\alpha_{EV,film} = \frac{Nu_{film}k_{Ref}}{\delta_{Ref}} \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Coeficiente de transferencia de calor del AB parte película descendente ($\alpha_{AB,film}$)

La estimación del número de Nusselt del AB en la parte película descendente **NU_{AB,film}** se realizó mediante la siguiente **Ec. 3.19** Kirby y Pérez (1994)

$$Nu = 1.03\left[RePr\frac{\delta}{2\pi D_{hel}}\right]^{0.4} \quad (\text{Ec. 3.19})$$

En donde δ corresponde al espesor de la película de la mezcla absorbente LiBr-H₂O y se estimó con la **Ec. 3.16** Kirby y Pérez (1994)

$$\delta = \left(\frac{3\mu\Gamma}{\rho^2 g \cos\theta} \right)^{1/3} \quad (\text{Ec. 3.20})$$

$$\Gamma = \frac{\dot{m}}{2\pi D_{hel}} \quad (\text{Ec. 3.21})$$

De tal forma que el coeficiente de transferencia de calor del AB en la parte película descendente se estimó con la siguiente **Ec. 3.22**

$$\alpha_{AB, film} = Nu \left(\frac{k_{film}}{\delta_{film}} \right) \quad (\text{Ec. 3.22})$$

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Introducción

Este capítulo presenta los resultados experimentales de las pruebas desarrolladas en el componente dúplex EV-AB. Los principales parámetros evaluados en este estudio se enfocaron en los valores de temperatura, flujo másico, presión y la concentración de la mezcla absorbente y refrigerante del EV-AB. Además, los resultados se enfocan a la mejora en las potencias térmicas del componente dúplex, haciendo una comparación entre las potencias con las helicoidales con textura lisa y textura Sandblast.

4.1 Análisis de incertidumbre

Cuando se presenta el resultado de la medición de una cantidad física es necesario dar una indicación cuantitativa de la calidad del resultado para que pueda tenerse una idea de su confiabilidad. Sin esto, es imposible hacer comparaciones de dichos resultados, ya sea entre ellos mismos, o con valores de referencia. Por ello existe un procedimiento aceptado que lleva a una evaluación y expresión apropiada de la incertidumbre de acuerdo a la GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement). La evaluación de la incertidumbre combinada se realizó mediante la propagación de error con la siguiente ecuación:

$$U_y = \sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 (u_{x_i})^2} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

En donde las principales fuentes de incertidumbre están en función de la sensibilidad de los instrumentos de medición los cuales fueron la medición de los flujos máscicos, temperatura, presión y concentración de la mezcla de trabajo. La siguiente **Tabla 4.1** muestra la incertidumbre promedio de las variables involucradas en los resultados obtenidos de las pruebas experimentales.

Tabla 4.1 Valores promedio de las incertidumbres

	Variable	Incertidumbre (%)
Flujo máscico	$\dot{m}_{EV,hw}$	± 7.33
	$\dot{m}_{EV,ref}$	± 10.53
	$\dot{m}_{AB,lw}$	± 7.20
	$\dot{m}_{AB,LiBr,in}$	± 6.20
	$\dot{m}_{AB,LiBr,out}$	± 5.41
Temperatura	$T_{EV,hw}$	
	$T_{EV,ref}$	
	$T_{AB,lw}$	± 0.5
	$T_{AB,LiBr,in}$	
	$T_{AB,LiBr,out}$	
Presión	P_{EV-AB}	± 0.13
Potencias	Q_{EV}	± 7.43
	Q_{AB}	± 7.32

4.2 Análisis de resultados en el circuito del refrigerante

Los resultados obtenidos en el circuito del refrigerante se enfocan a las potencias térmicas externas del Evaporador con textura Sandblast $Q_{EV,ext}$ en función de los flujos máscicos del refrigerante $\dot{m}_{EV,Ref}$ y del flujo de agua de calentamiento $\dot{m}_{EV,hw}$ con su temperatura de entrada $T_{EV,hw,in}$. Las potencias internas del EV fueron estimadas con mediciones de forma indirecta debido a la complejidad de instalar instrumentación en la parte de la película descendente del EV. La cuantificación de los datos experimentales se realizó bajo condiciones de estado estable o estacionario. Esta condición se consideró

cuando la variación de cada una de las corrientes de temperatura a lo largo del TTA no excedió de ± 0.3 °C durante 20 minutos. El **Apéndice 1** muestra un diagrama esquemático del TTA en el que se observa la ubicación de la instrumentación utilizada para cuantificar las variables implicadas en el análisis termodinámico del ciclo. Las potencias externas del EV $Q_{EV,ext}$ obtenidas de las pruebas experimentales con un flujo de refrigerante $\dot{m}_{EV,Ref} = 7.25 \times 10^{-4}$, 8.86×10^{-4} y 9.66×10^{-4} kg/s se presentan en la **Figura 4.1** las cuales están en función de las temperaturas a las que se evaluó el EV con la superficie Sandblast, 68 a 80.5 °C en intervalos de 2 °C y flujos de agua de calentamiento $\dot{m}_{EV,hw}$ de 0.0550, 0.1199, y 0.1848 kg/s.

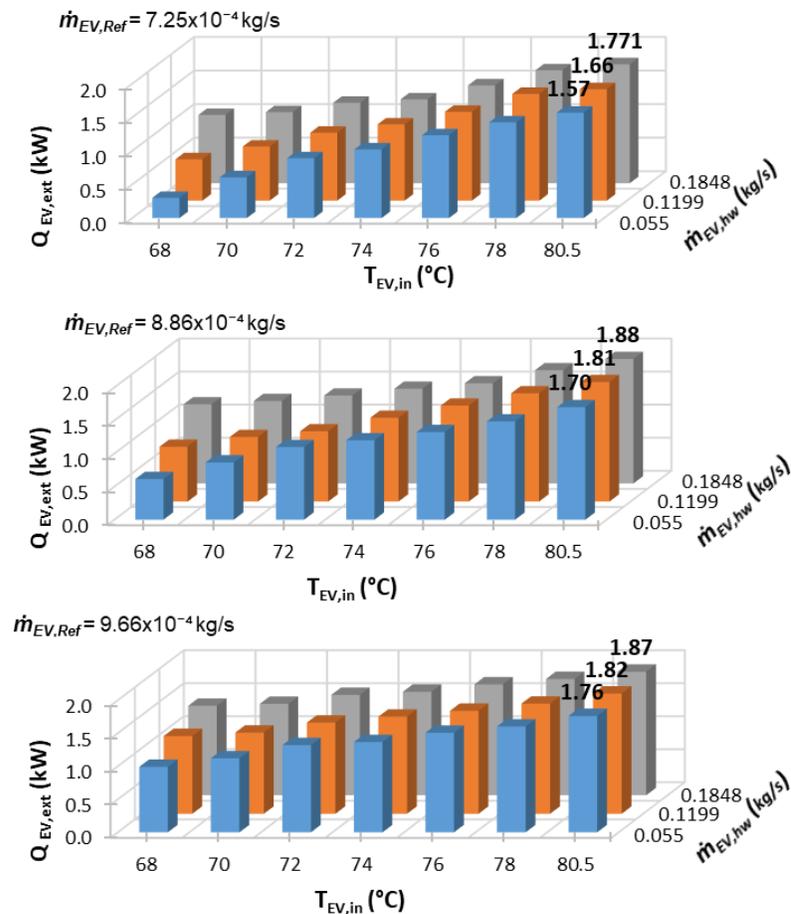


Figura 4.1 Potencias térmicas alcanzadas durante la evaluación del EV-AB

La máxima potencia alcanzada en la evaluación experimental del EV fue de 1.88 kW con un flujo de refrigerante de $\dot{m}_{EV,Ref} = 8.86 \times 10^{-4}$ kg/s y un flujo de agua de calentamiento de $\dot{m}_{EV,hw} = 0.1848$ kg/s. Se puede observar que el comportamiento de las potencias externas es ascendente conforme se aumenta el flujo de agua de calentamiento y temperatura de la misma. Este comportamiento se debe a que al aumentar el flujo de agua de calentamiento aumenta su número de Reynolds y con ello la turbulencia la cual beneficia el intercambio de calor en el EV. También se puede observar que el incremento de flujo de refrigerante contribuye al incremento de la potencia térmica en el componente; sin embargo, una de las limitantes que se presentó en la evaluación experimental del EV fue la imposibilidad de generar más refrigerante por parte del CO, debido a que dicho componente ya ha alcanzado su capacidad de diseño (2 kW) teniendo como flujo máximo de refrigerante que puede proporcionar de $\dot{m}_{EV,Ref} = 9.66 \times 10^{-4}$ kg/s. La comparación del porcentaje de mejora del EV con textura Sandblast respecto al EV con textura lisa se realizó con una prueba en específico bajo condiciones de operación similares, descritas en la Tabla 3.1 de la sección anterior. La **Tabla 4.2** muestra el resultado de dicha comparación.

Tabla 4.2 Potencias obtenidas con textura lisa y textura Sandblast

Variable	Condiciones de operación Delgado-Gonzaga (2018) tubo textura lisa	Trabajo actual textura Sandblast
Flujo (kg/s)		
$\dot{m}_{EV,hw}$	0.1199	0.1199
$\dot{m}_{EV,ref,in}$	8.86×10^{-4}	8.86×10^{-4}
Presión (kPa)		
P_{EV-AB}	36.41	34.66
Temperatura (°C)		
$T_{EV,hw,in}$	80.50	8.50
$T_{EV,hw,out}$	77.50	76.91
$T_{EV,ref,in}$	37.64	38.18
$T_{EV,ref,out}$	71.32	72.44
T_{EV}	71.32	72.44
Potencia térmica (kW)		
$Q_{EV,ext}$	1.60	1.81

De la comparación de la **Tabla 4.2** se puede observar que la evaluación experimental se realizó bajo condiciones de operación similares, esto es, a un flujo de refrigerante $\dot{m}_{EV,Ref} = 8.86 \times 10^{-4}$ kg/s, agua de calentamiento $\dot{m}_{EV,hw} = 0.1199$ kg/s y $T_{EV,hw,in} = 80.5$ °C, en donde el parámetro a comparar es la potencia térmica del tubo con textura Sandblast respecto de la potencia térmica del tubo con textura lisa. La máxima potencia alcanzada en trabajos anteriores Delgado-Gonzaga (2018) con el tubo liso es de 1.60 kW, en cambio la potencia del tubo con textura Sandblast es de 1.81 kW, lo cual representa un porcentaje de mejora en la potencia térmica del 13.12 %. La **Figura 4.2** muestra el comportamiento de las potencias con diferentes flujos de refrigerante a diferentes temperaturas de agua de calentamiento. Se puede notar que, al aumentar el flujo de refrigerante, el incremento de las potencias térmicas tiende a disminuir para cada intervalo de temperatura, Esto disminución puede deberse a que el EV trabaja a flujos relativamente bajos en comparación a otros componentes, por lo cual el refrigerante se distribuye en forma de goteo en la helicoidal del EV. Además, la textura rugosa del acabado Sandblast, dificulta que el refrigerante descienda fácilmente sobre la helicoidal y en consecuencia se evapora en su totalidad. Sin embargo, a flujos de refrigerante más altos, esta condición ya no se conserva debido a que el refrigerante desciende en forma de película descendente y parte del mismo no se evapora en su totalidad.

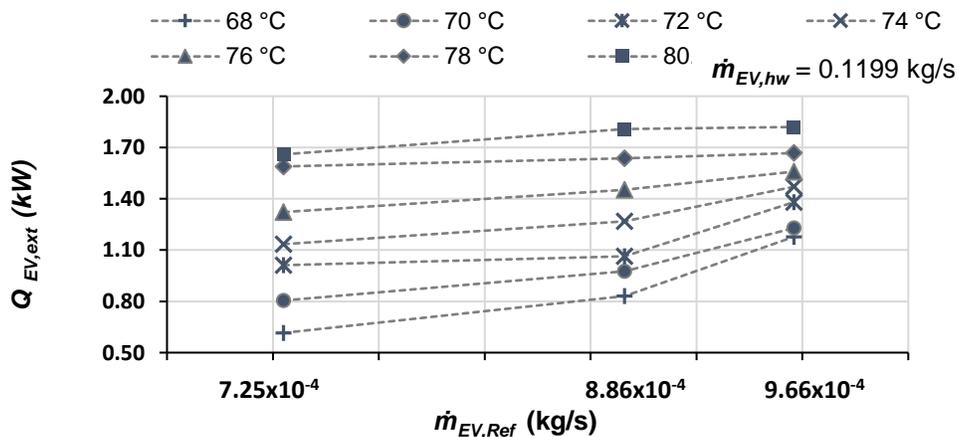


Figura 4.2 comportamiento de $Q_{EV,ext}$ en función de $\dot{m}_{EV,Ref}$

Los comportamientos de las potencias térmicas $Q_{EV,ext}$ en función de la temperatura de entrada de agua de calentamiento $T_{EV,hw,in}$ a diferentes flujos de refrigerante $\dot{m}_{EV,Ref}$ se presentan en la **Figura 4.3** donde se puede notar que al aumentar la temperatura del flujo de agua de calentamiento, el evaporador tiende a alcanzar las potencias de diseño. Sin embargo, el impacto del flujo de agua de calentamiento sobre la potencia térmica del componente EV es menor a temperaturas cercanas a los 80 °C. Este comportamiento es similar a diferentes flujos de agua de calentamiento y puede deberse a la capacidad de diseño del EV la cual está cercana a los 2 kW.

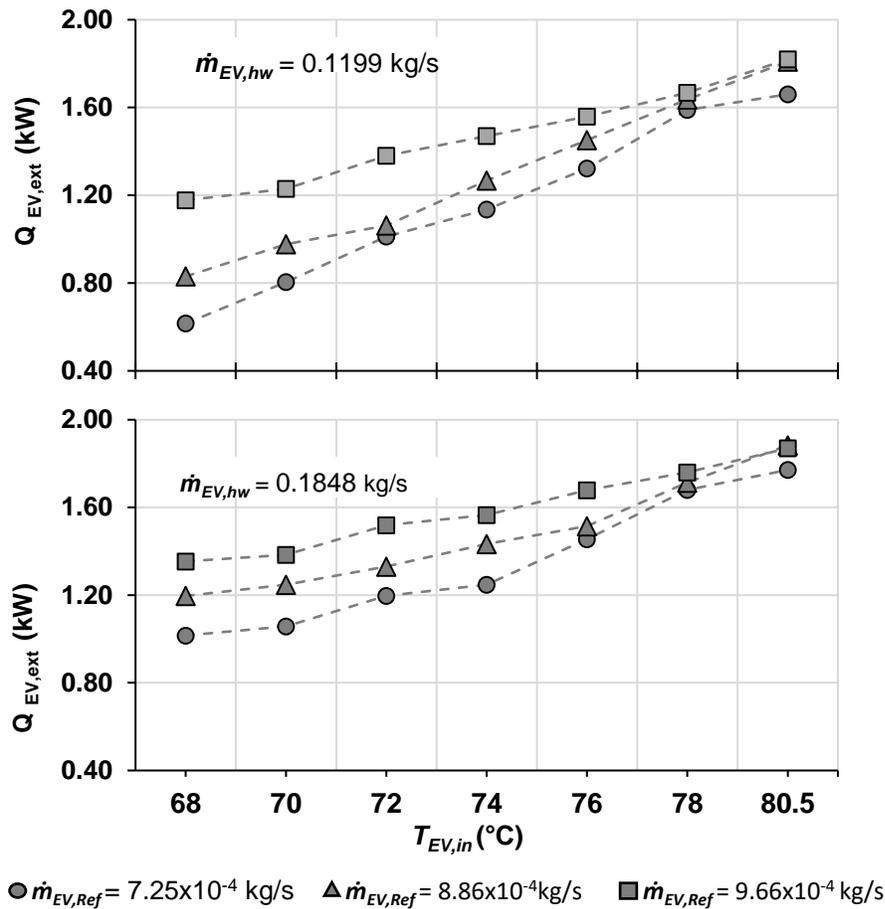


Figura 4.3 Comportamiento de $Q_{EV,ext}$ en función de $T_{EV,in}$ y $\dot{m}_{EV,hw}$

El comportamiento del coeficiente de transferencia de calor de la parte película descendente ($\alpha_{EV,flm}$) se presenta en la **Figura 4.4** donde se puede observar que al igual que la potencia térmica externa Q_{EXT} tiene un mayor incremento en diferentes temperaturas cuando el flujo de refrigerante es igual a $\dot{m}_{EV,Ref} = 7.25 \times 10^{-4}$ kg/s, y un menor incremento cuando el flujo aumenta. En consecuencia, el comportamiento de las potencias es similar al de los coeficientes de transferencia de calor de la parte película, esto se debe a que la transferencia de calor esta siempre limitada por el coeficiente más bajo que en este caso es el de la parte de la película descendente $\alpha_{EV,flm}$. El máximo coeficiente de transferencia de calor de la parte película descendente fue de 1373 W/m²°C el cual se logró con un flujo de refrigerante de 9.66×10^{-4} kg/s y un flujo de agua de calentamiento de 0.1199 kg/s a una temperatura de 80.5 °C a la entrada del EV. En trabajos anteriores Delgado-Gonzaga (2018) el máximo coeficiente de calor fue de 1270 W/m²K, lo cual indica que el acabado Sandblast contribuyó notablemente al aumento de este parámetro en el EV.

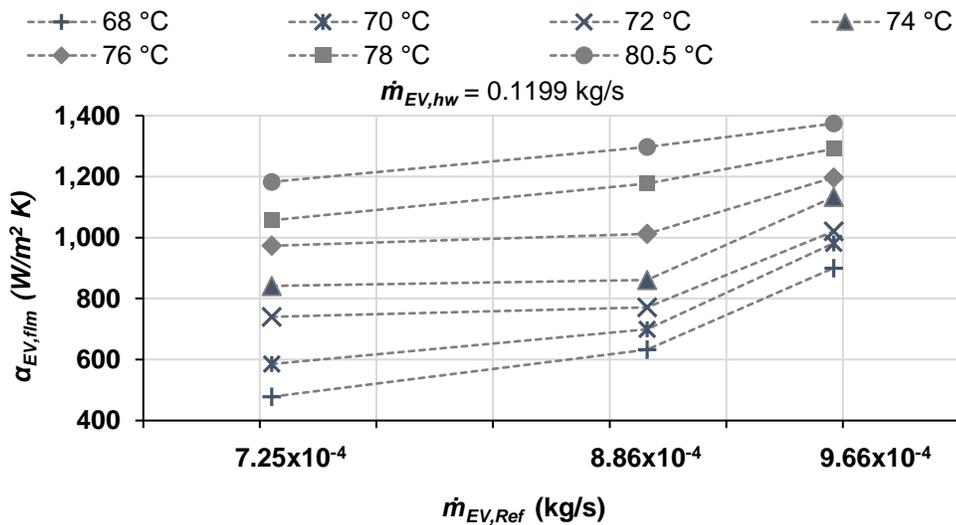


Figura 4.4 Comportamiento de $\alpha_{EV,flm}$ en función de $\dot{m}_{EV,Ref}$

En la **Figura 4.5** se presenta el comportamiento del coeficiente de transferencia de calor del agua de calentamiento ($\alpha_{EV,hw}$) en función del flujo de $\dot{m}_{EV,hw}$ a diferentes temperaturas. En el grafico se puede observar que a diferencia de $\alpha_{EV,filn}$ el comportamiento de $\alpha_{EV,hw}$ es inverso. Esto quiere decir que al aumentar el flujo de agua de calentamiento existe un mayor gradiente de $\alpha_{EV,hw}$ al aumentar la temperatura de entrada al EV. De igual forma se puede notar que el incremento de $\dot{m}_{EV,hw}$ da como resultado un comportamiento lineal para el coeficiente de transferencia de calor. Esto se debe porque al aumentar el flujo aumenta la turbulencia lo cual beneficia al incremento del número de Reynolds y en consecuencia el incremento del coeficiente de transferencia de calor en el EV. El máximo valor obtenido durante estas pruebas fue de 15.05 kW/m²K con un flujo de agua de calentamiento de $\dot{m}_{EV,hw} = 0.1848$ kg/s. La comparación de este resultado con trabajos anteriores bajo condiciones similares, el cual fue de 10.47 kW/m²K indica que hubo un incremento sustancial de este parámetro.

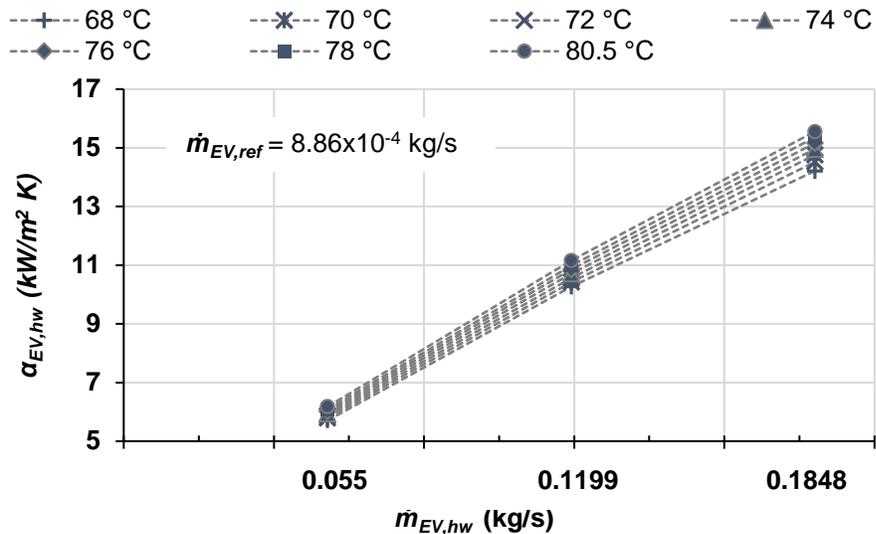


Figura 4.5 Comportamiento de $\alpha_{EV,hw}$ en función de $\dot{m}_{EV,hw}$ a diferentes temperaturas de operación

4.3 Análisis de textura del Evaporador

La textura Sandblast realizada al EV dejó una superficie con una mayor rugosidad y por tanto mayor área de transferencia de calor. Sin embargo, la rugosidad afecta a la humectabilidad de las superficies Kubiak, K. *et al* (2011). Por esta razón se realizaron pruebas de escurrimiento con una textura Sandblast y una textura lisa en la helicoidal del EV, con la finalidad de tener una referencia del grado de humectabilidad del EV. La siguiente **Figura 4.6** muestra esta prueba en la cual se observa la sección transversal de un tubo con textura Sandblast (a) y uno liso (b), ambos siendo mojados por la misma cantidad de refrigerante en forma de goteo. En el tubo liso (b) se puede notar que el fluido tiende a distribuirse con mucho mayor facilidad a diferencia del que está en el tubo con textura Sandblast (a). Esto se debe a que la aspereza o rugosidad de las superficies disminuye la humectabilidad de la misma, siendo un parámetro importante el ángulo de contacto que forman las gotas. El ángulo para estos casos se midió de forma aproximada debido a la complejidad para realizar esta medición de forma precisa. Para la textura Sandblast el ángulo fue de 70.36° mientras que para la textura del tubo liso fue de 51.85° , lo cual indica que el tubo liso tiene mayor humectabilidad. Sin embargo, el aumento de las potencias térmicas en componente EV puede deberse a la capacidad que tiene la textura Sandblast de retener el refrigerante sobre la helicoidal lo que permite evaporarlo en su totalidad, mientras que el tubo liso el refrigerante tiende a descender de forma más rápida provocando que no se evapore en su totalidad.



Figura 4.6 Humectabilidad de la helicoidal a) Textura Sandblast y b) Textura lisa

4.4 Análisis de resultados en el circuito de la mezcla absorbente

Los resultados obtenidos en el circuito de la mezcla absorbente al igual que los del EV, se enfocan a las potencias térmicas externas del AB $Q_{AB,ext}$. Sin embargo, para este caso se dividen en dos partes $Q_{AB,ext}$ con textura lisa y $Q_{AB,ext}$ con textura Sandblast. Para la primera parte los resultados de las potencias obtenidos se presentan en la **Figura 4.7** en donde se puede ver el comportamiento de las potencias en función de los flujos máxicos de agua de calentamiento y el refrigerante a diferentes temperaturas.

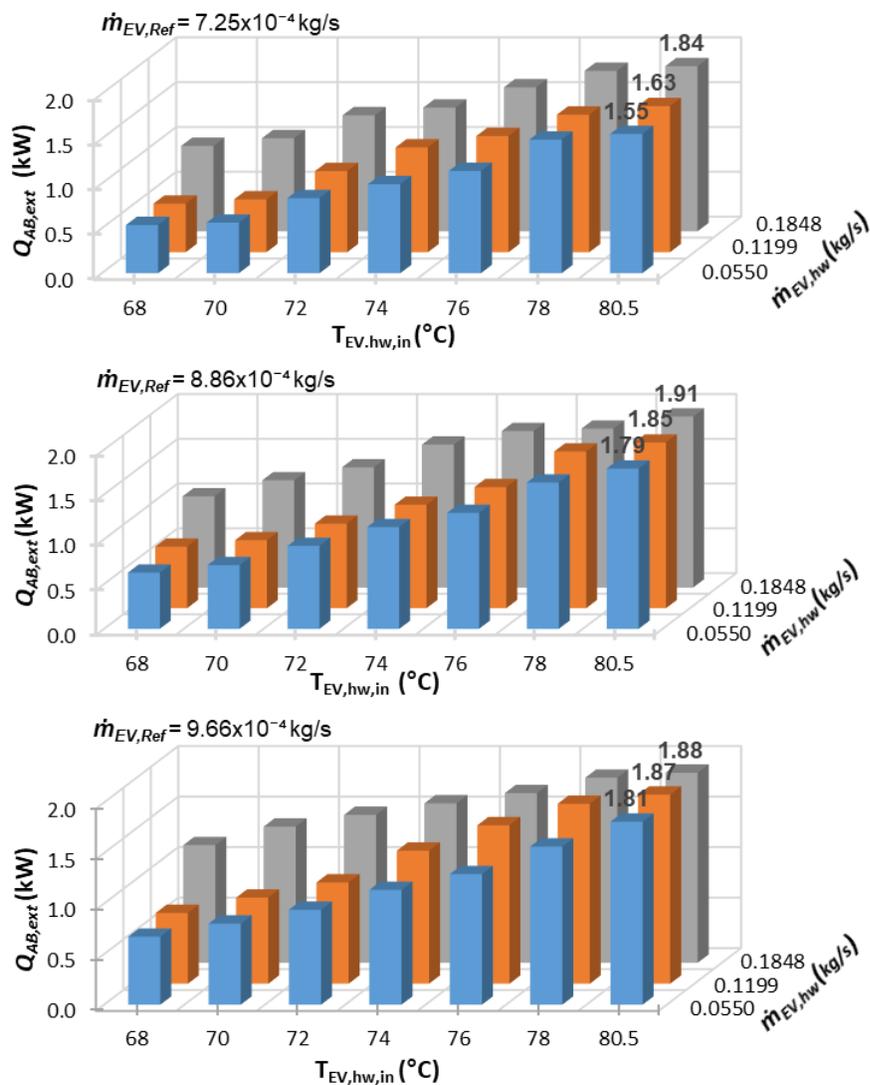


Figura 4.7 Potencias del AB $Q_{AB,ext}$ obtenidas durante la evaluación experimental

En el grafico anterior se puede notar que el componente AB está cercano a las potencias de diseño (2kW). Esto se debe a que el incremento de las potencias en el EV contribuye en gran medida al aumento de las del AB. El incremento de las potencias térmicas del EV y AB se encuentran principalmente en función del flujo másico de refrigerante que entra al componente dúplex, como líquido saturado al EV y luego como vapor saturado al AB para lo cual una mayor producción de vapor por parte del EV permite que la reacción exotérmica en el AB sea de una mejor calidad. La **Figura 4.8** muestra el comportamiento de $Q_{AB,ext}$ en función la $Q_{EV,ext}$ a diferentes flujos de refrigerante, en donde el valor máximo de $Q_{AB,ext}$ es de 1.85 kW con una potencia en el EV de $Q_{EV,ext} = 1.80$ kW con un flujo de refrigerante de $\dot{m}_{EV,Ref} = 8.86 \times 10^{-4}$ kg/s, y una temperatura de entrada de agua de calentamiento de $T_{EV,hw,in} = 80.5$ °C en el EV. Bajo estas condiciones el componente AB se encuentra cercano a alcanzar las potencias para las que fue diseñado. Pese a esto las potencias del AB se han logrado mejorar en comparación con trabajos anteriores bajo condiciones similares en el GE y el CO. El porcentaje de mejora para este caso fue de 5.13 %. Otro comportamiento que se puede notar en el grafico es que al aumentar el flujo de refrigerante el aumento en las potencias del AB ya no es muy significativo, lo cual puede referirse a la capacidad del EV para producir vapor.

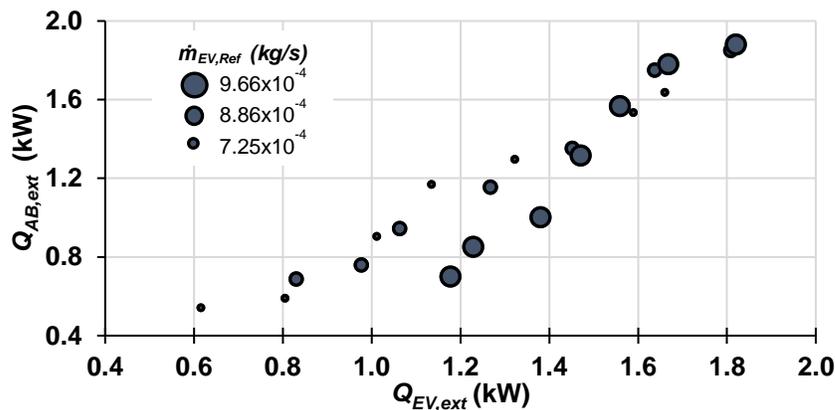


Figura 4.8 $Q_{AB,ext}$ en función de $Q_{EV,ext}$ a diferentes flujos de refrigerante

Otro parámetro importante a considerar en la evaluación del AB es el intervalo de la concentración de la mezcla de trabajo con la que opero el TTA durante la evaluación experimental. Una mayor concentración a la entrada del AB produce una reacción exotérmica de mejor calidad, y por tanto una mayor liberación de calor que aprovecha el AB. La **Figura 4.9** muestra el comportamiento de $Q_{AB,ext}$ en función del gradiente de concentraciones respecto a la entrada y salida del AB ΔX_{LiBr} . Se puede observar que el comportamiento es ascendente. La máxima potencia alcanzada de 1.91 kW se logró con una concentración de 54.49 % a la entrada del AB y a la salida de 50.48 % lo cual nos da un gradiente de $\Delta X_{LiBr} = 4.01$. El intervalo de concentraciones durante la experimentación fue de 59.11 a 48.68 % en peso de LiBr-H₂O. La dispersión de estos valores se debe en gran medida a la dificultad para mantener la estabilidad de los flujos de la mezcla de trabajo durante la operación del TTA. Principalmente cuando existen grandes diferencias de presiones entre los componentes dúplex EV-AB y GE-CO, se provoca turbulencia y un flujo no continuo de la mezcla de trabajo en ambos componentes dúplex

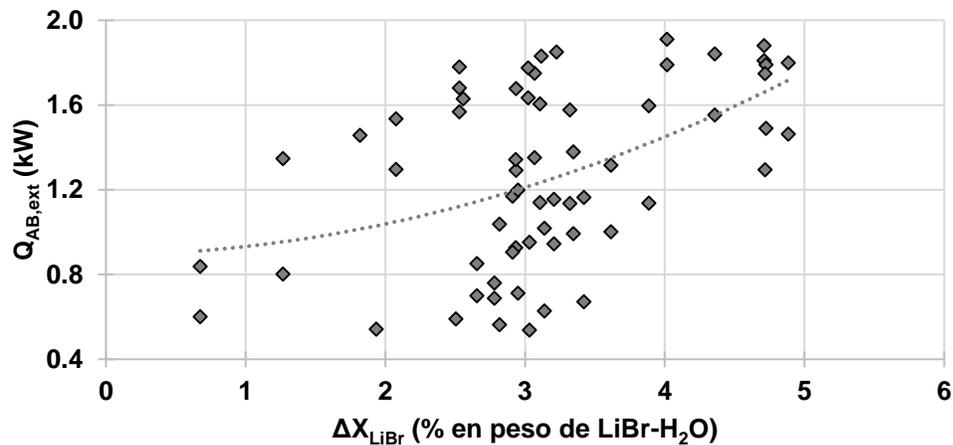


Figura 4.9 Comportamiento de $Q_{AB,ext}$ en función de ΔX_{LiBr} (% en LiBr-H₂O)

El comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor de la parte película descendente $\alpha_{AB,flm}$ se presenta en la **Figura 4.10**. A diferentes condiciones de operación de flujo de agua de calentamiento, temperatura de entrada de agua calentamiento y flujo de refrigerante suministrado al EV, al igual que los coeficientes de transferencia de calor del EV, los del AB también tienen un comportamiento ascendente a medida que se incrementa el refrigerante y la temperatura del agua de calentamiento debido a una mayor producción de vapor que es aprovechado para una mejor reacción exotérmica. El máximo valor obtenido para este parámetro fue de $5693.04 \text{ W/m}^2\text{°C}$ con un flujo de refrigerante de $9.66 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ a una temperatura de agua de calentamiento de 80.5 °C y un flujo de agua de calentamiento de 0.1848 kg/s .

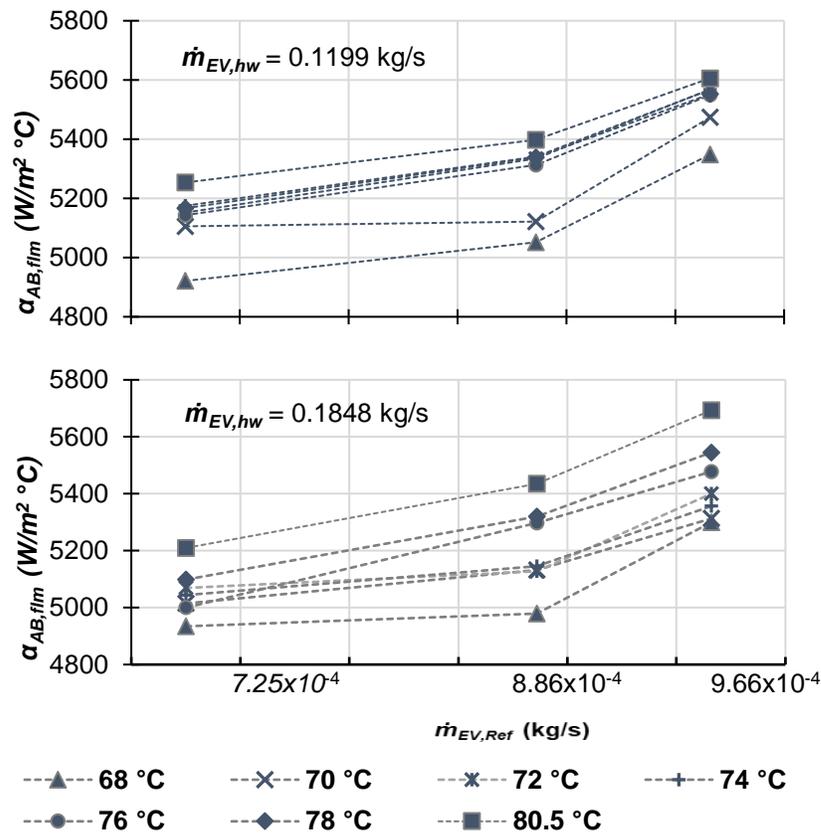


Figura 4.10 $\alpha_{AB,flm}$ en función de $\dot{m}_{EV,Ref}$ a diferentes intervalos de temperatura y agua de calentamiento

Los coeficientes de transferencia de calor de la parte interna de la helicoidal del AB ($\alpha_{AB,ad}$) se presentan en la **Figura 4.11**. A diferencia de los de la parte película descendente $\alpha_{AB,flm}$, éstos tienen un comportamiento más lineal debido a que para estas pruebas, éstos están en función de parámetros no directos como el flujo de refrigerante del EV y temperatura del agua de calentamiento del EV. Sin embargo, al variar estos parámetros, se pueden observar incrementos significativos en estos coeficientes. El valor máximo alcanzado fue de 5714 W/m²°C para ambos flujos de agua de calentamiento 0.1199 y 0.1848 kg/s y temperaturas de 80.5 °C con flujos de refrigerante de 9.66x10⁻⁴ kg/s lo cual representa un aumento significativo en comparación con trabajos anteriores de 5280 W/m² °C.

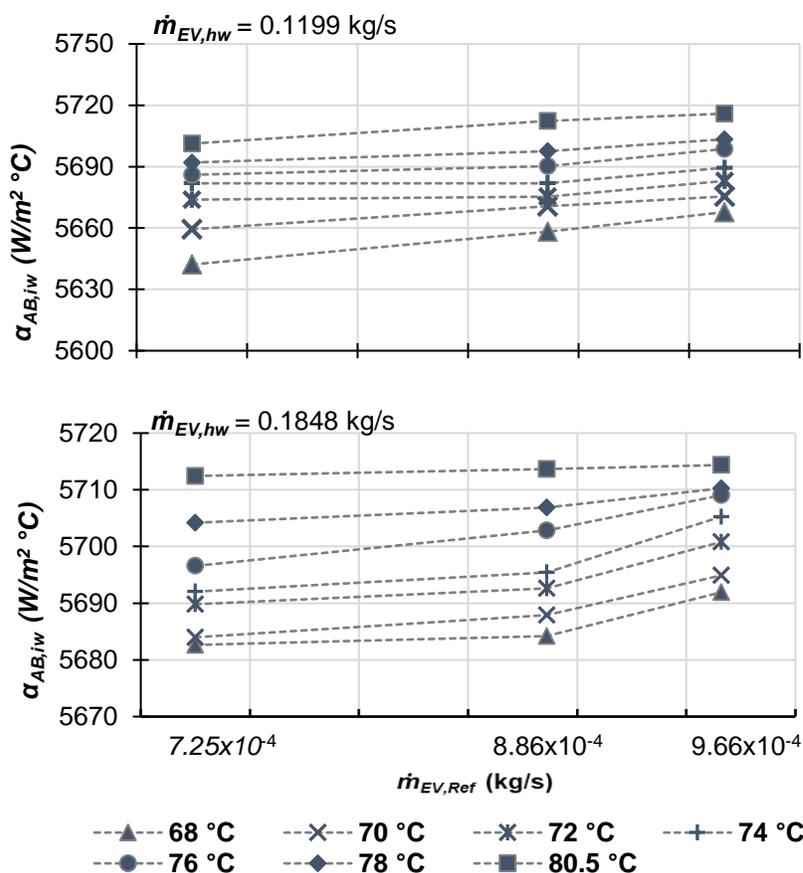


Figura 4.11 Comportamiento de $\alpha_{AB,ad}$ en función de $\dot{m}_{EV,Ref}$, $\dot{m}_{EV,hw}$ y $T_{EV,hw,in}$

Dentro de los principales parámetros que determinan una óptima transferencia de calor en intercambiadores por película descendente, se encuentra la correcta distribución de la película descendente sobre la superficie de intercambio de calor Lazcano-velis (2014). La **Figura 4.12 (a)** muestra la distribución de la película descendente de la mezcla de trabajo a lo largo del AB en una prueba fuera del cuerpo del EV-AB. Esta prueba se realizó bajo condiciones similares de flujo y temperatura de mezcla absorbente $\dot{m}_{AB,LIBr}$. Se puede notar que existen áreas sin humectación debido a que no hay una óptima distribución de la película descendente. Esto se puede deber a factores como al espaciado de los orificios en el distribuidor de gota o al tamaño de los diámetros de dichos orificios. La **Figura 4.12 (b)** muestra el perfil de temperatura a lo largo del cuerpo del AB en el cual se puede notar la diferencia de temperaturas entre zonas humectadas y no humectadas. Para trabajos posteriores es necesario corregir esta distribución de la mezcla de trabajo debido a que es un factor de suma importancia para mejorar el desempeño del componente dúplex y de todo el TTA.

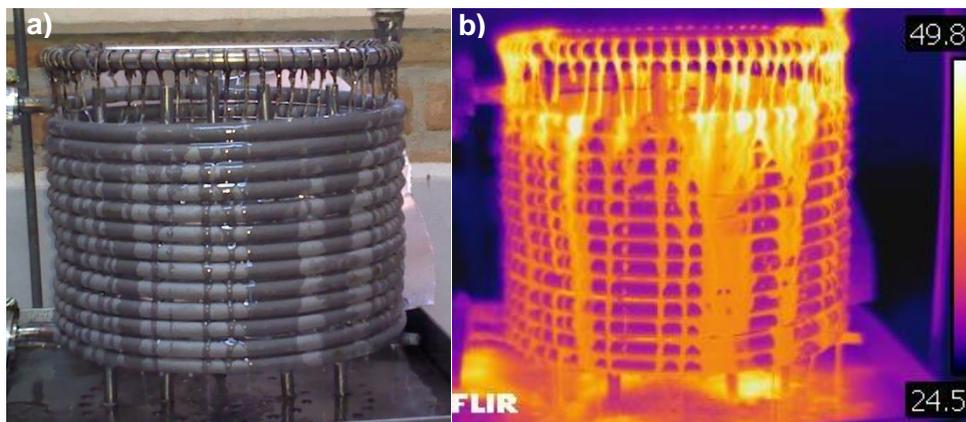


Figura 4.12 Distribución de la película descendente y perfil de temperatura sobre el cuerpo del AB

Al igual que en el EV, en el AB también se realizó una comparación entre la superficie lisa y la Sandblast enfocándose a la mejora de las potencias externas del componente AB $Q_{AB,ext}$. Esta comparación se realizó a condiciones de flujo de refrigerante del EV $\dot{m}_{EV,ref,in} = 8.85 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ y mezcla absorbente al igual que el flujo de agua a destilar $\dot{m}_{AB,iw} = 0.052 \text{ kg/s}$ similares entre la textura lisa y Sandblast. La **Figura 4.13** muestra esta comparación en donde se puede observar que para el tubo con textura lisa la máxima potencia alcanzada fue de 1.85 kW, mientras que para la textura Sandblast fue de 1.93 kW. Esto representa una mejora del 5 %; sin embargo, esta mejora en la potencia no fue tan notoria como en el EV. Esto puede derivar de la distribución de la película descendente o a factores como la cantidad de flujo de mezcla absorbente debido a que el EV trabaja con flujos de refrigerante de menor cantidad en comparación con los del AB. Aun así, el AB ha presentado una mejora significativa muy cercana a las potencias para el cual fue diseñado (2 kW).

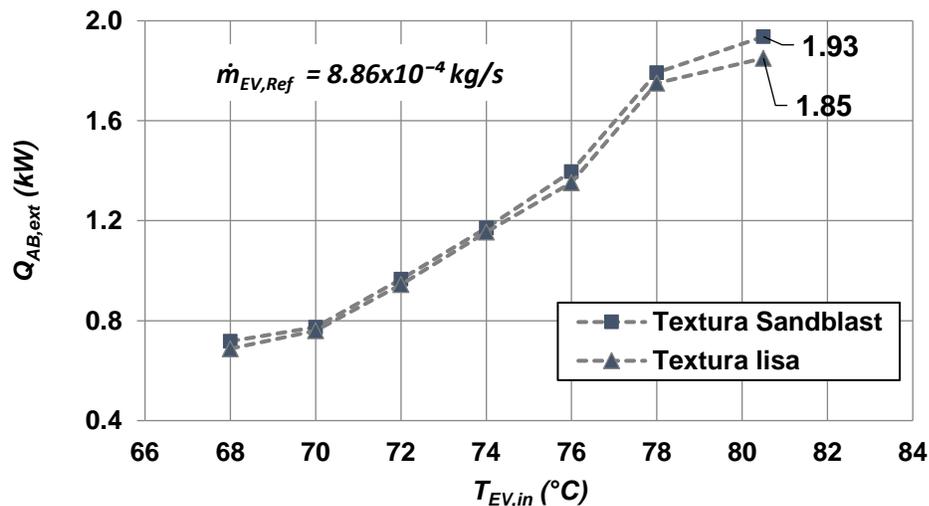


Figura 4.13 Comparativa del incremento de $Q_{AB,ext}$ entre la textura lisa y la textura Sandblast

4.5 Análisis de resultados en el circuito del agua a destilar

Los resultados en el circuito del agua a destilar se enfocan a la cantidad de agua destilada a diferentes condiciones de operación en el componente dúplex EV-AB. La **Figura 4.14** muestra la cantidad de flujo destilado a diferentes temperaturas con diferentes flujos de refrigerante en el EV. La máxima tasa de destilado de agua impura que se obtuvo fue de 46.10×10^{-5} kg/s (1.66 L/hr) con un refrigerante de $\dot{m}_{EV,ref,in} = 9.65 \times 10^{-4}$ kg/s y una potencia el AB de 1.93 kW. Cabe señalar que la máxima tasa de destilado para trabajos anteriores es decir sin la textura Sandblast es de 39.16×10^{-5} kg/s (1.41 L/h), lo cual representa un aumento muy considerable.

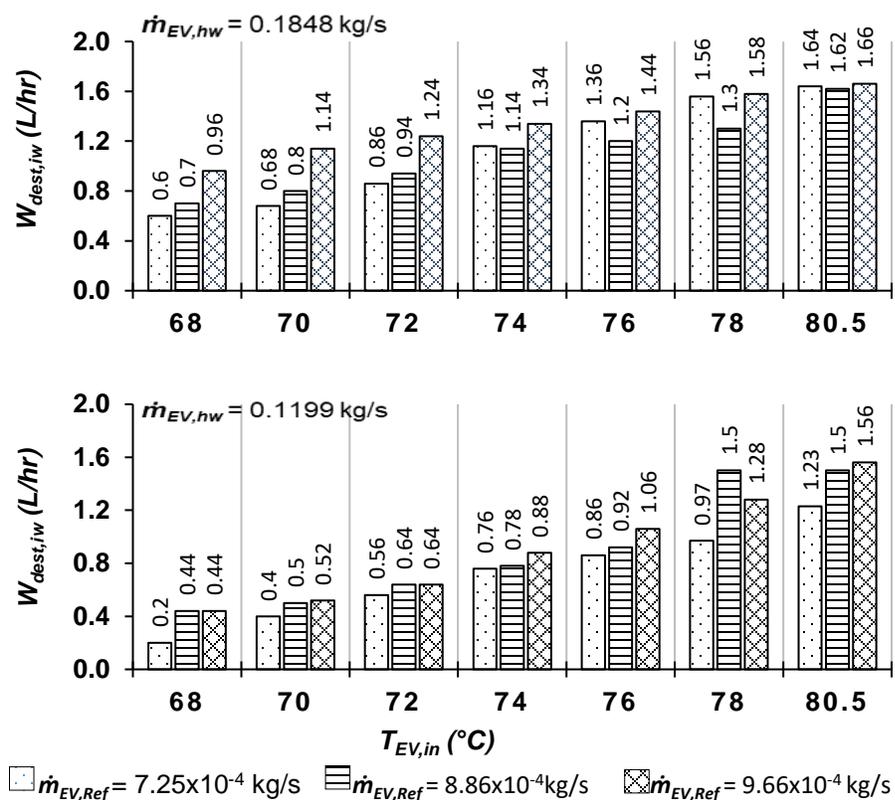


Figura 4.14 Tasa de destilado a diferentes condiciones de operación del EV-AB

Para determinar las condiciones operación a lo largo del circuito de agua a destilar, se realizó un diagrama (**Figura 4.15**) en el cual se representan las temperaturas de ese circuito bajo condiciones de estado estable. En análisis anteriores a este trabajo se tenía cierta incertidumbre sobre la temperatura de salida del agua a destilar en la helicoidal del AB debido a que el valor promedio es cercano a 99 °C de tal forma que las condiciones dentro de la helicoidal son de vapor sobrecalentado. Sin embargo, esto no coincidía con la cantidad de agua impura destilada por lo que se asumía que el cambio de fase en el AB era de forma parcial como vapor saturado y líquido saturado. Para esta evaluación experimental se instaló un medidor de presión (P1) el cual permitió medir la presión en esa línea para poder compararla con la temperatura de saturación a esa presión. El resultado promedio obtenido de esta medición fue de 119.81 kPa la cual le corresponde una temperatura de saturación de 104.7 °C de tal forma que la fase dentro de la helicoidal del AB es de líquido saturado. Una vez que este líquido saturado sale de la tubería e ingresa al tanque de separación, el cual se encuentra a presión atmosférica local, ocurre el cambio de fase de líquido a vapor.

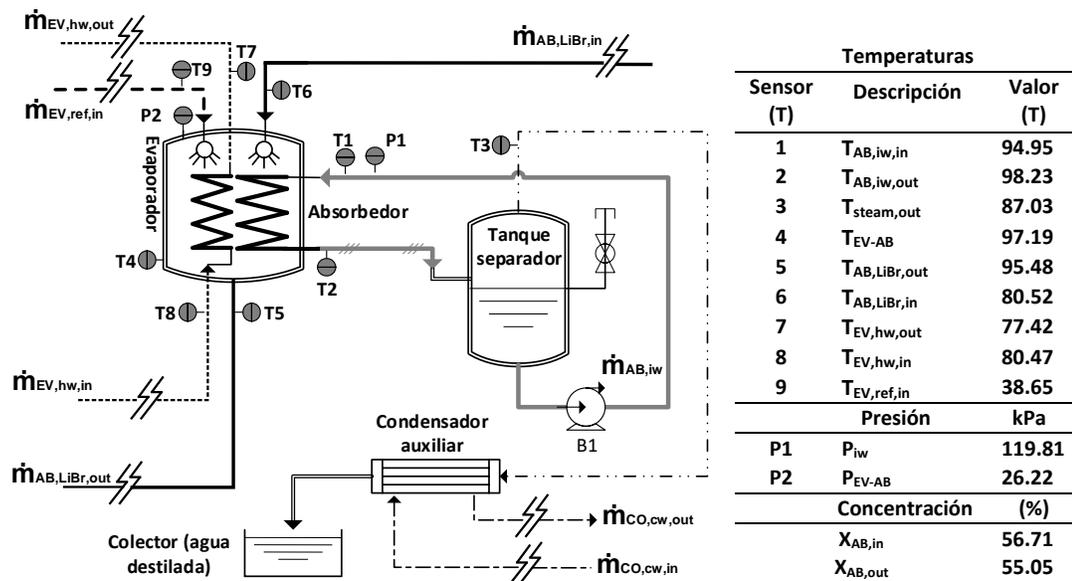


Figura 4.15 Diagrama con variables de temperatura del circuito de agua a destilar

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Introducción

Este capítulo presenta las conclusiones con base a en la evaluación de los resultados de las pruebas experimentales del componente dúplex EV-AB con textura Sandblast. Posteriormente se presentan las recomendaciones para mejorar la operación y desempeño del equipo experimental TTA.

5.1 Conclusiones

Después de haber finalizado la evaluación experimental y haber analizado los resultados obtenidos se llegó a las siguientes conclusiones.

- Se determinó experimentalmente que uno de los factores que afectan la transferencia de calor en el EV-AB es la correcta humectabilidad de la superficie de transferencia de calor. Se determinó que la textura Sandblast beneficia el incremento de las potencias térmicas en los componentes EV y AB. Sin embargo, la distribución de la película por parte del distribuidor de gota, debe ser mejorada debido a que afecta el perfil de temperatura a lo largo del Absorbedor y Evaporador
- Las principales variables de operación dentro del EV-AB son **a)** el flujo del refrigerante enviado al EV $\dot{m}_{EV,Ref}$ y **b)** el flujo de agua de calentamiento $\dot{m}_{EV,hw}$, así como su temperatura $T_{EV,hw,in}$. Estas variables son críticas para obtener mejores potencias en ambos componentes. Se observó que existe una relación directa entre el flujo másico del refrigerante con $Q_{EV,ext}$ y $Q_{AB,ext}$, así como la concentración de entrada

al AB $X_{AB,in}$ para obtener un mejor rendimiento del componente dúplex EV-AB

- La implementación de un transductor de presión en el circuito del agua a destilar permitió conocer de manera más clara las condiciones termodinámicas del agua a destilar dentro del cuerpo del Absorbedor. El agua a destilar entra al AB con una presión de 119.81 kPa (a la cual le corresponde una temperatura de saturación de 104.73 °C) y se calienta hasta cerca de los 99 °C por lo que el cambio de fase del agua se realiza en el tanque separador, el cual se encuentra a una presión atmosférica local.
- A través de la experimentación se observó que las condiciones óptimas de operación del componente dúplex EV-AB se encuentran con flujos de refrigerante $\dot{m}_{EV,Ref}$ de 8.85×10^{-4} y 9.65×10^{-4} kg/s y flujos de agua de calentamiento $\dot{m}_{EV,hw}$ de 0.1848 kg/s con temperaturas de entrada de 80 °C.
- En relación con la estabilidad del componente dúplex EV-AB se observa que el tiempo que tarda en alcanzar el estado estable es aproximadamente similar (2.5 horas) con respecto a trabajos anteriores del TTA Delgado-Gonzaga (2018) y Ortiz-Rivera (2017)
- Se logró mejorar las potencias externas de los componentes EV y AB y por ende las tasas de destilado de agua impura, mediante la implementación de una textura Sandblast realizada a las helicoidales del componente dúplex EV-AB lo cual implica un porcentaje de mejora respecto a trabajos anteriores. La siguiente **Tabla 5.1** muestra esta mejora.

Tabla 5.1 Comparación de resultados entre textura lisa y Sandblast

Parámetro evaluado	Textura lisa (Delgado-Gonzaga 2018)	Textura Sandblast (Trabajo actual)	Porcentaje de mejora
$Q_{EV,ext}$	1.60 kW	1.81 kW	13.12%
$Q_{AB,ext}$	1.70 kW	1.91 kW	12.35%
$\dot{m}_{ai,des}$	1.41 L/h	1.5 L/h	6.38%

- En cuanto a la eficiencia del transformador térmico o **COP** los mejores resultados de 0.50 a 0.57 se obtuvieron a flujos de refrigerante bajos de 7.24×10^{-4} kg/s

5.2 Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos, conclusiones y la experiencia adquirida durante las pruebas realizadas al componente dúplex EV-AB, se sugieren las siguientes recomendaciones por orden de prioridad para mejorar el TTA:

- Mejorar la humectabilidad de la superficie del Evaporador y Absorbedor con textura Sandblast mediante la instalación de hilos de grafito o tela de grafito para garantizar una buena distribución de la película descendente tanto del refrigerante como de la mezcla absorbente.
- Rediseñar el distribuidor de gota para el Evaporador y Absorbedor para garantizar una correcta distribución de la película descendente en ambos componentes.
- Automatizar el control de las temperaturas del agua de calentamiento del Evaporador y Generador del TTA para evitar oscilaciones de

temperatura largas, para poder alcanzar la estabilidad del TTA en un menor tiempo.

- Instalar un flujómetro en la línea del agua a destilar con una escala adecuada para disminuir la incertidumbre de la medición en ese punto.

REFERENCIAS

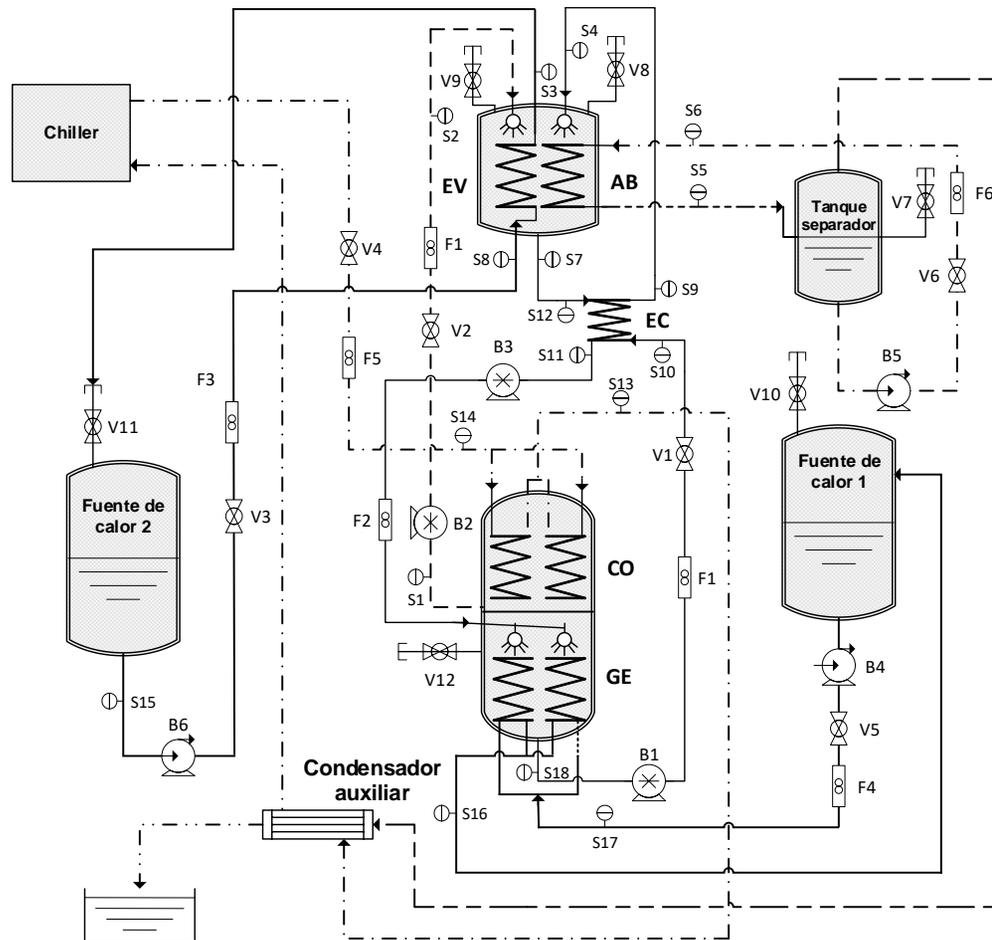
- Attinger, D., Frankiewicz, C., Betz, A. R., Schutzius, T. M., Ganguly, R., Das, A., & Megaridis, C. M. (2014). Surface engineering for phase change heat transfer: A review. *MRS Energy & Sustainability*, 1.
- Berenson, P. J. (1962). Experiments on pool-boiling heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 5(10), 985-999.
- Bergles, A.E., Nirmalan, V., Junkhan, G.H., & Webb, R.L. Bibliography on augmentation of convective heat and mass transfer-II. United States.
- Bormashenko, E. Y. (2018). *Wetting of real surfaces (Vol. 19)*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*.
- Cengel, Y. A., Pérez, J. H., & Fernández, Á. H. (2004). *Transferencia de calor (No. 660.28427 C46 2004.)*. McGraw-hill.
- Chowdhury, S. R., & Winterton, R. H. S. (1985). Surface effects in pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 28(10), 1881-1889.
- Chu, K. H., Enright, R., & Wang, E. N. (2012). Structured surfaces for enhanced pool boiling heat transfer. *Applied Physics Letters*, 100(24), 241603.
- Delgado-Gonzaga J. (2018). *Análisis experimental de un transformador térmico por absorción para purificación de agua que opera con componentes dúplexes*. Tesis de Doctorado.CIICAp-UAEM.
- Demesa López F. N. (2010) "Diseño Y Construcción De Un Banco De Pruebas Para Un Intercambiador De Calor Dúplex: Absorbedor/Evaporador", Tesis de licenciatura. Ing. Química. FCQI-UAEM.
- Demesa López F. N. (2012). *Diseño y Construcción de una Intercambiador de Calor Dúplex para un Transformador Térmico por Absorción*. Tesis de Maestría. CIICAp-UAEM.
- Du, K., Wathuthanthri, I., Mao, W., Xu, W., & Choi, C. H. (2011). Large-area pattern transfer of metallic nanostructures on glass substrates via interference lithography. *Nanotechnology*, 22(28), 285306.

- Feuerecker, G., Scharfe, J., Greiter, I., Frank, C., & Alefeld, G. (1994). Measurement of thermophysical properties of aqueous LiBr-solutions at high temperatures and concentrations. In *The International Absorption Heat Pump Conference*, New Orleans, LA, USA, 01/19-21/94 (pp. 493-499).
- García, A., Solano, J. P., Vicente, P. G., & Viedma, A. (2012). The influence of artificial roughness shape on heat transfer enhancement: Corrugated tubes, dimpled tubes and wire coils. *Applied Thermal Engineering*, 35, 196-201.
- Ghorbani, N., Taherian, H., Gorji, M., & Mirgolbabaei, H. (2010). Experimental study of mixed convection heat transfer in vertical helically coiled tube heat exchangers. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 34(7), 900-905.
- Hendren, Z. D., Brant, J., & Wiesner, M. R. (2009). Surface modification of nanostructured ceramic membranes for direct contact membrane distillation. *Journal of Membrane Science*, 331(1-2), 1-10.
- Holland, F.A., Siqueiros, J., Santoyo, S., Heard, C.L. y Santoyo E.R. (1999). *Water purification using heat pumps*. Editorial E & FN Spon, London.
- Holman, J. P. (1999). *Transferencia de calor*. 10a reimpression. México, Compañía Editorial Continental.
- Hu, X., & Jacobi, A. M. (1996). The intertube falling film: Part 2—Mode effects on sensible heat transfer to a falling liquid film. *Journal of heat transfer*, 118(3), 626-633.
- ISO 1995. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, International Organization for Standardization. 1st edition; 1995.
- Jiang, W., & Malshe, A. P. (2011). A novel cBN composite coating design and machine testing: A case study in turning. *Surface and Coatings Technology*, 206(2-3), 273-279.
- Jiang, Z., Tang, Y., Tay, Q., Zhang, Y., Malyi, O. I., Wang, D., ... & Dong, Z. (2013). Understanding the role of nanostructures for efficient hydrogen generation on immobilized photocatalysts. *Advanced Energy Materials*, 3(10), 1368-1380.
- Jones, B. J., McHale, J. P., & Garimella, S. V. (2009). The influence of surface roughness on nucleate pool boiling heat transfer. *Journal of Heat Transfer*, 131(12), 121009.

- Kakaç, S., Liu, H., & Pramuanjaroenkij, A. (2002). Heat exchangers: selection, rating, and thermal design. CRC press.
- Kang, M. G. (2000). Effect of surface roughness on pool boiling heat transfer. *International journal of heat and mass transfer*, 43(22), 4073-4085.
- Kirby, M.J, Perez-Blanco, H. (1994), "A design model for horizontal tube water/lithium bromide absorbers", *Heat Pump and Refrigerator systems Design, AES-Vol. 32*, 1-10.
- Kubiak, K. J., Wilson, M. C. T., Mathia, T. G., Carval, P. (2011). Wettability versus roughness of engineering surfaces. *Wear*, 271(3-4), 523-528.
- Lazcano-Véliz, Y., Siqueiros, J., Juárez-Romero, D., Morales, L. I., & Torres-Merino, J. (2014). Analysis of effective wetting area of a horizontal generator for an absorption heat transformer. *Applied Thermal Engineering*, 62(2), 845-849.
- Lemmon, E. W., Huber, M. L., & McLinden, M. O. (2002). NIST reference fluid thermodynamic and transport properties—REFPROP.
- Manglik RM, Jog MA. Molecular-to-Large-Scale Heat Transfer With Multiphase Interfaces: Current Status and New Directions. *ASME. J. Heat Transfer*. 2009;131(12):121001-121001-11.
- McNeeley, L. A. (1978, January). Thermodynamic properties of aqueous-solutions of lithium bromide. In *Ashrae Journal-American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (vol. 20, no. 12, pp. 54-55). 1791 tullie circle ne, atlanta, ga 30329: amer soc heat refrig air-conditioning eng inc.
- McNelly L.A (1979). Thermodynamic properties of aqueous solutions of lithium bromide. *ASHRAE Transactions*, pp 413-434.
- Morales Gómez L. I. (2014). Construcción, Arranque y Evaluación Experimental de un Transformador Térmico con Componentes Compactos de 2 kW. Tesis de Doctorado. CIICAp-UAEM.
- Ortiz Rivera I. (2017). Evaluación experimental de un intercambiador de calor duplex evaporador-absorbedor acoplado a un transformador térmico por absorción para purificación de agua. Tesis de licenciatura FCQel-UAEM.
- Patankar, N. A. (2010). Supernucleating surfaces for nucleate boiling and dropwise condensation heat transfer. *Soft Matter*, 6(8), 1613-1620.

- Perry, Chilton, Chemical Engineers Handbook, 5 ed., McGraw-Hill, (1973) pp.10-15.
- Webb R.L. (1981). The evolution of enhanced surface geometries for nucleate boiling. *Heat Transfer Eng.* 2, 46 – 69.
- Webb, R. L. (1972). U.S. Patent No. 3,696,861. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Webb, R. L., & Kim, N. H. (2004). *Principles Enhanced Heat Trans.* Garland Science.
- Young, T. (1805). III. An essay on the cohesion of fluids. *Philosophical transactions of the royal society of London*, (95), 65-87.
- Zhou, F., Izgorodin, A., Hocking, R. K., Spiccia, L., & MacFarlane, D. R. (2012). Electrodeposited MnOx films from ionic liquid for electrocatalytic water oxidation. *Advanced Energy Materials*, 2(8), 1013-1021.

Apéndice 1 Diagrama de tubería e instrumentación del TTA



SIMBOLOGÍA

- Mezcla absorbente
- - - - - Refrigerante
- Fluidos de calentamiento
- - - - - Fluido de enfriamiento
- - - - - Agua impura
- - - - - Vapor del agua impura
- - - - - Vapor (agua)
- - - - - Agua destilada

- Flujómetro (F)
- Bomba de desplazamiento positivo
- Bomba centrífuga
- Sensor (s)
- Válvula (v)

NOMENCLATURA

- AB Absorbedor
- EV Evaporador
- GE Generador
- CO Condensador
- EC Economizador

Apéndice 2 servicios auxiliares

Sistema hidráulico del TTA

El sistema hidráulico está formado por bombas centrífugas y bombas de desplazamiento positivo las cuales proporcionan agua de calentamiento y mezclas de trabajo a los componentes del TTA. Las siguientes tablas muestran las características técnicas de estas bombas. De igual forma se presentan las características técnicas del enfriador comercial (*Chiller*).

Bombas para el agua de calentamiento del EV y GE

Tabla A1. Bomba centrífuga del agua de calentamiento del EV y GE

Marca	PEDROLLO	
Potencia	746 W	
Diámetro de succión	1 in	
Rango de Flujo	10 A 90 GPM	
Amperaje	14 A (120V)	
Revoluciones	2450 rpm	

Bombas para la mezcla de trabajo LiBr-H₂O

Tabla A2. Bomba de desplazamiento positivo del circuito de la mezcla de trabajo

Marca	COLE PARMER	
Potencia	115 VAC, 50/60 Hz, 2.0 A	
Motor	50-5000 rpm, 0.07 hp	
Tipo	PMDC	
Dimensiones	8 ½ in x 6 3/8 in x 5 3/16 in (21.5 x 16.1 x 13.1 cm)	

Bomba para el agua a destilar

Tabla A3. Bomba presurizadora agua a destilar

Marca	EVANS	
Potencia	120 W	
Diámetro de succión	3/4 in	
Flujo máximo	2 L/min	
Amperaje	1.14 A. 127 V a 60 Hz	

Enfriador comercial (*Chiller*) para el CO**Tabla A4.** Enfriador comercial (*Chiller*) para el CO

Potencia	1.12 kW	
Marca	CORNELLIUS	
Capacidad de refrigeración	18,000 Y 5,272 BTU/HR	
Voltaje	230 V	
Amperaje	13.0 A	

Sistema térmico del TTA

El sistema térmico está conformado por dos fuentes de calor las cuales simulan el calor de desecho del algún proceso industrial para el EV y el GE. Estas fuentes de calor son básicamente dos depósitos de agua las cuales se calientan por medio de resistencias térmicas instaladas en su interior. Las siguientes tablas muestran sus características técnicas.

Fuente de calor del GE

Tabla A5. Fuente de calor para el GE

Material	Acero al carbón	
Diámetro	40.7 cm.	
Tapa	Circular desmontable con sujeción	
Resistencias	3 kW con variador de voltaje	
Indicador de nivel	Tubing doblado con ángulos de 90 °	

Fuente de calor del EV

Tabla A6. Fuente de calor para el EV

Material	Acero al carbón	
Diámetro	20.7 cm.	
Tapa	Circular desmontable con sujeción	
Resistencias	3 kW con variador de voltaje	
Indicador de nivel	Tubing doblado con ángulos de 90 °	

Instrumentación del TTA

El TTA cuenta con instrumentación análoga y digital la cual permite monitorear el comportamiento de cada componente del TTA. Esta instrumentación está conformada por sensores de temperatura, presión y medidores de flujo instalados a lo largo de todo el TTA, las siguientes tablas muestran las especificaciones de cada instrumento de medición.

Sensores de temperatura del TTA

Tabla A10. Sensores de temperatura pt-100

Marca	West	
Cabeza atornillada	3/16" (0.47 cm)	
Bulbos	1 in, 2 in y 3 in (2.54, 5.08 y 7.62 cm) de longitud	
Conexión a proceso	¼ in NPT (0.63 cm)	
Forro	Teflón	
Hilos	3	
Precisión	±0.5%	
Rango	-40 °C a 750 °C	

Transductores de presión y manovacuómetros del TTA

Tabla A8. Transductor de presión circuito de agua impura

Marca	Cole-parmer	
Precisión	±0.25%	
Rango de temperatura	-4 a 176°F (-20 a 80°C)	
Voltaje	0.5 a 5.5 de salida	
Conexiones de proceso	¼ in (m) NPT	
Alimentación	9 a 30 v dc	
Rango de operación	-14.7 a 15 psig	

Tabla A9. Manovacuómetro del EV-AB y GE-CO

Marca	Ashcroft	
Precisión	±3% (ansi-asme grado b)	
Temperatura de operación	-50 a 180 °f (-45 a 82°C)	
Conexiones de proceso	¼ in (m) NPT	
Relleno	Glicerina	
Material	Acero inoxidable 316	
Tamaño del reloj	2 1/2 in (64 mm)	

Medidores de Flujo del TTA

Tabla A11. Flujómetro para mezcla de trabajo salidas del GE y del AB

Marca	Cole-parmer	
Presión máxima	200 PSI (13.7 BAR)	
Escala	mm	
Temperatura de operación	-15 a 250 °F (-26 a 121°C)	
Velocidad máxima de flujo	1288 ml/min para H2O	
Precisión	±2 % a escala completa	

Tabla A12. Flujómetro para Refrigerante entrada al EV

Marca	COLE PARMER
Presión máxima	200 PSI (13.7 BAR)
Escala	mm
Temperatura de operación	-15 a 250 °F (-26 a 121°C)
Precisión	±3 % a escala completa



Tabla A13. Flujómetro para el agua a destilar

Precisión	±3% a escala completa
Repetitividad	±0.5% a escala completa
Presión máxima (a 200°F)	200 PSI (13.7 BAR)
Temperatura de operación	200 °F (93°C)
Rango de operación	0.4 a 2.0 GPM
Flujo máximo para aire	8.2 SCFM
Conexiones	1/2 IN NPT (F)



Tabla A14. Flujómetros del agua de calentamiento

Precisión	±3% a escala completa
Presión máxima (a 200°F)	200 PSI (13.7 BAR)
Máx. temp. de operación	200 °F (93°C)
Rango de operación	1 a 4 GPM
Caída de presión máxima	6" (15.24CM) DE AGUA
Conexiones	1" (2.54CM) NPT



Tabla A15. Flujómetro para agua de enfriamiento del CO

Precisión	±3% a escala completa
Repetitividad	±0.5% a escala completa
Presión máxima (a 200°F)	200 PSI (13.7 BAR)
Máx. temp. de operación	200 °F (93°C)
Rango de operación	1 a 5 GPM
Conexiones	1" (2.54CM) NPT



Adquisidor de datos del TTA**Tabla A7. Adquisidor de datos**

Marca	AGILENT TECHNOLOGIES HP	
Modelo	34970	
Alimentación	127V A 60 Hz	
Módulos multiplexores	2 de 20 canales c/u	
Software	AGILENT BENCH LINK DATA LOGGER VERSION 1.5	