



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE
MORELOS**

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

**“CAÍDAS DE PRESIÓN DE UN SISTEMA TÉRMICO
INTEGRADO A UN SISTEMA DE PURIFICACIÓN DE
AGUA Y ANÁLISIS DE RECICLO DE MEZCLA
ABSORBENTE ($\text{LiBr} + \text{LiI} + \text{LiNO}_3 + \text{LiCl} + \text{H}_2\text{O}$) Y ($\text{LiBr} +$
 H_2O)”**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTA:

RODRIGUEZ AVILEZ ISAAC

DIRECTOR: DR. DAVID JUAREZ-ROMERO

**CO-DIRECTOR: DR. VÍCTOR MANUEL VELÁZQUEZ
FLORES**



CUERNAVACA, MOR.

DEDICATORIAS

A mis padres Elia Avilez Ramírez y Julián Salazar Bahena que me han dado todas las enseñanzas, su apoyo incondicional y su ejemplo de vida que me hacen ser la persona que soy ahora.

A mis hermanos Antonino Rodríguez Avilez, Sergio Rodríguez Avilez y Noemi Rodríguez Avilez que me guiaron a ir en el camino correcto y dar lo mejor de mí.

AGRADECIMIENTOS

Es muy grato expresar mi más sincera gratitud aquellas personas que con su conocimiento, consejos y ánimos hicieron posible este trabajo.

Al Dr. David Juárez Romero que con su apoyo, conocimientos y tiempo me ayudó a culminar este trabajo.

Al Dr. Víctor Manuel Flores Velázquez que con su apoyo, consejos y conocimientos me ayudó a enriquecer este trabajo

Al Dr. Tabai Torres Díaz que con sus consejos y conocimientos me ayudo a enriquecer este trabajo.

INDICE

LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABLAS	9
NOMENCLATURA	12
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
ANTECEDENTES	15
ESTUDIOS PREVIOS DE TRANSFORMADORES TÉRMICOS	17
OBJETIVO GENERAL	21
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
CAPÍTULO 1 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE DESALINIZACIÓN DE AGUA	22
Introducción	22
1.1 Factores que llevan a la desalinización de agua	22
1.1.1 Captación de agua	22
1.1.2 Sobrepoblación	23
1.1.3 Agua contaminada	24
1.1.4 Cambio climático	24
1.2 Principales métodos de desalinización de agua	25
1.2.1 Ósmosis inversa	25
1.2.2 Electrodialisis	26
1.2.3 Destilación	26
1.2.4 Congelación	27
1.2.5 Sales hidratadas	28
1.2.6 Destilación mediante bomba de calor	29
1.3 Viabilidad económica de los métodos de desalinización de agua	29
CAPÍTULO 2 CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE CALOR	31
Introducción	31
2.1 Bombas de calor	31
2.1.1 Bombas de calor por compresión mecánica	32
2.1.2 Bombas de calor por absorción convencional	34

2.1.3 Transformador térmico por absorción	36
2.1.4 Transformador térmico por absorción con economizador	37
2.2 Clasificación de la mezcla absorbente	38
2.2.1 Fluido de trabajo de las bombas de calor convencionales	41
2.2.2 Mezcla absorbente de los transformadores térmicos por absorción inversa	42
2.3 Caídas de presión en tuberías del circuito de la mezcla absorbente	44
2.3.1 Propiedades de las mezclas absorbentes (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O) Y (LiBr+H ₂ O)	45

CAPÍTULO 3 DISEÑO DEL TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN PARA PURIFICACIÓN DE AGUA 48

Introducción	48
3.1 Transformador de térmico por absorción para purificación de agua	48
3.2 Circuitos del transformador térmico por absorción para purificación de agua	50
3.2.1 Circuito de la mezcla absorbente	50
3.2.2 Dimensiones de las tuberías y accesorios donde circula la mezcla absorbente	54
3.2.2 Circuito de calentamiento	59
3.2.3 Circuito de enfriamiento	60
3.2.4 Circuito de agua a destilar	61
3.3 Instrumentación	64
3.3.1 Flujo másico	64
3.3.2 Presión	70
3.3.3 Temperatura	72
3.4 Equipos auxiliares	75
3.4.1 Equipos de calibración de transductores de presión	75
3.4.2 Equipos de calibración de termopares	78
3.4.3 Equipo de mantenimiento del transformador térmico	80
3.4.4 Equipo de adquisición de datos	81
3.4.5 Equipo de medición de concentración de la mezcla absorbente	82
3.5 Material aislante	83

CAPÍTULO 4 PREPARACIÓN, ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN PARA PURIFICACIÓN DE AGUA 84

Introducción	84
4.1 Medición de concentración de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O)	84
4.2 Mantenimiento del transformador térmico por absorción para purificación de agua	84
4.3 Purificación de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O)	85
4.4 Calibración de termopares	86
4.5 Calibración de transductores de presión	86
4.6 Pruebas de hermeticidad	88
4.7 Llenado de solución en el transformador térmico por absorción para purificación de agua	88
4.8 Operación de arranque del transformador térmico por absorción para purificación de agua	89
4.9 Operación del transformador térmico por absorción para purificación de agua	89
4.10 Operación de paro del equipo transformador térmico por absorción para purificación de agua	90
CAPÍTULO 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES	91
Introducción	91
5.1 Resultados obtenidos de las mezclas absorbentes (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O) y (LiBr+H ₂ O)	91
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES	98
APÉNDICE A Datos de seguridad del Bromuro de litio (LiBr)	100
APÉNDICE B Datos de seguridad del Ioduro de Litio (LiI)	102
APÉNDICE C Datos de seguridad del Nitrato de Litio (LiNO ₃)	104
APÉNDICE D Datos de seguridad del Cloruro de Litio (LiCl)	106
APÉNDICE E Tablas de la ubicación de los termopares	108
APÉNDICE F Estimación de la concentración de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O) e índice de refracción.	110
APÉNDICE G Mantenimiento del Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de Agua	111
APÉNDICE H Calibración de termopares	113
APÉNDICE I Calibración de transductores de presión	115

APÉNDICE J Tablas de la pendiente y la ordenada al origen de los termopares y transductores de presión	116
APÉNDICE K Arranque del Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de Agua	118
APÉNDICE L Operación del Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de Agua	120
APÉNDICE M Ecuación general de pérdidas de energía	121
APÉNDICE N Factor de fricción por pérdidas de altura y longitud equivalente en diámetros de tubería mediante accesorios.	123
BIBLIOGRAFÍA	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Geografía mundial de la escasez del agua [Pradillo 2019].	23
Figura 1.2 Estimación de agua disponible por habitante [Sanz 2018].	23
Figura 1.3 Esquema del método por ósmosis inversa [Campayo 2019].	25
Figura 1.4 Esquema del método por electrodiálisis [Campayo 2019].	26
Figura 1.5 Esquema del método de desalinización por destilación [Campayo 2019].	27
Figura 1.6 Esquema del método de desalinización por congelación [Campayo 2019].	28
Figura 2.1 Diagrama esquemático Presión – Temperatura de una bomba de calor por compresión mecánica [Torres 2017].	33
Figura 2.2 Diagrama del proceso de básico de absorción [Torres 2017].	34
Figura 2.3 Diagrama esquemático Presión – Temperatura de una bomba de calor por absorción convencional [Torres 2017].	35
Figura 2.4 Diagrama esquemático Presión – Temperatura de un Transformador térmico [Torres 2017].	37
Figura 2.5 Diagrama esquemático Presión – Temperatura de un transformador térmico con economizador [Torres 2017].	38
Figura 3.1 Diagrama esquemático del Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de Agua [Huicochea 2009].	49
Figura 3.2 Vista frontal del haz de tubos y vista lateral del generador [Huicochea 2009].	52
Figura 3.3 Vista frontal del haz de tubos y vista lateral del absorbedor [Huicochea 2009].	54
Figura 3.4 Diseño del condensador [Torres 2017].	57
Figura 3.5 Diseño del evaporador [Torres 2017].	58
Figura 3.6 Diseño del economizador [Torres 2017].	59
Figura 3.7 Diseño del depósito de calentamiento [Torres 2017].	60
Figura 3.8 Torre de enfriamiento.	61
Figura 3.9 Esquema del tanque separador [Torres 2017].	62
Figura 3.10 Diseño del condensador auxiliar 1 [Torres 2017].	63
Figura 3.11 Diseño del condensador auxiliar 2 [Torres 2017].	64
Figura 3.12 Flujómetros de la mezcla absorbente.	65

Figura 3.13	Flujómetros de calentamiento.	66
Figura 3.14	Flujómetro de enfriamiento.	67
Figura 3.15	Flujómetro de la recirculación y del circuito de purificación.	68
Figura 3.16	Bomba del circuito de calentamiento [Torres 2017].	69
Figura 3.17	Bombas de la mezcla absorbente y agua condensada [Torres 2017].	70
Figura 3.18	Transductores de presión [Torres 2017].	71
Figura 3.19	Manovacúómetros de presión.	72
Figura 3.20.	Termopares [Torres 2017].	73
Figura 3.21	Termopozos [Torres 2017].	74
Figura 3.22	Calentadores eléctricos [Torres 2017].	74
Figura 3.23	Manómetro calibrador de presión.	76
Figura 3.24	Bomba de vacío [Torres 2017].	77
Figura 3.25	Calibrador de presión.	77
Figura 3.26	Multímetro digital.	78
Figura 3.27	Baño termostático.	79
Figura 3.28	Compresor de aire.	80
Figura 3.29	Adquisidor de datos [Torres 2017].	81
Figura 3.30	Refractómetro [Torres 2017].	82
Figura 4.1	Mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O).	85
Figura 4.2	Calibración de los transductores de presión.	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparación de los principales de métodos de desalinización.	30
Tabla 2.1 Fluidos de trabajo para las bombas de calor por compresión mecánica [Huicochea 2009].	41
Tabla 2.2 Mezcla absorbente para las bombas de calor por absorción convencional.	42
Tabla 2.3 Mezcla absorbente para los transformadores térmicos.	43
Tabla 2.4 Propiedades de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O).	45
Tabla 2.5 Propiedades de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O) en recirculaciones.	46
Tabla 2.6 Propiedades de la mezcla absorbente (LiBr+H ₂ O).	46
Tabla 2.7 Propiedades de la mezcla absorbente (LiBr+ H ₂ O) en recirculaciones.	47
Tabla 3.1 Características del generador.	51
Tabla 3.2 Características del absorbedor.	53
Tabla 3.3 Dimensiones de los tramos de tubería del generador al absorbedor.	55
Tabla 3.4 Dimensiones de los tramos de tubería del absorbedor al generador.	55
Tabla 3.5 Dimensiones de tubería de las recirculaciones del generador y absorbedor.	55
Tabla 3.6 Accesorios de los tramos de tubería del circuito de la mezcla absorbente.	56
Tabla 3.7 Accesorios de las recirculaciones del generador y absorbedor.	56
Tabla 3.8 Características del condensador.	57
Tabla 3.9 Características del evaporador.	58
Tabla 3.10 Características del economizador.	59
Tabla 3.11 Características del depósito de calentamiento.	60
Tabla 3.12 Características del depósito de la torre de enfriamiento.	61
Tabla 3.13 Características del depósito del tanque separador.	62
Tabla 3.14 Características del condensador auxiliar 1.	63
Tabla 3.15 Características del condensador auxiliar 2.	64
Tabla 3.16 Características de los flujómetros de la mezcla absorbente.	65
Tabla 3.17 Características de los flujómetros de calentamiento.	66
Tabla 3.18 Características del flujómetro de enfriamiento.	67
Tabla 3.19 Características del flujómetro de la recirculación y del circuito de purificación.	68

Tabla 3.20 Características de la bomba del sistema de calentamiento.	69
Tabla 3.21 Características de las bombas de la mezcla absorbente y agua condensada.	70
Tabla 3.22 Características de los transductores de presión.	71
Tabla 3.23 Características de los manovacuómetros.	72
Tabla 3.24 Características de los termopares.	73
Tabla 3.25 Características de los termopozos.	73
Tabla 3.26 Características de los calentadores eléctricos.	74
Tabla 3.27 Características del manómetro calibrador de presión.	75
Tabla 3.28 Características de la bomba de vacío.	76
Tabla 3.29 Características del calibrador de presión.	77
Tabla 3.30 Características del multímetro digital.	78
Tabla 3.31 Características del baño termostático.	79
Tabla 3.32 Características del compresor de aire.	80
Tabla 3.33 Características del adquisidor de datos.	81
Tabla 3.34 Características del refractómetro.	82
Tabla 3.35 Características del material aislante.	83
Tabla 5.1 Cálculos de las pérdidas de energía por altura para (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O).	91
Tabla 5.2 Resultados da las pérdidas de energía por altura para (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O).	92
Tabla 5.3 Cálculos de las pérdidas de energía por altura en recirculaciones para (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O).	92
Tabla 5.4 Resultados da las pérdidas de energía por altura en recirculaciones para (LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O).	93
Tabla 5.5 Cálculos de las pérdidas de energía por altura para LiBr+H ₂ O.	93
Tabla 5.6 Resultados da las pérdidas de energía por altura para LiBr+H ₂ O.	94
Tabla 5.7 Cálculos de las pérdidas de energía por altura en recirculaciones para LiBr+H ₂ O.	94
Tabla 5.8 Resultados da las pérdidas de energía por altura en recirculaciones para LiBr+H ₂ O.	95

Tabla 5.9 Resultados de las caídas de presión para cada mezcla absorbente en el circuito absorbedor-generador.	95
Tabla 5.10 Resultados de las caídas de presión para cada mezcla absorbente para las recirculaciones de flujo del generador y absorbedor.	96
Tabla 5.11 Análisis comparativo del incremento en las caídas de presión para las mezclas absorbentes en el circuito generador-absorbedor.	96
Tabla 5.12 Análisis comparativo del incremento en las caídas de presión para las mezclas absorbentes para las recirculaciones del generador y absorbedor.	97
Tabla N.1 Factor de fricción mediante tamaño nominal de tubería [Mott 2013].	123
Tabla N.2 Longitud equivalente en diámetros de tubería [Mott 2013].	123

NOMENCLATURA

COP: Coeficiente de operación

TTAPPA: Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de Agua

Q: Flujo de calor (kW)

T: Temperatura (°C)

X: Concentración (% en peso)

AB: Absorbedor

GE: Generador

CO: Condensador

EV: Evaporador

EC: Economizador

Z₂: Altura con respecto a un punto de referencia (m)

L: Longitud de la tubería (m)

D: Diámetro de la tubería (m)

v: Velocidad promedio del flujo (m/s)

P: presión (Pa, kPa)

ρ : Densidad (kg/m³)

μ : Viscosidad (Pa*s)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

f: Factor de fricción para tramos de tubería

ft: Factor de fricción para accesorios

h_A: Energía añadida al fluido de por un dispositivo mecánico (m)

h_R: Energía retirada al fluido por un dispositivo mecánico (m)

h_L: Pérdida de energía por parte del fluido por un dispositivo mecánico (m)

RESUMEN

El presente trabajo teórico-experimental se realizó en un transformador térmico por absorción del Laboratorio de Ingeniería Térmica Aplicada, CIICAp, el cual puede aprovechar el calor residual de fuentes térmicas a menor temperatura y liberar calor a una temperatura más elevada. El calor liberado es utilizado para un sistema de purificación de agua acoplado a este transformador térmico.

Tabai en 2018 realizó un análisis de la transferencia de calor experimental en el transformador térmico con $(\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O})$. Mtra. Celeste año realizó un estudio teórico para modificar las dimensiones de las tuberías; con el propósito de reducir las caídas de presión y la longitud de la tubería al considerar la mezcla absorbente $(\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O})$.

En este equipo se han utilizado diferentes mezclas absorbentes; considerando sus propiedades fisicoquímicas y las características de diseño del equipo. Por ejemplo, la mezcla absorbente $(\text{LiBr}-\text{H}_2\text{O})$ es frecuentemente utilizada, pero tiene el inconveniente que presenta alta corrosividad en las tuberías. Por tal motivo, se optó por usar la mezcla absorbente $(\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O})$ que en trabajos anteriores se utilizó por sus ventajas; tales como: alta solubilidad, menor riesgo de cristalización y menor corrosividad.

En este trabajo, se comparan las mezclas absorbentes $(\text{LiBr}+\text{H}_2\text{O})$ y $(\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O})$ para determinar las caídas de presión en las tuberías y accesorios del circuito por donde fluyen las mezclas absorbentes en el transformador térmico.

Al hacer un análisis de los resultados de las caídas de presión se tiene como resultado que son mayores para la mezcla absorbente $(\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O})$ que para la mezcla $(\text{LiBr}+\text{H}_2\text{O})$; esto es debido a que la viscosidad dinámica y la densidad son mayores para $(\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O})$.

INTRODUCCIÓN

El panorama que maneja la investigación de energías sustentables es prometedor para aprovechar las materias primas y su energía de residuos en su totalidad. La investigación de los sistemas para la recuperación de la energía residual en la actualidad ha recibido un enorme impulso en gran medida al avance de diferentes áreas tecnológicas. La investigación, ha encontrado con este avance una ayuda importante, ya que se auxilia directamente al empleo de energías sustentables, aplicadas directamente a procesos industriales, más productivos y rentables [Velasco 2019].

La industria consume 54% de energía que se produce, pero parte de ella se pierde de diversas formas durante el proceso o no se da un aprovechamiento óptimo de la misma como la energía eléctrica, energía a base hidrocarburos y gas natural. Esto causa pérdidas en porcentajes muy elevados. Debido a este problema se tiene el interés por nuevas investigaciones y técnicas que mejoren el uso de los recursos energéticos [Velasco 2019].

Los ciclos de absorción son una opción, debido a que la recuperación de energía térmica del ciclo puede ser utilizada en otro proceso [Torres 2017]. Este tipo de estudios frecuentemente presentan como finalidad, el reducir las pérdidas de energía que se llevan a cabo durante un proceso a un mínimo [Torres 2017].

Una de las tecnologías que basan su funcionamiento en energías renovables. Son los transformadores térmicos los cuales tienen un porcentaje alto de ahorro de energía del 10% [Velasco 2019]. Son mecanismos que extraen el calor de fuentes térmicas de baja temperatura y lo entregan a otra temperatura más elevada. El calor circula por naturaleza de altas a bajas temperaturas. Sin embargo, Las bombas de calor pueden obligar a su flujo a ir en sentido contrario, usando una cantidad de trabajo indefinidamente pequeña. Estas bombas pueden transferir este calor de diferentes fuentes naturales como el aire, agua o la tierra a baja temperatura, hacia los procesos que requieren una cierta cantidad de calor, como la calefacción de espacios [Huicochea 2009].

ANTECEDENTES

El agua es un elemento esencial e integrante de los ecosistemas naturales, fundamental para el sostenimiento y la reproducción de la vida en el planeta ya que constituye un factor indispensable para el desarrollo de los procesos biológicos que la hacen posible, así como esencial para las actividades económicas que se desarrollan en diferentes naciones. No obstante, el agua es una limitante para el desarrollo de los sectores, por su escasez u otros factores.

Las condiciones geográficas, el clima y el nivel de desarrollo tecnológico determinan la cantidad de agua que una región utiliza. Los factores que impactan la disponibilidad de este recurso son el incremento de la población, y el aumento de su demanda para sectores industriales. Pero el factor que hace más difícil cubrir la demanda es el volumen de agua potable que contiene el planeta el cual es muy limitado. No obstante, el agua se comparte con otras formas de vida: Esto impone la responsabilidad de hacer sistemas de purificación de agua con una fuerte base, tanto tecnológica como sustentable.

El hombre ha ideado multitud de sistemas para convertir el agua de mar en agua potable y poder así suministrarla a la población con mayores dificultades de acceso a agua dulce. Son tecnologías sencillas, de bajo costo y de fácil implementación que permiten alcanzar niveles aceptables de descontaminación en regiones rurales, de escasos recursos que resulten aceptables y sean socios económicamente viables. La tecnología de la desalinización del agua lo hace posible [UNESCO 2021].

Con base en la superficie del planeta, la cantidad de agua total es el 96,5%, localizado en mares y océanos, pero no es potable dado su alto nivel de salinidad; mientras que el restante 3.5 % es agua potable que se encuentra a nivel superficial en forma de ríos y arroyos, a nivel subterráneo en forma de acuíferos naturales, y en forma de hielo en los polos y cimas de montañas.

La agricultura (incluyendo el riego, la ganadería y la acuicultura) es, con mucho, el mayor consumidor de agua, ya que representa el 69% de las extracciones anuales de agua a nivel mundial. La industria (incluida la producción de energía) representa el 19%, y las familias el 12% [FAO 2020].

Las tecnologías utilizadas eran caras y se empezó a asociar la desalinización con la producción de energía eléctrica, que también se necesitaba en importantes cantidades en los países. Así surgen las plantas duales que producen electricidad y agua tratando de mejorar las ineficiencias de ambos procesos para reducir los costes del agua para aprovechar fuentes de alimentación fácilmente disponibles y el beneficio de las sinergias del proceso de energía/agua [Latorre 2004].

A pesar de que varios países son ricos en reservas petrolíferas y gas, la desalinización de agua de mar y aguas salobres no puede ser una opción sostenible a menos que se tomen en consideración fuentes de energía alternativas [UNESCO 2021].

La desalinización requiere una gran cantidad de energía suministrada, que en la mayoría de los casos es adquirida de combustibles fósiles. Por consiguiente, el panorama que necesita cubrir es el coste de la energía y la disponibilidad de energías alternativas ya que esta problemática limita a la desalinización, así como disminuir los impactos ambientales [Albertí 2015].

Hoy en día, el uso de las bombas de calor ofrece un doble beneficio: aprovechan el calor de los fluidos de desecho y tienen la capacidad de transformar la salmuera en agua de alta pureza [Santoyo-Gutiérrez 2007].

ESTUDIOS PREVIOS DE TRANSFORMADORES TÉRMICOS

En 2009, Huicochea realizó un estudio teórico - experimental de un sistema portátil para purificación de agua integrado a un transformador de calor. El proceso consiste en un transformador de calor de una etapa de ciclo refinado, el cual tiende a incrementar la energía suministrada a un nuevo nivel térmico. La capacidad de diseño del sistema térmico es de 0.7 kW, utilizando LiBr - H₂O y Carrol – H₂O como mezclas absorbentes.

Los componentes operan en configuración de corriente cruzada y contracorriente, el método de contacto en el sistema es por película descendente e inundado, obteniendo como resultado de máximos incrementos del coeficiente de operación del 95.0% para LiBr - H₂O y 98.0% para Carrol – H₂O. El reciclado de calor en un solo componente (generador o evaporador) de la fuente de calor se propuso teóricamente, demostrando que existe mayor incremento de la eficiencia del uso de la energía cuando el reciclado de calor es aplicado únicamente al generador.

En 2013, Parham, Yari y Atikol reportaron un estudio de configuraciones alternativas de un transformador de calor por absorción (AHT) integrado con un sistema de desalinización de agua. El proceso aplica un transformador de calor de una etapa de ciclo refinado. Se usó calor residual de una fábrica textil para ejecutar los sistemas AHT y se emplea el calor generado a una elevada temperatura con el propósito de desalinizar agua, utilizando LiBr - H₂O como mezcla absorbente.

El método de contacto en el AHT es por película descendente e inundado. El riesgo de cristalización de LiBr - H₂O se reduce en las configuraciones modificadas. La configuración 4 fue la más eficiente dando como resultado un COP de 13–14% y una tasa máxima de agua pura destilada de 0.2435 kg/s. Esto ocurre cuando el evaporador utiliza el calor residual del condensador.

En 2014, Ibarra-Bahena y Romero en colaboración con otros investigadores evaluaron experimentalmente un prototipo de transformador de calor por absorción (AHT) a diferentes niveles de temperatura en el generador y en el evaporador. El funcionamiento del transformador de calor es de ciclo refinado por absorción de una etapa, utilizando Carrol – H₂O como mezcla absorbente.

El prototipo experimental está configurado en corriente cruzada y contracorriente. El AHT fue operado con cuatro niveles de temperatura y dos niveles de presión. Si la fuente de calor se calienta inicialmente en el evaporador y luego en el generador, se puede trabajar con diferentes configuraciones a diferentes niveles de temperatura, dando como resultados los coeficientes de rendimiento (COP) de 0.26 - 0.35 para esas condiciones. Se llegó a la conclusión de que la configuración logra un alto valor de temperatura en el absorbedor, haciendo recomendaciones para futuros prototipos.

En 2015, Demesa y Hernández en conjunto con otros investigadores reportaron la mejora del rendimiento de un transformador de calor de absorción a través de un proceso de efecto único para obtener agua dulce. El transformador de calor por absorción de una etapa cuenta con una capacidad diseño de 2 kW, utilizando LiBr - H₂O como mezcla absorbente.

Los componentes operan en configuración de corriente cruzada y contracorriente. El método de contacto en el sistema es por película descendente. Se analizaron 3 configuraciones bajo varios parámetros operativos. Según los resultados, la configuración 3 fue la más eficiente dando valores de COP que varían entre 0.473 y 0.532 y una tasa máxima de agua destilada de 4.998×10^{-04} kg/s. El calor sensible del proceso se puede utilizar en el mismo equipo para el agua condensada, así como el calor latente para precalentar el agua salobre, ya que esto ha sido recomendado en trabajos anteriores.

En 2017, Torres reportó un estudio de un transformador térmico integrado a un sistema de purificación de agua. El transformador térmico permite extraer el calor de una fuente de desecho a menor temperatura y elevarla a una temperatura mayor. Este tipo de transformador de calor es de ciclo refinado por absorción de una etapa, el cual tiene una capacidad de diseño de 0.7 kW, utilizando (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) como mezcla absorbente.

Los componentes trabajan en configuración de corriente cruzada y contracorriente, el método de contacto en el sistema es por película descendente e inundado, dando como resultado valores de COP que varían entre 0.126 - 0.174 y una tasa máxima de agua destilada 348 ml/h. Esto se debe a que la mezcla absorbente tiene una alta solubilidad, es más estable y menos sensible a los cambios en las presiones de operación, como a las variaciones de los flujos en el absorbedor y es menos corrosiva que el LiBr - H₂O, porque se disminuye el riesgo de cristalización, permitiendo el funcionamiento del absorbedor a una concentración de sal más alta que con la mezcla absorbente convencional LiBr - H₂O. Por lo tanto, la mezcla cuaternaria es más adecuada para reducir perturbaciones durante la operación del sistema.

En 2018, Salgado reportó un incremento de purificación de agua en un transformador térmico por absorción. El transformador térmico es de ciclo refinado por absorción de una etapa, el cual tiene una capacidad de diseño de 0.7 kW, utilizando (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) como mezcla absorbente. Los componentes trabajan en configuración de corriente cruzada y contracorriente, el método de contacto en el sistema es por película descendente e inundado.

El estudio dio como resultado una ΔP de 0.401 kPa en el tubo anular del economizador del ciclo del absorbedor al generador y ΔP de 0.062 kPa en tuberías del ciclo del generador al absorbedor antes del economizador. Se llegó a la conclusión que las mayores caídas de presión suceden en estas partes del transformador térmico y al reducir las caídas de presión se tiene como resultado un aumento en el flujo másico de la mezcla absorbente en el absorbedor.

Teóricamente al modificar las tuberías tenemos un aumento de purificación de agua de 16 ml/h a 30 ml/h en un intervalo de tiempo en estado estable. La mezcla absorbente ha demostrado ser la más útil en mantener por más tiempo el estado estable y en buenas condiciones los equipos del sistema.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar experimentalmente las caídas de presión del Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de agua con análisis de reciclo de las mezclas absorbentes (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) y (LiBr+H₂O).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar pruebas experimentales en un transformador térmico por absorción usando como mezclas absorbentes (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) y (LiBr+H₂O).
2. Calcular las caídas de presión en el circuito absorbedor-generador y sus recirculaciones con las mezclas absorbentes (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) y (LiBr+H₂O).
3. Comparar los resultados de las caídas de presión obtenidas de las pruebas experimentales.

CAPÍTULO 1

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA EVALUACIÓN ECONÓMICA DE DESALINIZACIÓN DE AGUA

Introducción

En este capítulo se evalúan los factores de la desalinización de agua, los factores que llevan a la desalinización de agua, las problemáticas y sus consecuencias, la descripción de los principales métodos de desalinización de agua salobre y la viabilidad económica de los métodos de desalinización.

1.1 Factores que llevan a la desalinización de agua

Los factores que llevan a desalar aguas salobres o marinas son circunstancias cada vez más concurrentes y problemáticas, dado que la obtención de agua potable ha sido un problema que lleva a buscar nuevas formas de conseguirla.

1.1.1 Captación de agua

La captación de agua potable en la geografía mundial de diversas regiones se ha reducido considerablemente. Esto se debe a diversos factores que conllevan a una demanda alta del recurso. Los países más vulnerables están en Oriente Medio, pues de los 33 países 14 tienen una probabilidad de sufrir una escasez de agua potable en el 2040 junto con 3 países en América, esta carencia se debe a los recortes en el suministro de agua, la ausencia de precipitaciones y altas temperaturas [Romero 2019].

En estos países existe una alta escasez de agua. Esto ocurre cuando la demanda de agua es más alta que la cantidad existente durante un periodo determinado o cuando su uso se ve restringido por diversos factores que impactan en su calidad, disponibilidad y distribución [Pradillo 2019]. La figura 1.1 muestra los países con alta escasez de agua potable.

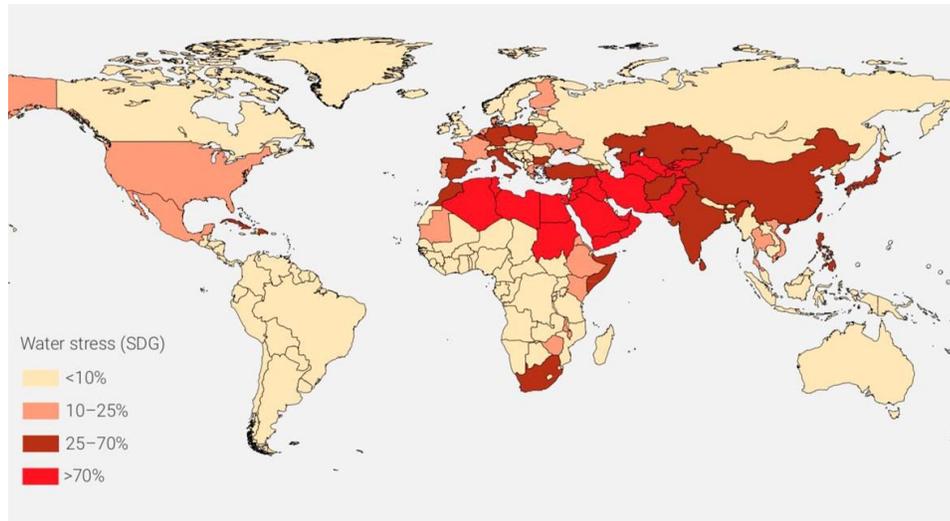


Figura 1.1 Geografía mundial de la escasez del agua [Pradillo 2019].

1.1.2 Sobrepoblación

La sobrepoblación es un factor demandante para la desalinización de agua. El crecimiento acelerado de la población ocasiona un aumento de la demanda del agua dulce y esta expansión demográfica no parece que vaya a cesar. En la figura 1.2 se muestra la decaída del agua renovable disponible y el agua total renovable comparada con el crecimiento de la población. Esto demuestra que, del 2040 en adelante, debido al aumento de la población, aumentará la escasez del agua disponible por habitante.

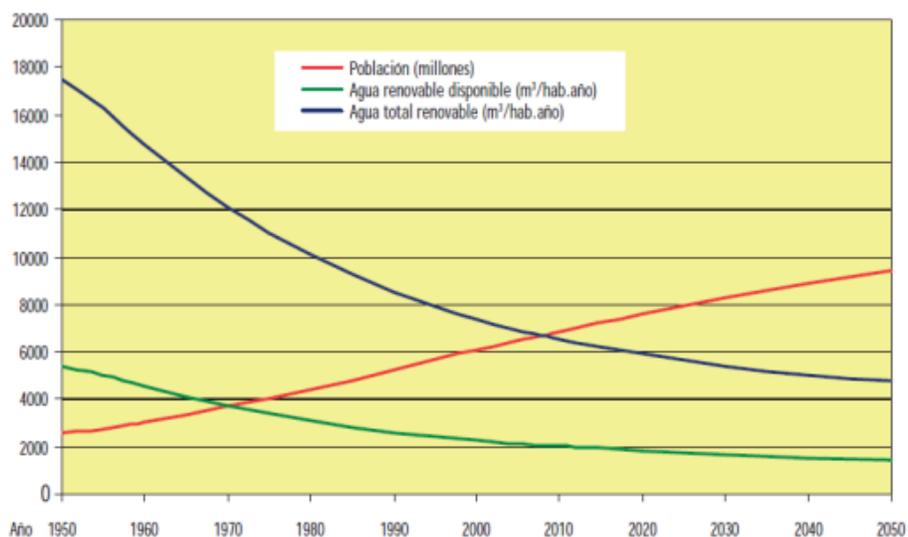


Figura 1.2 Estimación de agua disponible por habitante [Sanz 2018].

1.1.3 Agua contaminada

El agua contaminada es una consecuencia de la sobrepoblación, pues prácticamente todas las actividades que generan algún producto o servicio de bienes generan contaminantes como subproductos no deseados. Los contaminantes más comunes en aguas residuales por actividades humanas son: metales pesados, sustancias tensioactivas (detergentes), microbios patógenos, nutrientes (carbono, nitrógeno y fósforo), materia orgánica, sedimentos en suspensión y pesticidas. Estos últimos tienen más probabilidades de estar presentes en el agua de captación de una instalación desaladora. Estos contaminantes generalmente son las causas más importantes de la pérdida de calidad de agua en todo el mundo.

El 11% de la población mundial no tiene acceso al agua ni a instalaciones básicas de saneamientos. Esto causa que el 80% de las enfermedades sean causadas por agua contaminada, pues más 1000 millones de personas en el mundo utilizan aun fuente de agua no apta para el consumo. Esto causa que 3.4 millones de muertes al año estén relacionadas con la contaminación del agua [Pradillo 2019].

1.1.4 Cambio climático

Los pronósticos actuales sobre el cambio climático resaltan la problemática de la elevación de la temperatura y de nivel mar, con consecuencias como las sequias y tormentas más intensas, acelerando la escasez de agua principalmente en zona áridas y costeras en los próximos 20 – 30 años.

Los esfuerzos para detener el cambio climático llevarían a la innovación de métodos de desalinización en zonas más afectas por la escasez del agua y se pronostica que las condiciones climáticas extremas podrían reducir el PIB mundial en un 1% de aquí al 2050 y los costos del cambio climático podrían ascender como mínimo al 5% del PIB cada año. Esto causaría que la desalinización del agua fuera más cara y el agua potable empezara a cotizar en las bolsas de valores como el oro, trigo y plata [WATER 2016].

1.2 Principales métodos de desalinización de agua

Los métodos de desalinización son tratamientos físicos o químicos. Se caracterizan por procesos de destilación y por membrana, los cuales purifican agua salobre o marina para remover sales y minerales para consumo humano, doméstico, agricultura y procesos industriales.

1.2.1 Ósmosis inversa

El método de ósmosis inversa inicia mediante dos tipos de agua con diferente concentración de sales. El agua con mayor concentración fluye a través de la membrana hacia la que presenta una menor concentración de sales y la presión osmótica provoca el movimiento del agua.

Este método opera mediante un previo tratamiento del agua salobre o marina. La presión aplicada para el agua salobre debe de ser 290 psi y para el agua marina debe de ser 725 psi. Este método entrega una calidad de agua media, es decir, no es apta para consumo humano [Campayo 2019]. La figura 1.3 muestra un esquema por ósmosis inversa.

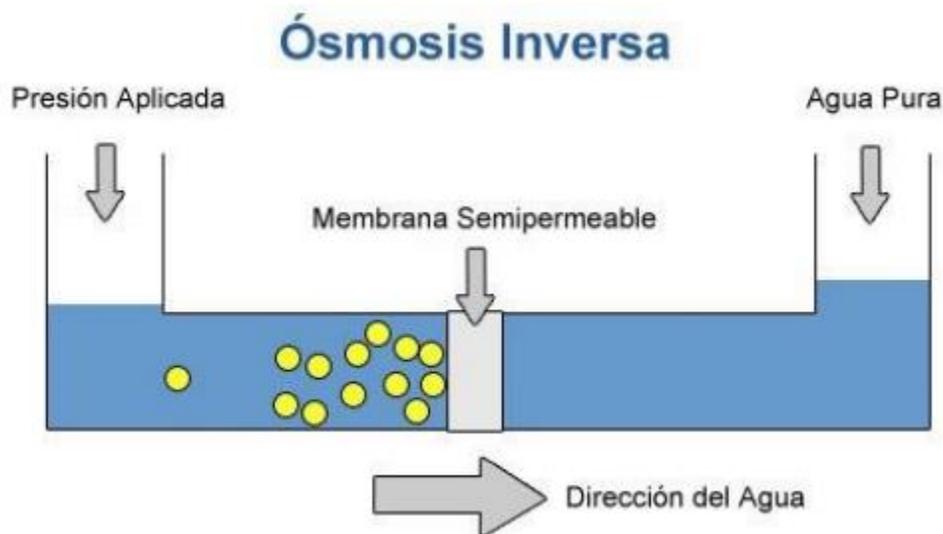


Figura 1.3 Esquema del método por ósmosis inversa [Campayo 2019].

1.2.2 Electrodiálisis

La electrodiálisis es un método electroquímico en el que se aplica una disolución donde las sustancias que los componen se separan en forma iónica. Se utilizan membranas selectivas catiónica o aniónicas, separadas y situadas entre espaciadores, cuya función es dirigir las corrientes de la disolución y ayudar a la dispersión del líquido. Se produce el transporte de iones mediante la diferencia de potencial eléctrico y de concentración [Campayo 2019].

Este método de membranas soporta aguas de rango salobres. Para la desalinización de aguas marinas lo más recomendable es utilizar el método de osmosis inversa, pues la calidad del agua que entrega este método es de media, es decir no es apta para consumo humano. La figura 1.4 muestra un esquema de la electrodiálisis.

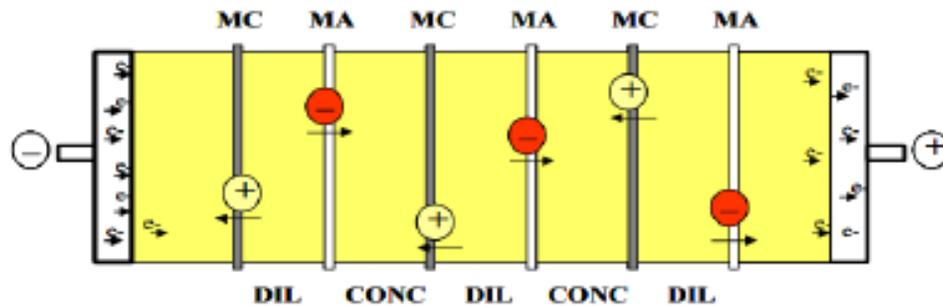


Figura 1.4 Esquema del método por electrodiálisis [Campayo 2019].

1.2.3 Destilación

La destilación es un método basado en la transferencia de calor hacia el agua salobre o marina hasta llevarla a evaporación y posteriormente condensarla para obtener agua potable. El método se produce en varias etapas, dado que en cada una de ellas el agua salobre o marina se evapora y en cuestión de segundos se condensa en agua potable a diferente presión y temperatura que en general descienden en cada etapa [Moreno 2004].

La destilación se convirtió en el método más utilizado para desalinizar agua. Por tal motivo existen diferentes tipos de destilación, como destilación por multietapas de flasheo, destilación por compresión de vapor y sistemas de destilación multiefectos. Estos métodos son utilizados por su eficiencia.

La destilación requiere una gran inversión de energía y entre más etapas tenga la destilación mayor será el coste de energía. También se realiza un pretratamiento del agua marina por la alta concentración de sales y otros elementos disueltos en ella. Este método de desalinización entrega agua de alta calidad, es apta para consumo humano y para otras actividades. La figura 1.5 muestra un esquema de destilación en general.

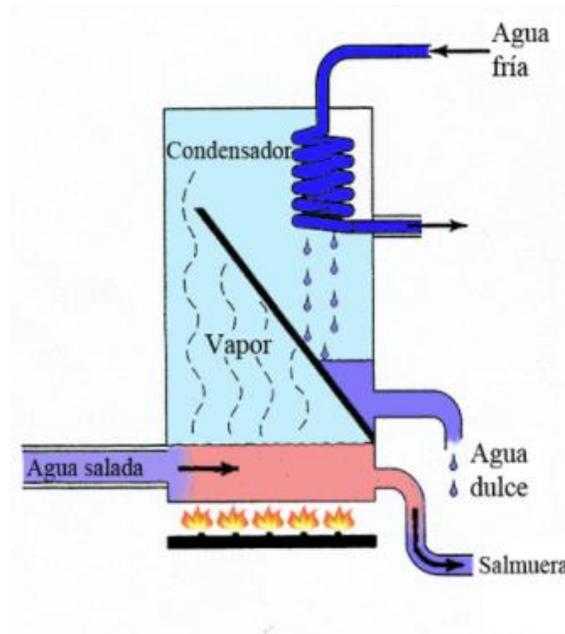


Figura 1.5 Esquema del método de desalinización por destilación [Campayo 2019].

1.2.4 Congelación

Este método consiste en congelar el agua salobre, recoger los cristales de hielo puro que se formaron para fundirlos y obtener un agua potable independientemente de la concentración del agua inicial. Este método de desalinización por congelación cuenta con dos categorías.

En la primera categoría se mezcla directamente el agua salobre con un refrigerante líquido, el refrigerante se vaporiza y escapa por la parte superior del congelador, al mismo tiempo, el agua de mar se enfría y luego se congela. Los requisitos del refrigerante son estrictos, debe ser atóxico, químicamente inactivo, inmisible en agua y resistente a la formación de hidratos [Chang 2016].

En la segunda categoría se utilizan paredes para aislar el refrigerante del agua de mar y el intercambio de calor ocurre a través de las paredes del cristizador con condiciones de enfriamiento ajustables. En las dos categorías se adquiere agua de alta calidad, apta para todas las actividades humanas que requieran agua potable. La figura 1.6 muestra un esquema de la desalinización por congelación.

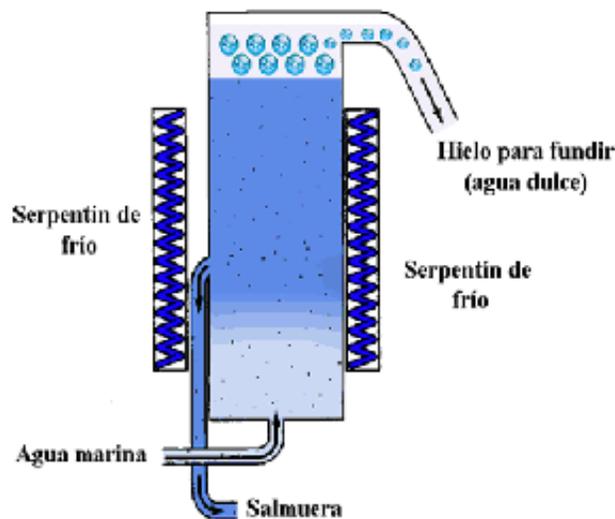


Figura 1.6 Esquema del método de desalinización por congelación [Campayo 2019].

1.2.5 Sales hidratadas

Las sales hidratadas es un método de cristalización en el que el agua entra en contacto con sales anhidras higroscópicas e inmediatamente se forman hidratos complejos en forma cristalina. Estas sales hidratadas se retiran, se lavan y se deshidratan nuevamente por medio de calor, obteniendo agua potable de alta calidad. Las sales anhidras que quedan pueden reutilizarse nuevamente [Moreno 2004].

Este método es utilizado para la desalinización de agua salobre. Se debe trabajar con hidrocarburos dado que son los más adecuados y entrega agua de alta calidad, apta para consumo humano y actividades que requieran de agua potable.

1.2.6 Destilación mediante bomba de calor

La destilación mediante bombas de calor por absorción consiste en transferir calor de desecho de alguna fuente con energía térmica y redirigirla hacia un generador donde se separa la mezcla absorbente en dos partes, parte absorbente y refrigerante. Mediante la condensación y evaporación del refrigerante se absorbe a mezcla absorbente. Esto sucede en el absorbedor donde se genera una reacción exotérmica realizando la purificación de agua salobre en agua potable mediante el calor liberado [Huicochea 2009].

La destilación mediante bomba de calor requiere una mezcla absorbente que esté constituida por una parte absorbente y un refrigerante. La calidad de agua potable es alta, apta para consumo humano y actividades relacionadas.

1.3 Viabilidad económica de los métodos de desalinización de agua

Los métodos de desalinización de agua tienen que cumplir ciertos factores para ser rentables y no tener un alto costo al momento de operar, ya sea por insumos o energía, dado que, en algunas regiones, el utilizar energía en exceso causaría que otras se quedarán sin ella por motivos de sustentar la desalinización de agua salobre o marina. Por este motivo se debe tener en cuenta ciertas cuestiones, como:

- Tasa de producción
- Consumo de energía
- Insumos
- Mantenimiento
- Calidad del agua potable

En la tabla 1.1 se muestra esta comparación entre los métodos de desalinización con base en su descripción, dado que algunos cumplen ciertas características para solventar cierto porcentaje de la demanda.

Tabla 1.1 Comparación de los principales de métodos de desalinización.

Método de desalinización \ Factores	Tasa de producción	Consumo de energía	Insumos	Mantenimiento	Calidad del agua potable
Ósmosis inversa	Alta	Bajo	Membranas	Mantenimiento de alto costo	Media
Electrodialisis	Alta	Alto	Membranas	Mantenimiento de bajo costo	Media
Destilación	Alta	Alto	Ninguno	Mantenimiento de alto costo	Alta
Congelación	Alta	Bajo	Refrigerante liquido	Mantenimiento de bajo costo	Alta
Sales hidratadas	En estudio	Bajo	Sales anhídridas	Mantenimiento de bajo costo	Alta
Destilación mediante bomba de calor	En estudio	Bajo	Mezcla absorbente	Mantenimiento de bajo costo	Alta

CAPÍTULO 2

CLASIFICACIÓN DE LAS BOMBAS DE CALOR

Introducción

En este capítulo se describen las clasificaciones de las bombas de calor, su concepto, los principales aspectos de su funcionamiento, así como las mezclas absorbentes que se pueden llegar manejar en cada una, aspectos relevantes sobre los componentes que integran una bomba de calor y la diferencia entre cada una de ellas mediante la forma en que operan.

2.1 Bombas de calor

Una bomba de calor es una máquina térmica que está diseñada para propósitos de calentamiento. La bomba de calor extrae calor de una fuente a una cierta temperatura, como energía geotérmica de baja entalpía o un efluente industrial y la entrega a un nivel de temperatura más útil. Para lograr este efecto, la bomba de calor requiere de una cantidad pequeña de energía de alto nivel, la cual puede estar en forma de energía mecánica o térmica a alta temperatura, dependiendo del tipo de bomba de calor [García-Gutiérrez 2008].

Las bombas de calor transfieren el calor utilizable. El coeficiente de operación (COP, por sus siglas en inglés Coefficient of Performance) es un parámetro importante para la evaluación de las bombas de calor. Este coeficiente indica cuántas veces la energía de alta calidad suministrada a la bomba de calor se multiplica [Santoyo 1996]. Asimismo, es una medida de la efectividad de las bombas de calor como proveedor de energía térmica, con relación al uso directo de una fuente de calor de alto grado para propósitos de calentamiento.

Existen diferentes formas de clasificar las bombas de calor, ya sea por el tipo de energía que consume o por la fuente y el receptor de calor, así como sus procesos físicos, de la siguiente manera [Huicochea 2009]:

1. Bombas de calor convencionales
 - Bomba de calor por compresión mecánica.
 - Bomba de calor por absorción convencional.

2. Bombas de calor por absorción inversa
 - Transformador térmico.

Las bombas de calor convencionales son comúnmente utilizadas como enfriadores y calentadores de agua para aplicaciones de aire acondicionado. Su funcionamiento básico es extraer energía térmica a una temperatura menor del ambiente en caso de enfriamiento o suministrar energía térmica a una temperatura mayor del ambiente en caso de calentamiento en un requerido espacio. En otro caso, se utiliza energía en forma de calor (trabajo) mediante la separación del refrigerante de una segunda sustancia denominada mezcla absorbente en un ciclo químico.

Las bombas de calor por absorción inversa son conocidas como transformadores térmicos. Tienen el mismo principio y configuración básica que las bombas de calor por absorción convencional. La diferencia con las bombas de calor convencionales es la aplicación de calor a un nivel térmico mayor que el nivel térmico del calor suministrado para su funcionamiento. La energía térmica que se entrega puede ser de la misma temperatura a la que se disipa el calor que se recupera de una fuente de energía térmica ya sea natural o industrial.

2.1.1 Bombas de calor por compresión mecánica

Las bombas de calor por compresión mecánica son el tipo de bombas comúnmente más usadas por su alto nivel rendimiento. Los componentes principales que constituyen este tipo de bombas de calor son:

- Compresor
- Válvula de expansión

Junto a los intercambiadores de calor que se usan en este tipo de bombas, los cuales son:

- Condensador
- Evaporador

El proceso termodinámico de una bomba de calor por compresión mecánica puede observarse mediante la figura 2.1 donde está en función de la presión absoluta y la temperatura. La sustancia denominada refrigerante se llega a evaporar mediante el evaporador a una temperatura (T_{EV}) al retirar cierta cantidad de calor Q_{EV} de una fuente externa que puede estar en los tres estados de la materia. Posteriormente, el compresor incrementa la presión y la temperatura del refrigerante y cede una cantidad de calor latente Q_{CO} en el condensador a una temperatura mayor (T_{CO}). El refrigerante condensado se llega a expandir a través de una válvula de expansión y regresa al evaporador completando el ciclo termodinámico.

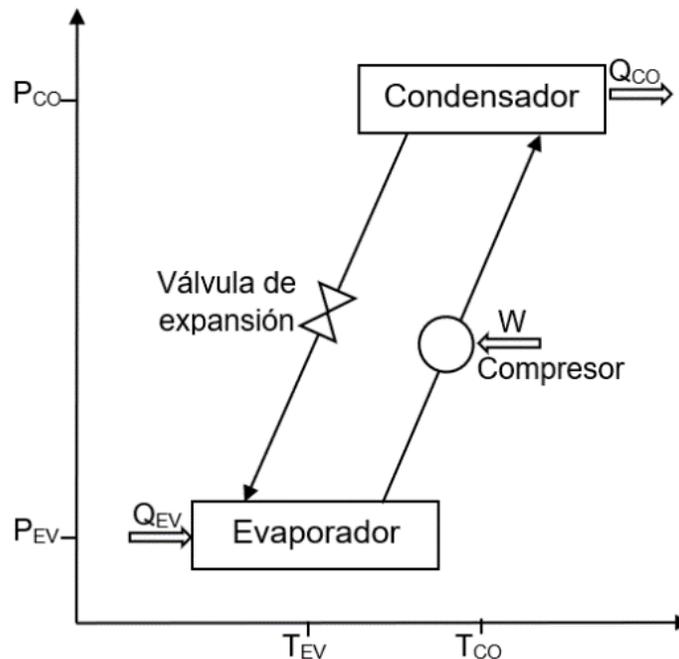


Figura 2.1 Diagrama esquemático Presión – Temperatura de una bomba de calor por compresión mecánica [Torres 2017].

2.1.2 Bombas de calor por absorción convencional

El principio básico de una bomba de calor por absorción convencional conlleva conocer el funcionamiento de la figura 2.2. Se muestran dos corrientes en de diferentes estados, líquido (1) y vapor (2). La corriente de vapor (2) entra en el absorbedor junto con la corriente en fase líquida (1), después el vapor es absorbido en la fase líquida dentro del mismo absorbedor y se llega liberar un calor absorción. El producto de esta absorción se libera en una corriente (3) en fase líquida.

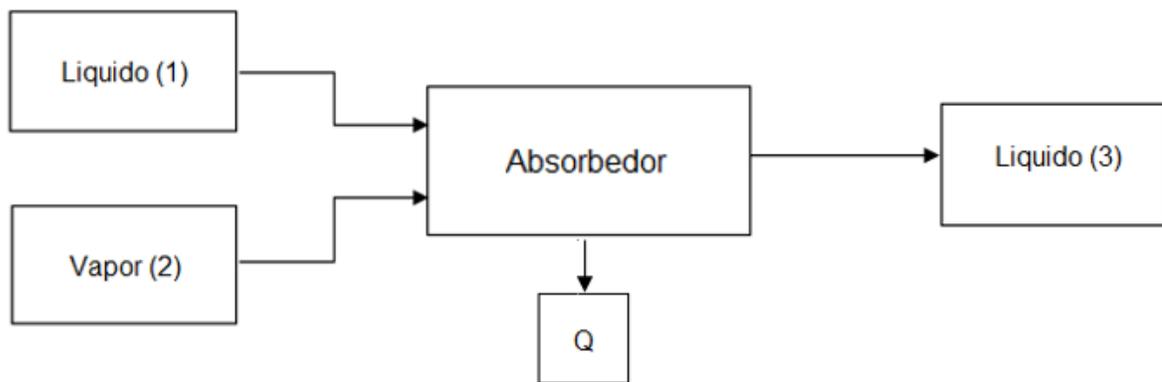


Figura 2.2 Diagrama del proceso de básico de absorción [Torres 2017].

Las bombas de calor por absorción convencional tienen componentes de una bomba de calor por compresión mecánica. El compresor se sustituye por una bomba de tipo magnético. En este caso las bombas de calor por absorción convencional se componen principalmente de los siguientes componentes:

- Válvulas de expansión
- Bombas

Junto a los intercambiadores de calor que se usan en este tipo de bombas, los cuales son:

- Generador y Condensador
- Absorbedor y Evaporador

En la figura 2.3 se muestra el ciclo termodinámico de la bomba de calor por absorción convencional. Se inicia al suministrar energía a una temperatura elevada (T_{GE}) en el generador, mediante la separación de la mezcla absorbente en el refrigerante de la parte absorbente. Se reduce su temperatura en el condensador cediendo energía a una (T_{CO}), cambia a fase líquida y se expande para pasar al evaporador que se encuentra a una menor presión. Allí ocurre un cambio de fase a vapor a una temperatura menor con ayuda de la energía que proviene de una fuente de calor de desecho (T_{EV}). El vapor proveniente del evaporador se conduce al absorbedor, en donde se pone en contacto con una corriente de (refrigerante – parte absorbente) proveniente del generador, produciendo un desprendimiento de calor, a una temperatura T_{AB} (mayor que T_{EV})

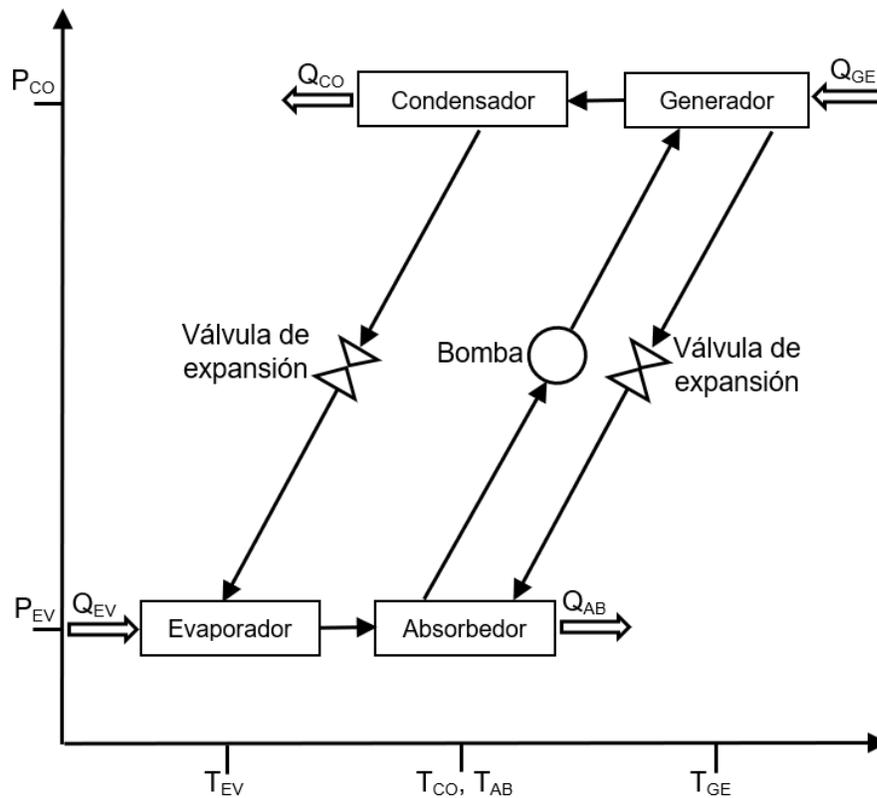


Figura 2.3 Diagrama esquemático Presión – Temperatura de una bomba de calor por absorción convencional [Torres 2017].

En la figura 2.3 se muestran dos niveles de presión dado que se pueden representar de la siguiente manera, [Hernández, 2016]:

$$P_{CO} = P_{GE} > P_{EV} = P_{AB}$$

Y tres niveles de temperatura

$$T_{GE} > T_{CO} \geq T_{AB} > T_{EV}$$

2.1.3 Transformador térmico por absorción

Los transformadores térmicos tienen componentes de una bomba de calor por absorción convencional, difiriendo en la configuración donde se llegan a cambiar los componentes para una mayor eficiencia y se complementan de otros. En este caso los transformadores térmicos se componen principalmente de los siguientes componentes:

- Válvulas de expansión
- Bombas

Junto a los intercambiadores de calor que se usan en este tipo de sistemas térmicos, los cuales son:

- Generador y Condensador
- Absorbedor y Evaporador

El diagrama del transformador térmico se muestra en la figura 2.4, donde inicialmente las cantidades de calor Q_{GE} y Q_{EV} son proporcionadas en el generador y evaporador respectivamente a temperaturas intermedias (T_{GE} , T_{EV}). Esta energía separa el refrigerante de la parte absorbente. La parte absorbente circula hacia el absorbedor y el refrigerante en fase vapor es enviado al condensador.

Se condensa al retirar una cantidad de calor Q_{CO} a una temperatura (T_{CO}) y cambia a fase líquida. El condensado obtenido es enviado al evaporador. Este se encuentra a mayor presión que el generador y el condensador y se evapora al recibir una cantidad de calor Q_{EV} .

El vapor obtenido es enviado al absorbedor y entra en contacto con una corriente (refrigerante – parte absorbente) y con el vapor del refrigerante. Al mezclarse producen una reacción exotérmica y generan un nuevo nivel térmico mayor a una temperatura T_{AB} (mayor que T_{EV}). Este nuevo nivel térmico obtenido es energía útil de alta calidad.

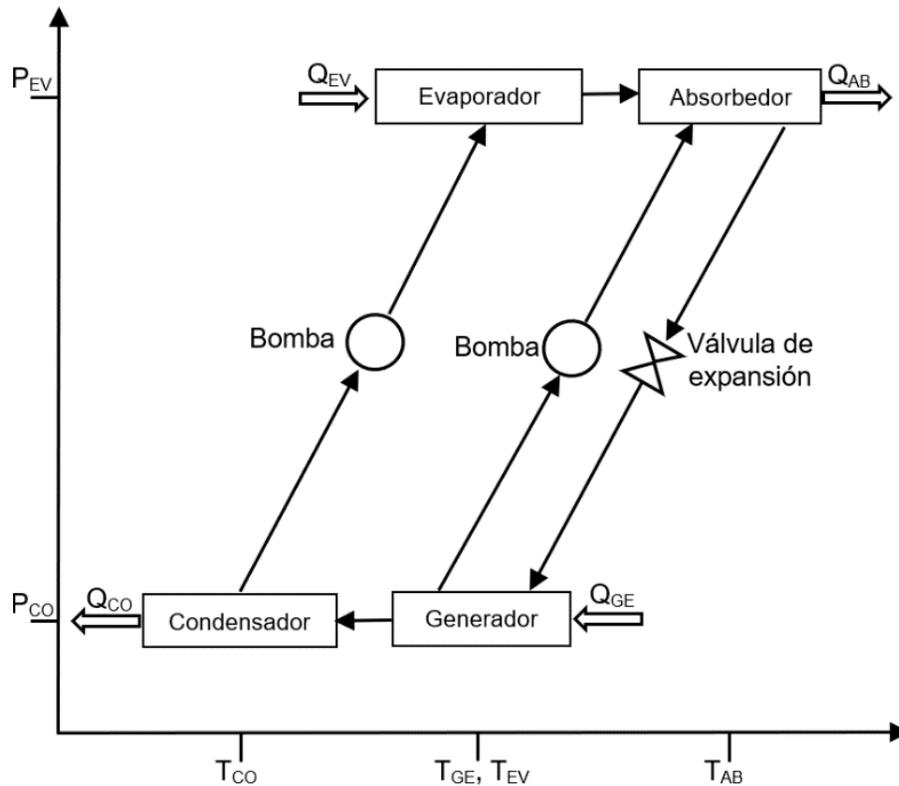


Figura 2.4 Diagrama esquemático Presión – Temperatura de un Transformador térmico [Torres 2017].

2.1.4 Transformador térmico por absorción con economizador

El transformador térmico con un economizador se muestra en la figura 2.5. El intercambiador denominado economizador se encuentra entre el generador y absorbedor. Es un intercambiador de calor que tiene como función precalentar la solución concentrada de absorbente que proviene del generador hacia el absorbedor utilizando parte de la energía que aun contiene la solución proveniente del absorbedor. El intercambiador de calor incrementa la eficiencia del ciclo dependiendo de su efectividad.

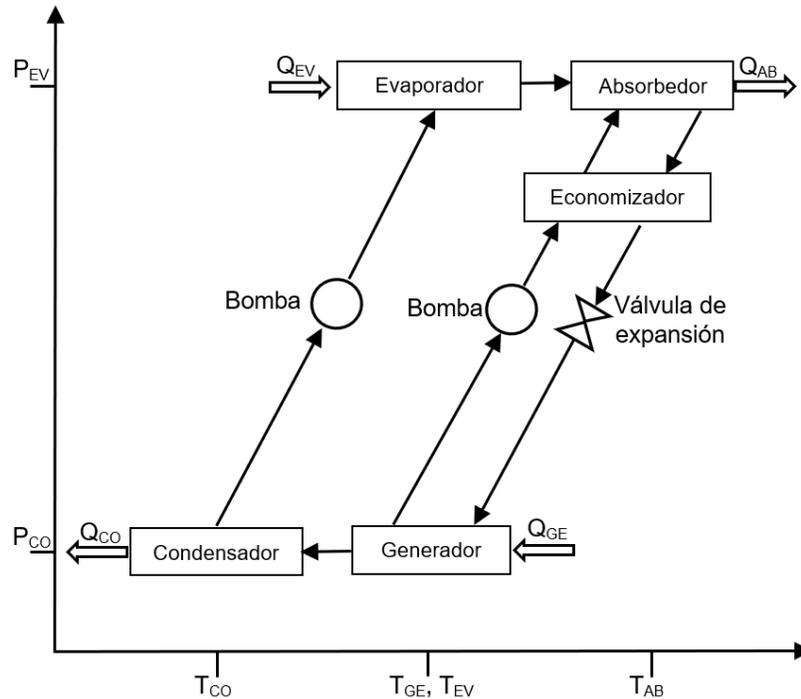


Figura 2.5 Diagrama esquemático Presión – Temperatura de un transformador térmico con economizador [Torres 2017].

El parámetro más importante en un transformador de calor es el COP, el cual representa su eficiencia. Se define como el calor proporcionado por el absorbedor Q_{AB} entre la cantidad total de calor suministrado al generador y evaporador ($Q_{GE} + Q_{EV}$). Entre mayor sea el COP, mayor será el destilado [Hernández 2016].

$$(\text{COP}) = \frac{Q_{AB}}{(Q_{GE} + Q_{EV})} \quad 2.1$$

2.2 Clasificación de la mezcla absorbente

Las bombas de calor convencionales y absorción inversa realizan su proceso mediante una mezcla absorbente que está constituido de un refrigerante y una parte absorbente. Estos deben cumplir las siguientes características termodinámicas, químicas y de transporte para desempeñar el ciclo termodinámico:

1. Características del refrigerante

Presión de vapor: El refrigerante debe alcanzar una presión dentro de los límites fijados a una temperatura de condensación determinada. Si presenta presiones muy bajas, por consecuencia las bombas presentan problemas para desplazar la mezcla absorbente de cavitación o infiltraciones de aire al sistema. En otro caso, si las presiones son muy altas, son requeridos equipos de alta resistencia y de un costo muy elevado.

Calor latente: El calor latente de vaporización debe de ser alto para poder operar flujos máscicos pequeños y que los flujos máscicos por unidad de calor absorbido en el evaporador aumenten provocando que los equipos tengan un menor tamaño y que su costo no sea elevado.

Punto crítico: El punto crítico debe de estar por arriba de cualquier temperatura de operación con tal de no tener ningún cambio de fase que no esté dentro de lo previsto.

Punto de congelación: El punto de congelación debe de ser menor a las condiciones de operación y temperatura ambiente, dado que si la mezcla absorbente se congela puede dañar el sistema y es necesario evitar daños en los componentes por dilatación del fluido.

2. Características de la parte absorbente

Presión de vapor y presión de ebullición: La presión de vapor, tanto como la presión ebullición, deben ser baja a la temperatura de generación para evitar que la parte absorbente se evapore y evitar la contaminación en el condensador. Cabe mencionar que la presión de vapor de la parte absorbente debe de ser menor que la del refrigerante en la temperatura que se encuentra el absorbedor.

Absorción: La parte absorbente debe tener una presión de vapor menor que el refrigerante a la temperatura del absorbedor para que el vapor se absorba [Huicochea 2009].

Solubilidad: La parte absorbente debe tener un amplio rango de concentración para poder operar en el sistema. El rango debe estar en el intervalo de las condiciones de operación tanto del generador como en el absorbedor para evitar cristalización en las tuberías del circuito del absorbente.

Propiedades de transporte:

- Una viscosidad baja para tener una transferencia de calor y masa eficiente.

- Si la tensión superficial junto con la viscosidad son bastantes bajas, pueden evitar la formación de gotas de la mezcla absorbente durante la etapa de la condensación. Esto ocasiona que disminuya la transferencia de calor.

- La conductividad térmica debe de ser alta para incrementar la transferencia de calor compensando la disminución provocada por la tensión superficial y la viscosidad.

Propiedades químicas:

- La parte absorbente no debe de ser inflamable

- No debe de ser tóxica

- No debe de tener alta reacción explosiva

- No tiene que ser corrosiva

2.2.1 Fluido de trabajo de las bombas de calor convencionales

El fluido de trabajo para las bombas de calor convencionales, se dividen en dos tipos: refrigerante para compresión mecánica de vapor y mezcla absorbente para absorción convencional.

1. Las bombas de calor por compresión mecánica de vapor no usan una mezcla absorbente, pues se utilizan refrigerantes. Estos compuestos son cloro-fluoro-carbonos, fluoro-carbonos y compuestos orgánicos. En la tabla 2.1 se muestran los más utilizados dado que no son agresivos con la capa superior de ozono.

Tabla 2.1 Fluidos de trabajo para las bombas de calor por compresión mecánica [Huicochea 2009].

Cloro - fluoro - carbonos	Fluoro - carbonos	Compuestos orgánicos
R-22 (CHFCI)	R-134 ^a (CF ₃ -CFH ₂)	NH ₃
R-124 (CHCIF-CF ₃)	R-32 (CH ₂ F ₂)	C ₃ H ₈
R-123 (CF ₃ -CHCl ₂)	R-125 (CF ₃ -CHF ₂)	CO ₂
R-141b (CH ₂ -CCl ₂ F)	R-143 ^a (CHF ₂ -CH ₂ F)	

2. La mezcla absorbente para las bombas de calor por absorción convencional necesitan dos sustancias químicamente semejantes. La parte absorbente que está constituido por uno o más componentes. El refrigerante circula en el generador, condensador, evaporador y absorbedor donde se incorpora a la parte absorbente. La mezcla absorbente circula en el generador hacia el economizador, después al absorbedor y regresa hacia el generador pasando por el economizador.

Se realiza un análisis de las ventajas y desventajas de operación de cada mezcla absorbente que se usa en las bombas de calor por absorción convencional. Se muestra esta comparación en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Mezcla absorbente para las bombas de calor por absorción convencional.

Mezcla absorbente	Parte absorbente	Refrigerante	Ventajas de operación	Desventajas de operación
Bromuro de litio - Agua (LiBr - H ₂ O)	Bromuro de litio (LiBr)	Agua (H ₂ O)	<ul style="list-style-type: none"> - El calor latente del refrigerante es alto. - El refrigerante tiene un punto crítico alto para trabajar a altas temperaturas [Huicochea 2009] - El absorbente tiene un alto punto de ebullición y una presión de vapor despreciable [Huicochea 2009] 	<ul style="list-style-type: none"> - La corrosividad a altas temperaturas, la cual ha limitado el uso de metales con conductividades altas [Torres 2017]. - La solubilidad del LiBr en agua, que está limitada a 70% en peso, por lo que a concentraciones mayores existe cristalización [Torres 2017]. - El agua presenta cristalización a 0°C [Huicochea 2009].
Amoniaco - Agua (NH ₃ - H ₂ O)	Amoniaco (NH ₃)	Agua (H ₂ O)	<ul style="list-style-type: none"> -La solución tiene alto calor de vaporización, bajo costo, alta disponibilidad y químicamente estable a temperaturas menores a 180°C [Huicochea 2009] 	<ul style="list-style-type: none"> -El amoniaco es tóxico y corrosivo con el cobre, sus presiones y temperaturas de operación son grandes afectando los costos de fabricación, [Huicochea 2009].

2.2.2 Mezcla absorbente de los transformadores térmicos por absorción inversa

La mezcla absorbente de un transformador térmico requiere una parte absorbente y un refrigerante que cumpla con las características anteriores. La tabla 2.3 muestra la comparación de las mezclas absorbentes que se utilizaron.

Tabla 2.3 Mezcla absorbente para los transformadores térmicos.

Mezcla absorbente	Parte absorbente	Refrigerante	Ventajas de operación	Desventajas de operación
Carrol - agua (LiBr - C ₂ H ₆ O ₂ - H ₂ O)	Carrol (LiBr - C ₂ H ₆ O ₂)	Agua (H ₂ O)	<ul style="list-style-type: none"> - El bromuro de litio - etilenglicol tiene un rango más alto para mayores gradientes de temperatura. - Los coeficientes de operación son eficientes que en otros fluidos de trabajo. 	<ul style="list-style-type: none"> - La presencia de oxígeno convierte al bromuro de litio acuoso en un fluido altamente agresivo para muchos metales [Huicochea, 2009]. - Es más difícil alcanzar un estado estable. Y requiere mayor tiempo de calentamiento.
Bromuro de litio - Nitrato de litio - Ioduro de litio -Cloruro de litio - Agua (LiBr - LiNO ₃ - Lil - LiCl - H ₂ O)	Bromuro de litio - Nitrato de litio - Ioduro de litio -Cloruro de litio (LiBr - LiNO ₃ - Lil - LiCl)	Agua (H ₂ O)	<ul style="list-style-type: none"> - Tiene un alta potencial para ser utilizada en los diseños óptimos de equipos de absorción por sus propiedades termo físicas [Koo and Lee, 1999]. - Presenta mejor solubilidad y es menos corrosivo a los metales que el LiBr - agua [Borouis 2004]. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere mucho más tiempo iniciar el proceso y alarga el tiempo del proceso para cumplir su objetivo.

2.3 Caídas de presión en tuberías del circuito de la mezcla absorbente

Si un fluido incomprensible fluye a través de un tubo de longitud considerable, con accesorios como codos, válvulas y reducciones, entonces este presenta fricción, donde existe una pérdida de energía o pérdida de altura. Las caídas de presión de cada mezcla absorbente se pueden determinar mediante estas pérdidas de energía recordando que g es la aceleración de la gravedad que es igual a 9.81 m/s^2 . En el apéndice M se muestra la ecuación general de energía para obtener la siguiente ecuación:

$$\Delta p = (h_{L \text{ totales}} + Z_2)\rho g \quad 2.2$$

Las pérdidas de energía totales ($h_{L \text{ totales}}$), es la sumatoria de las pérdidas de energía por fricción a lo largo de la tubería ($h_{L \text{ friccion}}$) más las pérdidas de energía por accesorios ($h_{L \text{ accesorios}}$):

$$h_{L \text{ totales}} = h_{L \text{ friccion}} + h_{L \text{ accesorios}} \quad 2.3$$

La pérdida de energía debido a la fricción del fluido con las paredes del ducto por donde fluye se expresa mediante la ecuación siguiente, conocida como ecuación de Darcy [Mott 2013]:

$$h_{L \text{ friccion}} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad 2.4$$

El factor de fricción (f) se calcula dependiendo del régimen de flujo, el cual se obtiene a partir del número de Reynolds, en un ducto circular:

$$R_e = \frac{\rho v D}{\mu} \quad 2.5$$

Para el factor de fricción (f) en régimen laminar se tiene:

$$f = \frac{64}{Re} \quad 2.6$$

Para las pérdidas de altura debido a los accesorios, la ecuación de Darcy se expresa de la siguiente manera:

$$h_{L \text{ accesorios}} = f_t \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad 2.7$$

Para el factor de fricción (f_t) se determina mediante tablas de datos de tuberías comerciales junto con la longitud equivalente en diámetros de tuberías $\frac{L}{D}$. Las tablas para determinar estas dos variables se presentan en el apéndice N.

2.3.1 Propiedades de las mezclas absorbentes (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) Y (LiBr+H₂O)

Las propiedades de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) en tramos de tubería del generador al absorbedor y del absorbedor al generador, se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Propiedades de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O).

Dirección de la mezcla absorbente		T (°C)	X (%)	ρ (kg/m ³)	μ (Pa*s)	v (m/s)
Generador al Absorbedor	Antes del economizador	80.98	63	1662.56	0.003	0.2609
	Después del economizador	88.024	63	1655.0	0.0029	0.2609
Absorbedor al Generador	Antes del economizador	98.437	61	1615.86	0.0023	0.2609
	Después del economizador	80.59	61	1630.12	0.003	0.2609

Las propiedades de la mezcla absorbente ($\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O}$) en la recirculación del generador y el absorbedor, se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Propiedades de la mezcla absorbente ($\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O}$) en recirculaciones.

Equipo	T(°C)	X (%)	ρ (kg/m^3)	μ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	v (m/s)
Generador	80.98	63	1662.56	0.003	0.2609
Absorbedor	98.437	61	1615.86	0.0023	0.2609

Para las propiedades de la mezcla absorbente ($\text{LiBr}+\text{H}_2\text{O}$) en tramos de tubería del generador al absorbedor y del absorbedor al generador, se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Propiedades de la mezcla absorbente ($\text{LiBr}+\text{H}_2\text{O}$).

Dirección de la mezcla absorbente		T (°C)	X (%)	ρ (kg/m^3)	μ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	v (m/s)
Generador al Absorbedor	Antes del economizador	81.5	54.2	1572.33	0.0018	0.2609
	Después del economizador	92.2	54.2	1565.75	0.0016	0.2609
Absorbedor al Generador	Antes del economizador	100.8	52.2	1526.1	0.0012	0.2609
	Después del economizador	96.0	52.2	1529.12	0.0013	0.2609

Las propiedades de la mezcla absorbente (LiBr+ H₂O) en la recirculación del generador y el absorbedor, se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.7 Propiedades de la mezcla absorbente (LiBr+ H₂O) en recirculaciones.

Equipo	T(°C)	X (%)	ρ (kg/m ³)	μ (Pa*s)	v (m/s)
Generador	81.5	54.2	1572.33	0.0018	0.2609
<i>Absorbedor</i>	100.8	52.2	1526.11	0.0012	0.2609

CAPÍTULO 3

DISEÑO DEL TRANSFORMADOR TERMICO POR ABSORCIÓN PARA PURIFICACIÓN DE AGUA

Introducción

En este capítulo se describen los componentes que constituyen al transformador térmico junto con el sistema de purificación de agua, tales como: circuito principal, circuitos de enfriamiento y calentamiento, instrumentación y equipos auxiliares, cómo están constituidos, la función de cada uno de ellos y sus características.

3.1 Transformador de térmico por absorción para purificación de agua

El equipo es un Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de Agua ubicado en las instalaciones del Centro de investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp) de la UAEM, en el Laboratorio de Térmica Aplicada III.

El TTAPPA está hecho de acero inoxidable 316L y acero inoxidable 304L, con las dimensiones de 1.1 m de largo, 0.7 m de ancho y 1.2 m alto. Tiene una capacidad de diseño de 700 W. La fabricación del equipo TTAPPA se diseñó para demostrar la viabilidad de utilizar calor de desecho para purificar agua y evaluarlo a diferentes condiciones de operación.

La distribución de los componentes implicados, tanto como los circuitos que intervienen en el funcionamiento se muestran en la figura 3.1. La distribución de los termopares deriva de cada persona que realizan pruebas en el equipo, dependiendo del objetivo y, también cómo se distribuyen y reconocen las bombas de cada circuito. En el apéndice E se muestran las tablas de la ubicación de los termopares.

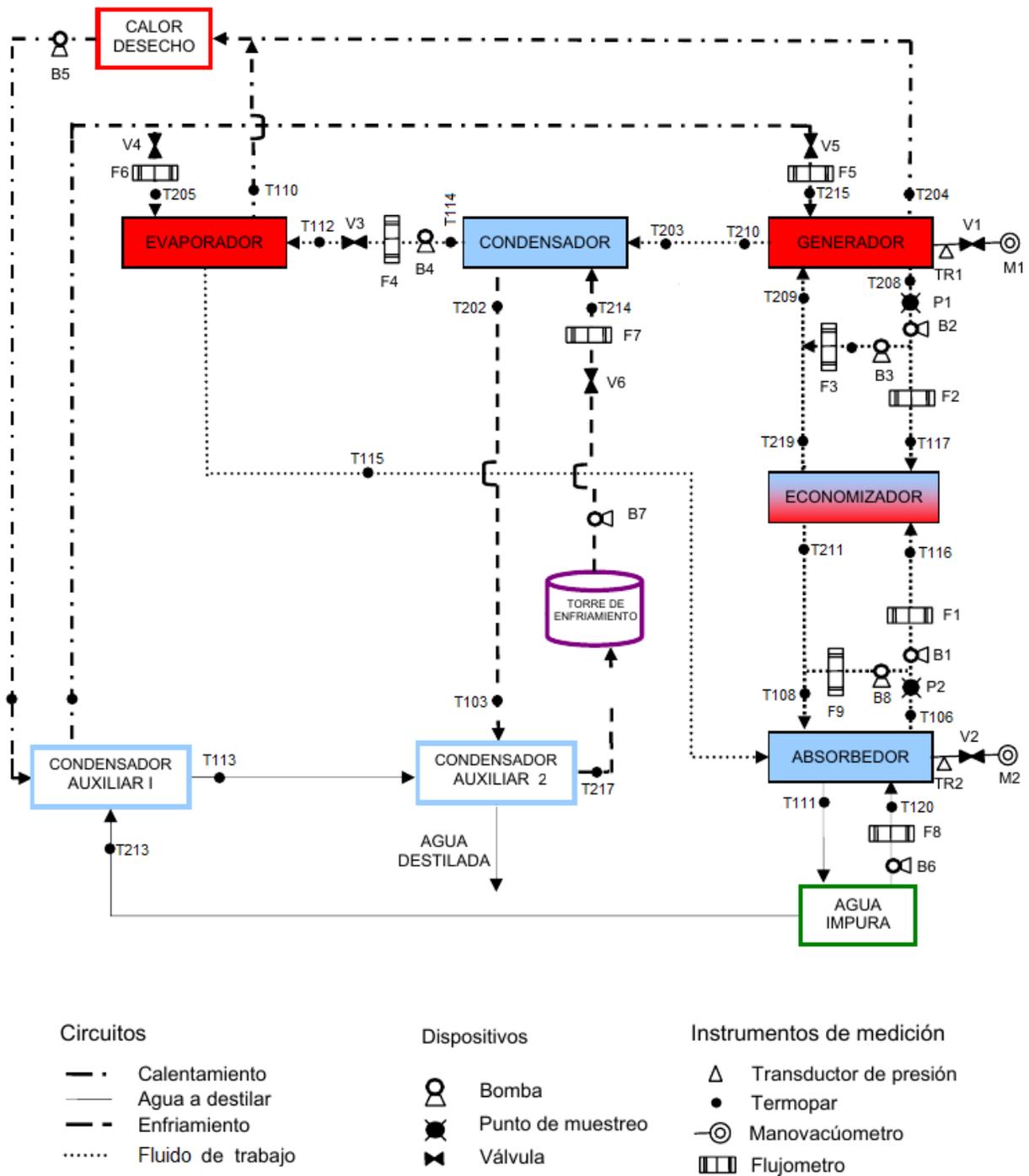


Figura 3.1 Diagrama esquemático del Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de Agua [Huicochea 2009].

El equipo está diseñado considerando ciertas características que sean fáciles de manejar, como las siguientes:

1. Está fabricado de acero inoxidable con el fin de evitar y disminuir la corrosión generada por las mezclas absorbentes.
2. Cuenta con diferentes configuraciones donde se cambian los componentes principales para una mejor optimización.
3. Opera con diferentes mezclas absorbentes.
4. Es móvil y compacto para transportarlo con facilidad.
5. Está diseñado para operar mediante el vacío.

3.2 Circuitos del transformador térmico por absorción para purificación de agua

El equipo está estructurado de diferentes circuitos donde trabajan en conjunto. Cada circuito cuenta con diferentes componentes donde se han hecho modificaciones para mejorar su desempeño mediante un amplio análisis.

3.2.1 Circuito de la mezcla absorbente

El circuito de la mezcla absorbente se caracteriza por tener el generador, absorbedor, condensador, evaporador y economizador. Estos componentes realizan la mayor parte del objetivo del equipo TTAPPA.

❖ Generador

El generador se usa para evaporar la parte del refrigerante (agua) de la mezcla absorbente ($\text{LiBr} + \text{LiI} + \text{LiNO}_3 + \text{LiCl} + \text{H}_2\text{O}$) aumentando la concentración. Esto solo sucede mediante condiciones específicas de concentración, temperatura y presión absoluta.

El cuerpo principal tiene un diámetro de 0.152 m con una longitud de 0.656 m y posee dos tapas con un diámetro de 0.270 m. Cada tapa tiene 12 tornillos con un ángulo de separación de 30°. La tapa frontal posee dos coples con un diámetro de 0.0127 m para circular el fluido de calentamiento.

El interior del generador está constituido por tubos alineados los cuales son bañados mediante un distribuidor para absorber el calor. La mezcla absorbente con menor concentración proviene del absorbedor. Por los tubos del generador fluye agua de calentamiento. Al calentarse la mezcla absorbente libera vapor que va al condensador y la mezcla absorbente concentrada regresa al absorbedor. Las características del diseño interno del generador se observan en la tabla 3.1. Su diseño se esquematiza en la figura en la figura 3.2.

Tabla 3.1 Características del generador.

Diseño interno	
Arreglo	Hexagonal
Capacidad de diseño	2.7 kW
Configuración	Corriente cruzada de 2 pasos
Distribuidor	6 hileras de tubos, horizontal
Diámetro de tubos	0.0095 m
Diámetro de la brida	1.2m
Diámetro de coples	0.00635 m
Espacio entre tubos	0.009m
Longitud de tubos	0.600 m
Material	Acero inoxidable 316L
Número de tubos	33
Tubos por fila	5,6,7,6,5,4

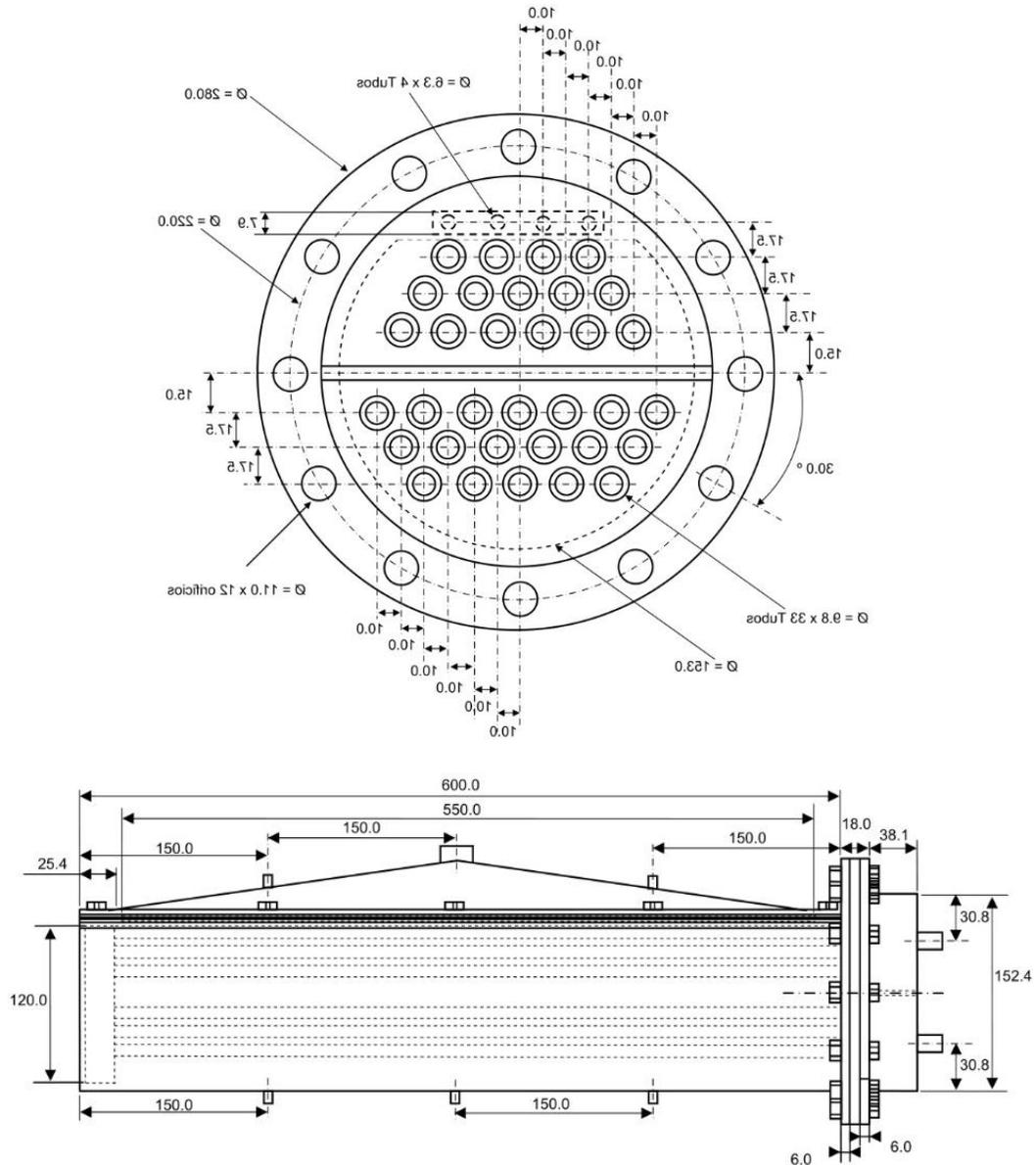


Figura 3.2 Vista frontal del haz de tubos y vista lateral del generador [Huicochea 2009].

❖ **Absorbedor**

El absorbedor libera el calor útil a un nivel térmico mayor que el suministrado. Esto sucede mediante una reacción exotérmica entre el vapor del refrigerante que viene del evaporador al absorberse con la mezcla absorbente concentrada que proviene del generador.

El cuerpo del absorbedor tiene un diámetro 0.102 m y una longitud de 0.400 m. Tiene dos tapones bridados en los extremos con diámetro de 0.270 m, y un banco de tubos horizontales.

El absorbedor tiene un diseño externo el cual hace pasar agua del sistema de purificación dentro de los tubos. La parte que se evapora se dirige al condensador auxiliar 1 y la otra parte regresa al recipiente separador.

En el interior del absorbedor los tubos son bañados mediante un distribuidor por un contacto película descendente. La mezcla absorbente que viene del generador se mezcla con el vapor que proviene del evaporador y se genera un calor útil para calentar los tubos. Dentro de los tubos fluye agua salobre que al calentarse se evapora parcialmente. Las características del diseño interno del absorbedor se muestran en la tabla 3.2. Su diseño se esquematiza en la figura 3.3.

Notar que la capacidad de este equipo es inferior a la capacidad del generador, con el objetivo de que esta unidad sea la limitante en el circuito de absorción y así analizar cualquier mejora en el absorbedor.

Tabla 3.2 Características del absorbedor.

Diseño interno	
Capacidad de diseño	0.8 kW
Configuración	Corriente cruzada de 4 pasos
Distribuidor	6 hileras de tubos, horizontal
Diámetro de tubos	0.0095 m
Diámetro de la brida	1.2m
Diámetro de coples	0.00635 m
Espacio entre tubos	0.009m
Longitud de tubos	0.400 m
Material	Acero inoxidable 316L
Número de tubos	16
Tubos por fila	3,4,4,3

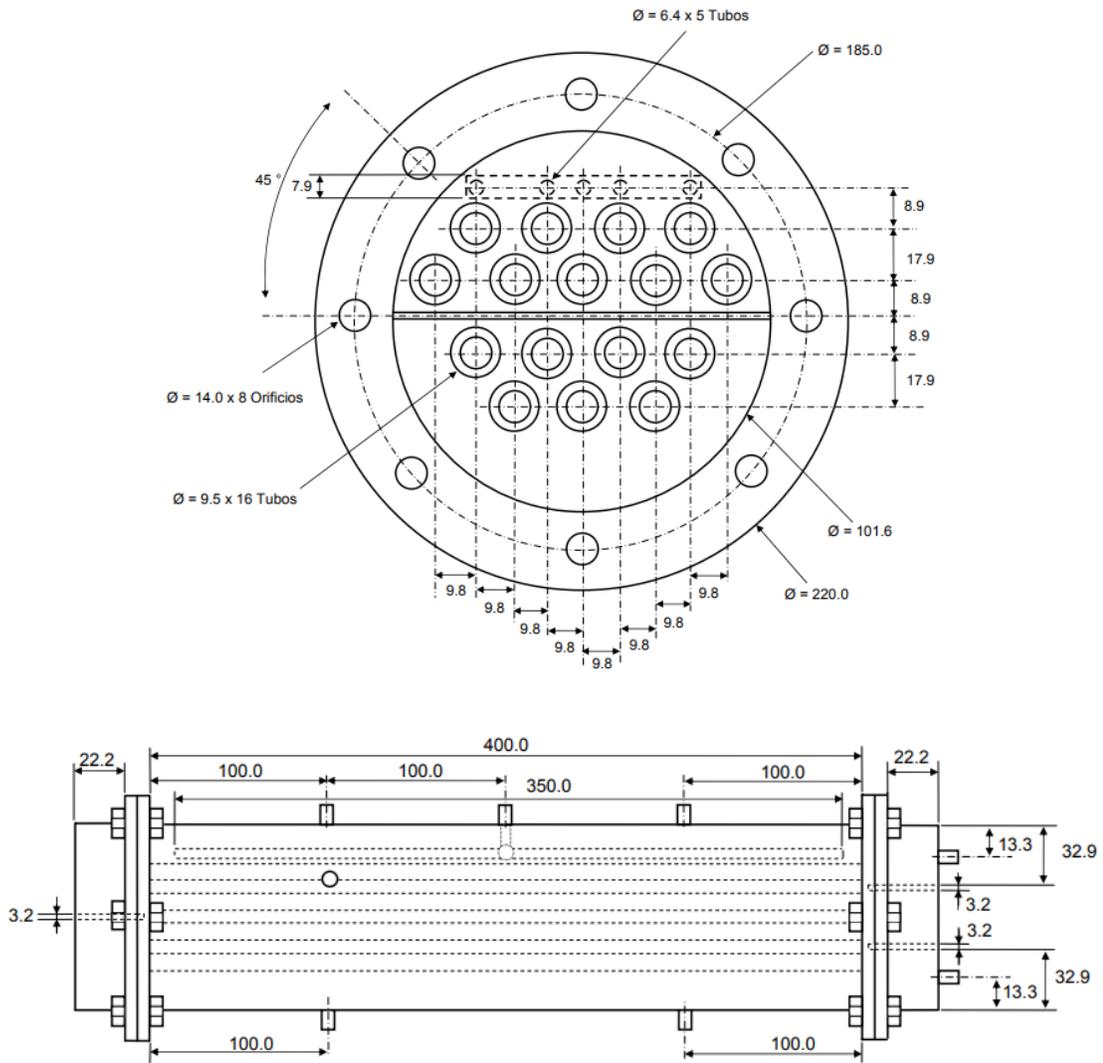


Figura 3.3 Vista frontal del haz de tubos y vista lateral del absorbedor [Huicochea 2009].

3.2.2 Dimensiones de las tuberías y accesorios donde circula la mezcla absorbente

Las dimensiones que conforman los tramos de tubería donde circula la mezcla absorbente que van del generador al absorbedor, se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Dimensiones de los tramos de tubería del generador al absorbedor.

Dirección de la mezcla absorbente		L (m)	D (m)	Z ₂ (m)
Generador al Absorbedor	Antes del economizador	2.04	0.00924	0.41
	Después del economizador	1.44	0.00924	0.53

Las dimensiones que conforman los tramos de tubería donde circula que van del absorbedor al generador, se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Dimensiones de los tramos de tubería del absorbedor al generador.

Dirección de la mezcla absorbente		L (m)	D (m)	Z ₂ (m)
Absorbedor al Generador	Antes del economizador	1.97	0.00924	0.53
		0.67	0.01092	0.41
	Después del economizador	0.92	0.00924	0.86

Las dimensiones que conforman los tramos de tubería donde recircula la mezcla absorbente del generador y absorbedor, se muestran en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Dimensiones de tubería de las recirculaciones del generador y absorbedor.

Equipo	L (m)	D (m)	Z ₂ (m)
Generador	1.17	0.01092	1.13
Absorbedor	1.68	0.01092	1.1

Los accesorios que conforman los tramos de la tubería del circuito de la mezcla absorbente se muestran en la tabla 3.6.

Tabla 3.6 Accesorios de los tramos de tubería del circuito de la mezcla absorbente.

Accesorios		
Dirección de la mezcla absorbente	Numero de codos de 90°	Válvula tipo bola
Generador al Absorbedor	7	1
Absorbedor al Generador	6	1

Los accesorios que conforman los tramos de la tubería de las recirculaciones del generador y absorbedor se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7 Accesorios de las recirculaciones del generador y absorbedor.

Accesorios		
Equipo	Numero de codos de 90°	Válvula tipo bola
Recirculación del generador	5	2
Recirculación del absorbedor	4	2

❖ Condensador

El condensador cambia la fase de vapor a líquido del refrigerante que proviene del generador. Esto sucede mediante un circuito de enfriamiento donde se hace pasar agua a una menor temperatura que proviene de la torre de enfriamiento para retirar cierta parte de calor del refrigerante que posteriormente se envía al evaporador. Las características del diseño del condensador se muestran en la tabla 3.8 y el diseño se esquematiza en la figura 3.4.

Tabla 3.8 Características del condensador.

Capacidad de diseño	1.4 kW
Configuración	Tubos concéntricos
Diámetro de tubo central	0.0095 m
Diámetro de tubo exterior	0.0190 m
Longitud de tubos	3 m
Material	Acero inoxidable 316L
Número de vueltas	5

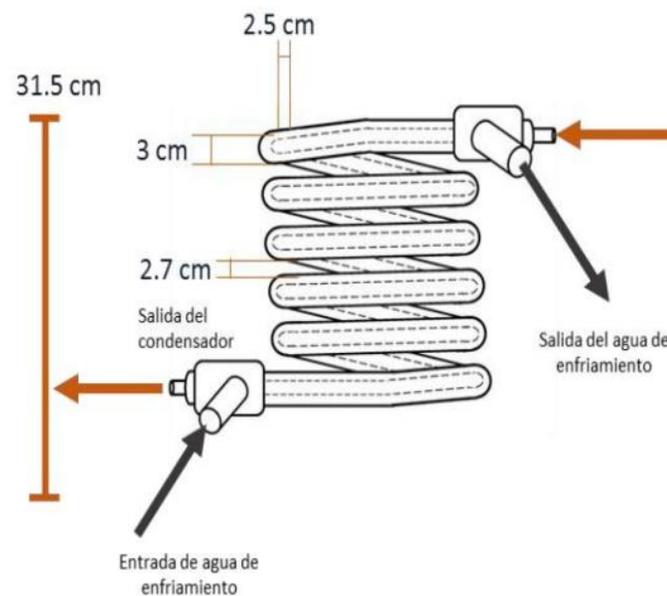


Figura 3.4 Diseño del condensador [Torres 2017].

❖ Evaporador

El evaporador cambia la fase de líquido a vapor saturado del refrigerante. Esto sucede cuando se hace pasar calor del circuito de calentamiento. El evaporador es un intercambiador de calor y está constituido por dos tubos concéntricos de forma helicoidal. El refrigerante entra en estado líquido por la parte inferior en el tubo interno. La entrada del agua de calentamiento es por la parte superior en el tubo externo. Las características del diseño del evaporador se muestran en la tabla 3.9. Su diseño se esquematiza en la figura 3.5

Tabla 3.9 Características del evaporador.

Capacidad de diseño	4.4 kW
Configuración	Tubos concéntricos
Diámetro de tubo central	0.0095 m
Diámetro de tubo exterior	0.0190 m
Longitud de tubos	2.8 m
Material	Acero inoxidable 316L
Número de vueltas	4

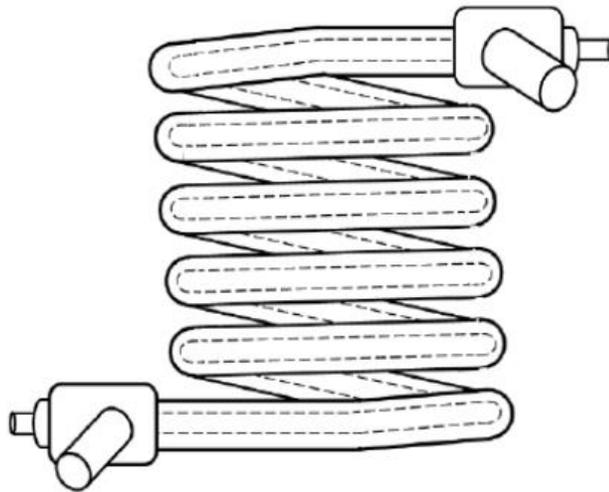


Figura 3.5 Diseño del evaporador [Torres 2017].

❖ Economizador

El economizador incrementa la eficiencia del transformador térmico, elevando la temperatura de la mezcla absorbente que viene del generador la cual tiene una mayor concentración, pero menor temperatura. Esto sucede en el lado tubos donde sale a contracorriente y se dirige desde el generador hacia el absorbedor. En el lado ánulo pasa la mezcla absorbente que tiene menor concentración, pero mayor temperatura. Esta cede calor para aumentar la temperatura de la mezcla absorbente que tiene mayor concentración. La corriente va desde del absorbedor hacia el generador. Las características del diseño del economizador se muestran en la tabla 3.10 y el diseño se esquematiza en la figura 3.6.

Tabla 3.10 Características del economizador.

Capacidad de diseño	4.4 kW
Configuración	Tubos concéntricos
Diámetro de tubo central	0.0095 m
Diámetro de tubo exterior	0.0190 m
Longitud de tubos	2.8 m
Material	Acero inoxidable 316L
Número de vueltas	4

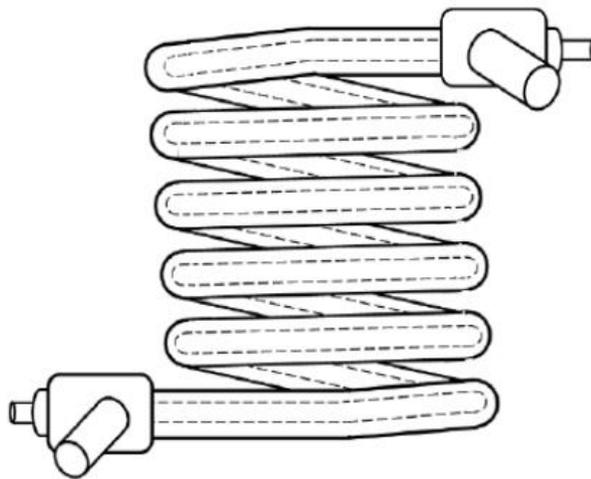


Figura 3.6 Diseño del economizador [Torres 2017].

3.2.2 Circuito de calentamiento

El circuito de calentamiento representa el suministro de calor mediante un depósito de calentamiento donde pasa por el generador y evaporador. El calor se suministra mediante dos resistencias eléctricas que están conectadas a un depósito de acero inoxidable. Las características del diseño del depósito de calentamiento se muestran en la tabla 3.11 y el diseño se esquematiza en la figura 3.7.

Tabla 3.11 Características del depósito de calentamiento.

Dimensiones	0.125 x 0.150 x 0.375 m
Diámetro de la entrada de resistencias	0.0126 m
Material	Acero inoxidable 316L
Volumen	0.07 m ³

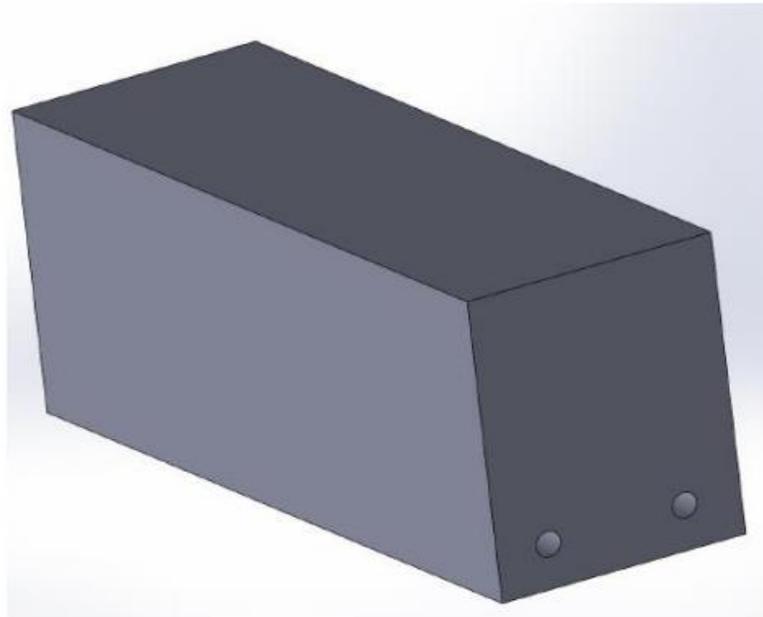


Figura 3.7 Diseño del depósito de calentamiento [Torres 2017].

3.2.3 Circuito de enfriamiento

El circuito de enfriamiento retira el calor del vapor del refrigerante haciendo que cambie a fase líquida. Este circuito pasa por el condensador y el condensador auxiliar 1 el cual condensa el agua. El componente encargado de este circuito es la torre de enfriamiento, la cual contiene agua a baja temperatura de 10 a 25 °C. Las características de la torre de enfriamiento se muestran en la tabla 3.12 y en la figura 3.8 se muestra la torre de enfriamiento.

Tabla 3.12 Características del depósito de la torre de enfriamiento.

Altura	2.66 m
Capacidad	20 kW
Dimensiones del contenedor	0.72 x 1.05 m
Modelo	ESI-2-3-1.0
Temperatura suministrada	10 a 25 °C



Figura 3.8 Torre de enfriamiento.

3.2.4 Circuito de agua a destilar

El circuito de agua a destilar recupera el calor liberado en el absorbedor para posteriormente purificar agua mediante tres componentes, el tanque separador, el condensador auxiliar 1 y el condensador auxiliar 2. En este circuito interviene el circuito de enfriamiento.

❖ Tanque separador

El tanque separador bombea agua a purificar hacia el absorbedor en donde se retira calor para después formar una mezcla líquido – vapor. Por diferencia de densidades el vapor sale por la parte superior del tanque, mientras el agua en estado líquido regresa al absorbedor. Las características del diseño del tanque separador se muestran en la tabla 3.13 y el diseño se esquematiza en la figura 3.9.

Tabla 3.13 Características del depósito del tanque separador.

Altura	0.25 m
Coples	5
Diámetro de coples	0.0064
Diámetro del componente	0.17 m
Material	Acero inoxidable 316L
Volumen	0.01 m ³



Figura 3.9 Esquema del tanque separador [Torres 2017].

❖ Condensador auxiliar 1

El condensador auxiliar 1 retira calor, al mismo tiempo que sucede un cambio de fase vapor a líquido del agua destilada que proviene del tanque separador. Las características del diseño del condensador auxiliar 1 se muestran en la tabla 3.14 y el diseño se esquematiza en la figura 3.10.

Tabla 3.14 Características del condensador auxiliar 1.

Capacidad de diseño	2.4 kW
Configuración	Tubos concéntricos
Diámetro de tubo central	0.0095 m
Diámetro de tubo exterior	0.0190 m
Longitud de tubos	2.8 m
Material	Acero inoxidable 316L
Número de vueltas	4

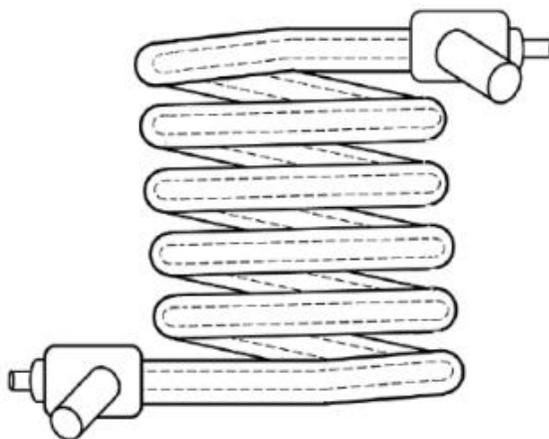


Figura 3.10 Diseño del condensador auxiliar 1 [Torres 2017].

❖ Condensador auxiliar 2

El condensador auxiliar 2 disminuye la temperatura del agua destilada que proviene del condensador auxiliar 1. Se constituye de dos tubos concéntricos de forma lineal. Su configuración está dada en contracorriente y las características del diseño del condensador auxiliar 2 se muestran en la tabla 3.15 y el diseño se esquematiza en la figura 3.11.

Tabla 3.15 Características del condensador auxiliar 2.

Capacidad de diseño	2.4 kW
Configuración	Tubos concéntricos
Diámetro de tubo central	0.0095 m
Diámetro de tubo exterior	0.0190 m
Longitud de tubos	2.8 m
Material	Acero inoxidable 316L
Número de vueltas	4

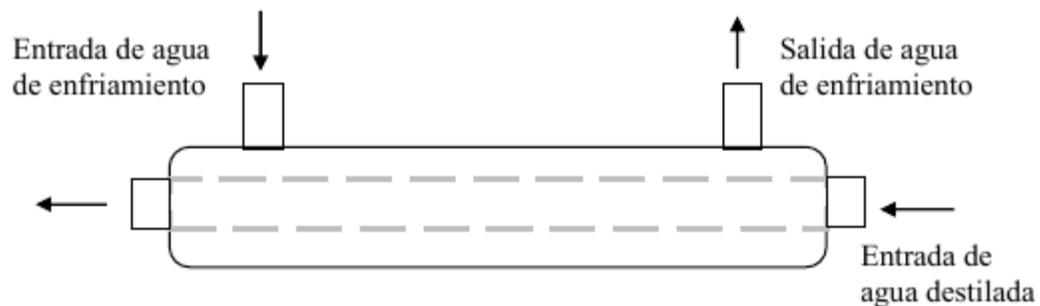


Figura 3.11 Diseño del condensador auxiliar 2 [Torres 2017].

3.3 Instrumentación

Los instrumentos de medición son fundamentales para el equipo TTAPPA, para evaluar el desempeño tanto como para controlar las variables que intervienen en el proceso. Enseguida se indican los instrumentos de medición para cada variable que interviene en el sistema, como flujo masico, presión y temperatura.

3.3.1 Flujo másico

El flujo másico se cuantifica a partir del caudal volumétrico, el cual se mide mediante flujómetros con características y diseño que se adapten al equipo TTAPPA, los flujómetros de la mezcla absorbente, circuito de calentamiento, circuito de enfriamiento, recirculación y el circuito de purificación.

❖ Flujómetros de la mezcla absorbente

El circuito de la mezcla absorbente cuenta con dos flujómetros. Se ubican entre el absorbedor y generador. Las características de los flujómetros de la mezcla absorbente se muestran en la tabla 3.16 y en la figura 3.12 se muestran los flujómetros de la mezcla absorbente.

Tabla 3.16 Características de los flujómetros de la mezcla absorbente.

Coraza	Acero inoxidable 316L
Exactitud	±2% escala completa
Flujo volumétrico	7 a 150 ml/min
Presión máxima	200 psi
Sellos	De viton
Temperatura	-16 a 121 °C
Tubo	Borosilicato



Figura 3.12 Flujómetros de la mezcla absorbente.

❖ Flujómetros del circuito de calentamiento

El circuito de calentamiento cuenta con dos flujómetros que cuantifican la cantidad de agua caliente que se suministra hacia el generador y evaporador. Las características de los flujómetros de calentamiento se muestran en la tabla 3.17 y en la figura 3.13 se muestran los flujómetros.

Tabla 3.17 Características de los flujómetros de calentamiento.

Coraza	Acero inoxidable 316L
Diámetro de conexiones	0.0254 m
Exactitud	±3% escala completa
Flujo volumétrico	14.38 l/min
Resolución	0.5 l/min
Sellos	De viton
Tubo	Borosilicato



Figura 3.13 Flujómetros de calentamiento.

❖ Flujómetro del circuito de enfriamiento

El flujómetro del circuito de enfriamiento se ubica en la entrada del condensador por proveniente de la torre de enfriamiento y desde el condensador hasta el condensador auxiliar 1. Las características del flujómetro de enfriamiento se muestran en la tabla 3.18 y en la figura 3.14 se muestra el flujómetro.

Tabla 3.18 Características del flujómetro de enfriamiento.

Coraza	Acero inoxidable 316L
Exactitud	±3% escala completa
Flujo volumétrico	7.56 l/min
Presión máxima	200 psi
Sellos	De viton
Tubo	Borosilicato



Figura 3.14 Flujómetro de enfriamiento.

❖ Flujómetro de la recirculación y del circuito de purificación

Los flujómetros en la recirculación tanto del generador como del absorbedor tienen las mismas características en el circuito de purificación. Los flujómetros de la recirculación cuantifican la mezcla absorbente mientras que en el circuito de purificación se cuantifica el agua que se purificó. Las características del flujómetro de la recirculación y del circuito de purificación se muestran en la tabla 3.19 y en la figura 3.15 se muestran los flujómetros.

Tabla 3.19 Características del flujómetro de la recirculación y del circuito de purificación.

Coraza	Acero inoxidable 316L
Exactitud	±2% escala completa
Flujo volumétrico	127 a 745 ml/min
Presión máxima	200 psi
Sellos	De viton
Temperatura	-26 a 121 °C
Tubo	Borosilicato



Figura 3.15 Flujómetro de la recirculación y del circuito de purificación.

❖ Bomba del circuito de calentamiento

La bomba del circuito de calentamiento suministra agua a una temperatura elevada al generador y evaporador. Las características de la bomba del sistema de calentamiento se muestran en la tabla 3.20 y en la figura 3.16 se muestra la bomba.

Tabla 3.20 Características de la bomba del sistema de calentamiento.

Alimentación	120 v
Diámetro de succión	0.03175 m
Diámetro de descarga	0.0254 m
Marca	Pedrollo
Material	Acero inoxidable 316
Modelo	CPM 600x
Potencia	0.5 HP
Revoluciones	3450 rpm



Figura 3.16 Bomba del circuito de calentamiento [Torres 2017].

❖ Bombas de la mezcla absorbente y agua condensada

Las bombas de la mezcla absorbente y del agua condensada son micro bombas de tipo magnético. Estas bombas se encargan de hacer recircular la mezcla absorbente en el circuito principal y las bombas de agua condensada solo en el circuito principal. Las características de las bombas de la mezcla absorbente y agua condensada se muestran en la tabla 3.21 y en la figura 3.17 se muestran las bombas.

Tabla 3.21 Características de las bombas de la mezcla absorbente y agua condensada.

Conexiones	NPT 0.00317 m
Engranajes	Peek
Flujo	58.50 a 5050 ml/min
Marca	Cole Parmer
Material	Acero inoxidable 316
Presión	60 a 300
Revoluciones	0 a 5600 rpm
Sellos	Viton
Temperatura	- 10 a 176 °C
Viscosidad	0.2 a 1500 cP



Figura 3.17 Bombas de la mezcla absorbente y agua condensada [Torres 2017].

3.3.2 Presión

La presión es una variable que se mide mediante los transductores de presión y mano vacuómetros con características y diseño que se adapten al equipo TTAPPA. Estos instrumentos de medición son los encargados de cuantificar esta variable.

❖ Transductores de presión

Los transductores de presión miden la presión. Las características de los transductores de presión se muestran en la tabla 3.22 y en la figura 3.18 se muestran los transductores de presión.

Tabla 3.22 Características de los transductores de presión.

Conexión	NTP
Dimensiones	0.06985 x 0.0381 m
Exactitud	±0.25% escala completa
Intervalo de presión	-14.7 a 15 psi
Material	Acero inoxidable
Temperatura	-40 a 125 °C
Voltaje	90 a 30 VDC



Figura 3.18 Transductores de presión [Torres 2017].

❖ Manovacuómetros

Los manovacuómetros miden el vacío para pruebas de hermeticidad y detectan fugas para su posterior arreglo. Las características de los manovacuómetros se muestran en la tabla 3.23 y en la figura 3.19 se muestran los manovacuómetros.

Tabla 3.23 Características de los manovacúómetros.

Coraza del cuerpo exterior	Acero inoxidable 304
Carátula	Policarbonato
Diámetro de la caratula	0.0762 m
Dimensión del conector	0.00635 m
Exactitud	±1% escala completa
Intervalo de presión	0 a 30 psi
Material del tubo de bourdon	Acero inoxidable 316
Resolución	0.5 psi



Figura 3.19 Manovacúómetros de presión.

3.3.3 Temperatura

La temperatura se cuantifica mediante termopares introducidos en termopozos con características que favorezcan al equipo TTAPPA. Este instrumento de medición se encarga de esta variable.

❖ Termopares

Los termopares monitorean en tiempo real la temperatura en diferentes puntos del proceso desde inicio hasta el final, donde en cada componente se encuentra uno en la entrada y otro en la salida introducidos en termopozos. Las características de los termopares y termopozos se muestran en la tabla 3.24 y 3.25 respectivamente. Se muestran tanto los termopares en la figura 3.20 como los termopozos en la figura 3.21 respectivamente.

Tabla 3.24 Características de los termopares.

Exactitud	$\pm 0.5\%$ -1 °C
Tipo	T
Temperatura	200 a 400 °C

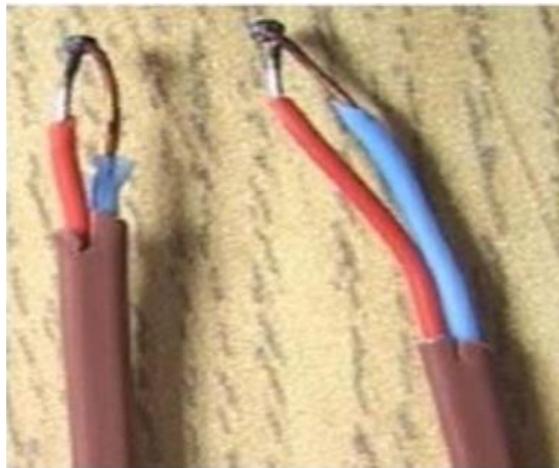


Figura 3.20. Termopares [Torres 2017].

Tabla 3.25 Características de los termopozos.

Largo tubing	0.0300 m
Material	Acero Inoxidable 316
Modelo	FBZ 44
Tubing	0.0064 m



Figura 3.21 Termopozos [Torres 2017].

❖ Calentadores eléctricos

Los calentadores eléctricos simulan el suministro de calor de desecho en el transformador térmico que inicia desde el tanque de calentamiento. El calentador 1 es controlado por un variador de voltaje (Variac) para tener un mejor control de la potencia que se suministra hacia el generador y evaporador. Las características de los controladores eléctricos se muestran en la tabla 3.26 y en la figura 3.22 se muestran los controladores eléctricos.

Tabla 3.26 Características de los calentadores eléctricos.

Calentador 1	1000 W
Calentador 2	2000 W



Figura 3.22 Calentadores eléctricos [Torres 2017].

3.4 Equipos auxiliares

Los equipos auxiliares son considerados aquellos que no intervienen de manera directa en el transformador térmico, ya que su funcionamiento de algunos proporciona apoyo en la calibración de instrumentos de medición, mantenimiento y adquisición de datos. También se usan para cuantificar la concentración de la mezcla absorbente.

3.4.1 Equipos de calibración de transductores de presión

La calibración de los transductores de presión se realiza para corregir la variación de los datos que se obtienen durante la medición de vacío.

❖ Manómetro calibrador de presión

El manómetro es un calibrador de presión estándar el cual permite corregir la variación de la lectura de presión que se adquiere mediante los transductores de presión. Las características del manómetro calibrador de presión se muestran en la tabla 3.27 y en la figura 3.23 se muestra el manómetro calibrador de presión.

Tabla 3.27 Características del manómetro calibrador de presión.

Dimensiones	0.127 x 0.114 x 0.037 m
Material de la carcasa	Zamak
Marca	Fluke
Modelo	700G05
Precisión	Presión positiva ± 0.05 %, Vacío ± 0.1 %
Presión de rotura	500 psi
Resolución	0.001 psi
Rango	-14 a 30 psi



Figura 3.23 Manómetro calibrador de presión.

❖ Bomba de vacío

La bomba de vacío es utilizada en la calibración de los transductores de presión y en el circuito principal del equipo TTAPPA, proporcionando las condiciones necesarias de vacío. Las características de la bomba de vacío se muestran en la tabla 3.28 y en la figura 3.24 se muestra la bomba de vacío.

Tabla 3.28 Características de la bomba de vacío.

Capacidad de aire	50 LPM
Descripción	Bomba de aspiración Cole-Parmer, 1,7 cfm, tanque SS, 115 VAC
Material de partes húmedas	Acero inoxidable 304 Latón - cromo PVC 350/450W Gunmetal (BC)
Tipo de motor	29.5"(0.75 m)



Figura 3.24 Bomba de vacío [Torres 2017].

❖ Calibrador de presión

El calibrador de presión es un dispositivo donde se acoplan la bomba de vacío, el manómetro calibrador de presión y los transductores de presión para su calibración mediante la regulación de vacío por una válvula. Las características del calibrador de presión se muestran en la tabla 3.29 y en la figura 3.25 se muestra el calibrador de presión.

Tabla 3.29 Características del calibrador de presión.

Dimensiones	0.0508 x 0.0635 m
Diámetro de coples	0.0127 m
Número de coples	5



Figura 3.25 Calibrador de presión.

3.4.2 Equipos de calibración de termopares

El sistema de calibración de los termopares consta de diferentes equipos para obtener las curvas de ajuste de temperatura de los termopares, para corregir el error de medición.

❖ Multímetro digital

El multímetro digital es el encargado de medir la temperatura al momento de calibrar los termopares mediante una función que proporciona un valor en °C. Este mismo se usa como un termómetro de referencia. Las características del multímetro digital se muestran en la tabla 3.30 y en la figura 3.26 se muestra el multímetro digital.

Tabla 3.30 Características del multímetro digital.

Dimensiones	0.167 x 0.084 x 0.046 m
Marca	Fluke
Modelo	116
Precisión	$\pm 1\% + 18^2\text{ }^\circ\text{C}$
Resolución	0.1 °C
Rango	-40 °C a 400 °C



Figura 3.26 Multímetro digital.

❖ Baño termostático

El baño termostático permite elevar y disminuir la temperatura de un fluido el cual se usa para calibrar los termopares. Para tal propósito se ajusta un valor de temperatura en el baño termostático y se introducen los termopares en su interior con agua líquida y se realiza un monitoreo continuo de la temperatura en los termopares; para posteriormente obtener las curvas de ajuste de temperatura de cada termopar.

Las características del baño termostático se muestran en la tabla 3.31 y en la figura 3.27 se muestra el baño termostático.

Tabla 3.31 Características del baño termostático.

Capacidad	6 L
Dimensiones	0.400 x 0.254 x 0.396 m
Marca	Cole-Parmer
Material	Acero inoxidable
Modelo	1160 Polystat, 12108-30
Precisión	$\pm 0.05^{\circ}\text{C}$
Rango	-20 a 150°C



Figura 3.27 Baño termostático.

3.4.3 Equipo de mantenimiento del transformador térmico

El transformador térmico necesita un mantenimiento cada vez que se cambia la mezcla absorbente y también cuando termina un periodo de pruebas, dado que puede llegar a formarse corrosión en la tubería por las diferentes mezclas. Esto debe evitarse para poder continuar con el funcionamiento óptimo del transformador térmico.

❖ Compresor de aire

El compresor proporciona presión para extraer el sobrante de la mezcla absorbente, sin exceder el límite que toleran los demás dispositivos para evitar que puedan dañarse y perder tiempo en reparaciones. Las características del compresor se muestran en la tabla 3.32 y en la figura 3.28 se muestra el compresor de aire.

Tabla 3.32 Características del compresor de aire.

Alimentación	120 v
Capacidad	11.356 L
Marca	DEVILBISS
Material	Acero inoxidable
Modelo	HFAC153-3
Potencia	1.5 HP
Presión	135 psi



Figura 3.28 Compresor de aire.

3.4.4 Equipo de adquisición de datos

La adquisición de datos es un factor muy importante para el registro de las mediciones de las variables de proceso durante la operación del transformador térmico y para el análisis de su comportamiento dinámico. La interpretación de estos datos puede dar un panorama para futuros ajustes y modificaciones que se pueden llegar a hacer en el transformador térmico.

❖ Adquisidor de datos

El adquisidor de datos es el encargado de adquirir información de la presión y de la temperatura en tiempo real. Esto ocurre mediante señales que son transmitidas por transductores de presión y termopares. Posteriormente, se envían al adquisidor de datos y después de un procesamiento de la información se muestra los valores de las mediciones en unidades de presión y temperatura. Las características del adquisidor de datos se muestran en la tabla 3.33 y en la figura 3.29 se muestra el adquisidor de datos.

Tabla 3.33 Características del adquisidor de datos.

Alimentación	127 Volts a 60Hz
Marca	Agilent Technologies
Modelo	34970
Número de tarjetas	2
Número de canales	20 cada tarjeta
Software	HP BenchLink Data Logger versión 1.4



Figura 3.29 Adquisidor de datos [Torres 2017].

3.4.5 Equipo de medición de concentración de la mezcla absorbente

La estimación de la concentración de la mezcla absorbente es importante para el análisis del proceso del transformador térmico. En el absorbedor la mezcla absorbente tiene diferente concentración que en el generador. Para estimar la concentración se debe obtener una muestra de cada uno de estos componentes del transformador térmico.

❖ Refractómetro

El refractómetro se utiliza para conocer la concentración de la mezcla absorbente tomada en dos puntos del transformador térmico. La concentración se cuantifica mediante el índice de refracción de las muestras. Las características del refractómetro se muestran en la tabla 3.34 y en la figura 3.30 se muestra el refractómetro.

Tabla 3.34 Características del refractómetro.

Exactitud	$\pm 0.0002\%$
Índice de refracción (IR)	1.3 a 1.7
Marca	ATAGO
Modelo	NAR -1T
Resolución	0.0001



Figura 3.30 Refractómetro [Torres 2017].

3.5 Material aislante

El material aislante es un elastómero expandido que se utiliza para no tener pérdidas de calor hacia el exterior y mantener una temperatura constante en el equipo TTAPPA. Las características del material aislante se muestran en la tabla 3.35.

Tabla 3.35 Características del material aislante.

Coeficiente de conductividad térmica	0.040 W/(m K)
Diámetros internos	0.00635 y 0.01905 m
Espesor	0.01 y 0.015 m
Temperaturas de operación	-45 y 116 °C
Temperatura del coeficiente de conductividad térmica	40 °C

CAPÍTULO 4

PREPARACIÓN, ARRANQUE Y OPERACIÓN DEL TRANSFORMADOR TÉRMICO POR ABSORCIÓN PARA PURIFICACIÓN DE AGUA

Introducción

En este capítulo se describen los métodos previos a seguir para la preparación, arranque y operación del equipo TTAPPA tales como cálculo de la concentración de la mezcla cuaternaria, mantenimiento, limpieza de la mezcla cuaternaria, calibración de termopares, calibración de transductores de presión, prueba de hermeticidad, arranque del equipo, operación del equipo y paro del equipo.

4.1 Medición de concentración de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O)

La concentración de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) se calcula mediante la correlación de la concentración con el índice de refracción [Torres 2017]. Para un intervalo de concentración de 60% a 65% a una temperatura de 40 °C. La ecuación que se utiliza se muestra a continuación:

$$X = 11326(\text{IR})^2 - 32810(\text{IR}) + 23821 \quad 4.1$$

X está expresada en porcentaje en peso de la parte absorbente que son las sales de litio con respecto al total del peso de la mezcla absorbente e IR es el índice de refracción. Los datos para calcular esta correlación están en el apéndice F.

4.2 Mantenimiento del transformador térmico por absorción para purificación de agua

El mantenimiento del equipo TTAPPA se realiza para prevenir un desgaste en el circuito principal y en el de las tuberías. Esto se debe a la corrosión causada por los residuos de la mezcla absorbente al momento de cambiar las sustancias en cada periodo de pruebas.

Para el mantenimiento se drena la mezcla absorbente, posteriormente mediante presión se retira el sobrante que se encuentra en el circuito de las tuberías tanto como en el del circuito principal. Después se introducen 3 litros de agua destilada mediante el uso de

vacío, generando no mayor a -14 psi para no dañar los transductores de presión. Posteriormente, ya introducidos los 3 litros de agua destilada se recircula por el circuito de la mezcla absorbente para arrastrar las partículas que ocasionan complicaciones en el equipo. Este proceso se realiza tres veces para evitar futuras obstrucciones.

Se utiliza agua destilada para no alterar las propiedades de la mezcla absorbente que se esté utilizando en el periodo actual de pruebas, dado que al alterar la concentración podría cambiar considerablemente los resultados deseados. Este proceso está detallado en el apéndice G.

4.3 Purificación de la mezcla absorbente ($\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O}$)

La purificación de la mezcla absorbente ($\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O}$) se realiza mediante filtración. Este proceso remueve impurezas en forma de partículas (restos de tubería), que al paso del tiempo se quedan en la mezcla absorbente ($\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O}$) por el alto nivel de corrosión que genera el bromuro de litio (LiBr). En la figura 4.1 se observa la mezcla absorbente con impurezas y el proceso de filtrado.



Figura 4.1 Mezcla absorbente ($\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O}$).

4.4 Calibración de termopares

La calibración de los termopares se realiza antes de instalarlos en el equipo TTAPPA. Es un monitoreo a diferentes temperaturas, mediante la comparación de la temperatura de los termopares y un termómetro estándar.

El monitoreo se realiza en un rango 5 °C a 120 °C de temperatura. Se inicia el proceso de calibración mediante la preparación de un baño con hielo granulado para obtener la temperatura de 5°C en un recipiente aislado. Se colocan los termopares en el interior del recipiente, junto con el termómetro estándar de referencia. Se realizan 100 escaneos en 30 segundos mediante el adquisidor de datos para reducir la variabilidad de la temperatura y tener exactitud.

Para incrementar la temperatura en 10°C hasta llegar a 120°C, se realiza la preparación de un baño termostático con aceite térmico. Se colocan los termopares en el interior del recipiente junto con el termómetro estándar de referencia con aislante Armaflex. Se realizan 100 escaneos en 30 segundos mediante el adquisidor de datos para reducir la variabilidad de la temperatura y el tiempo de estabilidad del baño termostático.

Los datos obtenidos se analizan para calcular un valor promedio de las mediciones. Se realiza una gráfica del valor medio medido contra el estándar, dando como resultado una ecuación lineal para cada termopar. La pendiente (gain) y la ordenada al origen (offset) se introducen en el software del adquisidor de datos. Este proceso se muestra detallado en el apéndice H y en el apéndice J se muestran las tablas de la pendiente y la ordenada al origen de los termopares.

4.5 Calibración de transductores de presión

La calibración de los transductores de presión se realiza para corregir el error de medición, cuando se requiere generar vacío al determinar fugas y al momento de operar el equipo TTAPPA.

La calibración de los transductores de presión se realiza mediante la generación de vacío en un rango 0 a -22 InHg. Se inicia la calibración mediante la preparación del calibrador de presión, conectando el manómetro calibrador de presión en la boquilla ubicada en el extremo derecho. En la otra boquilla ubicada al otro extremo izquierdo se conecta el transductor de presión que se encuentra en el canal 101 de la primera tarjeta de adquisición de datos, posteriormente en otra boquilla del calibrador de presión, se conecta la bomba de vacío y en intervalos de 1 InHg se incrementa hasta llegar a -22 InHg, considerando que $1 \text{ InHg} = 0.4911 \text{ psi}$.

Al término de la calibración del primer transductor de presión, se sustituye el transductor de presión ubicado en el canal 101 por el transductor de presión ubicado en el canal 102. Posteriormente, se inicia el mismo procedimiento, y el adquirente de datos registra los datos junto con el programa de adquisición de datos. Posteriormente, los datos obtenidos se analizan para calcular un valor promedio de las mediciones realizadas. Se realiza una gráfica del valor medio medido contra la equivalencia de 1 InHg, dando como resultado una ecuación lineal para cada traductor de presión. La pendiente (gain) y la ordenada al origen (offset) se introducen en el software del adquirente de datos.

En la figura 4.2 se muestra la calibración de los transductores de presión, en el apéndice I el proceso detallado para la calibración de los transductores de presión y en el apéndice J las tablas de la pendiente y la ordenada al origen de los transductores de presión.



Figura 4.2 Calibración de los transductores de presión.

4.6 Pruebas de hermeticidad

Las pruebas de hermeticidad se realizan para la detección de fugas en el circuito principal. La prueba comienza al generar vacío mediante la bomba de vacío hasta -22 InHg lo que es equivalente a 10.8 psi. El equipo se deja reposar por 24 horas para determinar si existen pérdidas de vacío.

Si existen pérdidas de vacío mayores a 1 InHg, se procede a presurizar el circuito principal mediante un compresor generando presión no mayor a 23 InHg equivalente a 11.3 psi. Se coloca jabón diluido en agua en las uniones soldadas y roscadas, se encuentran las fugas y se sellan. Se repite el mismo procedimiento de detección de fugas hasta no tener pérdidas de vacío en el equipo TTAPPA.

4.7 Llenado de solución en el transformador térmico por absorción para purificación de agua

El llenado de solución de trabajo en el equipo TTAPPA inicia mediante el llenado del depósito de calentamiento. Mediante la apertura de la válvula que se encuentre en la parte superior del depósito, se llena con agua potable a través de un embudo y una manguera hasta verificar que ha alcanzado la marca del indicador de nivel que se encuentra a la izquierda del depósito. Se verifica que no sobrepase 40 litros que es el límite de la marca.

Posteriormente se llena el depósito del tanque separador con agua potable mediante un embudo y una manguera sin rebasar el límite de la marca del indicador de nivel que se encuentra a la derecha del tanque. Después que se haya llenado el tanque, se verifica que la torre de enfriamiento se encuentre totalmente llena sin exceder el límite. Si no se encuentra en su capacidad total, se tiene que llenar mediante su mecanismo automático de llenado.

4.8 Operación de arranque del transformador térmico por absorción para purificación de agua

Se verifica que se encuentre lleno el depósito de calentamiento, el tanque separador y la torre de enfriamiento. Se visualiza el equipo para identificar condiciones que retarden la prueba o que afecten su funcionamiento.

Se enciende el adquisidor de datos para monitorear la temperatura y el vacío. Se enciende la fuente de voltaje de alimentación de los transductores de presión y se inicia la lectura y almacenamiento de datos mediante el programa del adquisidor de datos. Se monitorean los transductores de presión para extraer el aire y generar vacío hasta llegar a -22 InHg que es una de las condiciones óptimas de operación.

Se enciende la resistencia 1 y 2, se ajusta la potencia del Variac de la resistencia 1 a 400 watts equivalente a 7.4 amperes. Posteriormente, se enciende la bomba para hacer recircular agua a alta temperatura para simular el calor de desecho y se ajustan los flujos volumétricos que van hacia el generador y el evaporador.

Se encienden las bombas del circuito de la mezcla cuaternaria, la bomba de la recirculación en el generador y la bomba del circuito de enfriamiento. Se ajustan los flujos del circuito de la mezcla cuaternaria, el flujo de la recirculación en el generador a su máximo nivel y el flujo del circuito de enfriamiento. Este proceso se muestra detallado en el apéndice K.

4.9 Operación del transformador térmico por absorción para purificación de agua

La operación del equipo TTAPPA se vigila mediante un monitoreo continuo de las variables de temperatura y presión. Se deben de controlar los cambios inesperados de la temperatura, flujo y presión para llegar al estado estable.

Para operar el equipo en el estado dinámico, se inicia verificando que la temperatura de calentamiento tenga 75 °C, si sobrepasa la temperatura, se apaga el Variac. Al mismo tiempo se monitorean los flujos volumétricos de la mezcla absorbente ($\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O}$) que va desde el generador – absorbedor y absorbedor – generador, para mantener el nivel correcto de la mezcla absorbente en el absorbedor. Después, se prende la bomba para pasar el agua condensada al evaporador.

Para operar el equipo en estado estacionario se monitorean continuamente las variables de proceso y se realizan ajustes en los caudales o en la presión si es necesario para permanecer en el estado estacionario. Cuando se tienen condiciones de temperatura de ebullición en el circuito de agua de purificación, el equipo empezará a destilar agua. El agua destilada se recolecta mediante un recipiente limpio a la salida del condensador auxiliar 2 y se tapa para evitar que se contamine. Se cuantifica el producto destilado mediante su peso y duración de operación.

Finalmente, se extraen muestras de la mezcla absorbente ($\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O}$) de la salida del generador y del absorbedor para medir la concentración en estos componentes. Este proceso se muestra detallado en el apéndice L.

4.10 Operación de paro del equipo transformador térmico por absorción para purificación de agua

El paro del equipo TTAPPA es el último paso para finalizar la prueba experimental dado que, si la prueba necesita terminar, se debe iniciar apagando las resistencias eléctricas y las bombas. Después se desconectan. Luego, se debe detener la adquisición de datos del programa del adquisidor de datos y apagarlo. Por último, se debe de apagar la torre de enfriamiento y los circuitos eléctricos principales.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Introducción

En este capítulo se muestra el análisis de los resultados obtenidos de la comparación de caída de presión en el circuito de la mezcla absorbente con las mezclas absorbentes LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O y LiBr-H₂O, utilizados en el equipo TTAPPA, con el fin de determinar cuál tiene menor caída de presión.

5.1 Resultados obtenidos de las mezclas absorbentes (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) y (LiBr+H₂O)

El objetivo del presente trabajo es comparar las caídas de presión de las dos mezclas absorbentes y comprobar cuál es la más adecuado para tener una mejor eficiencia en el equipo TTAPPA.

En la tabla 5.1 se muestran los cálculos de las pérdidas de energía por altura obtenidos por la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O).

Tabla 5.1 Cálculos de las pérdidas de energía por altura para (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O).

Dirección de la mezcla absorbente		R_e	$\frac{L}{D} \text{Codos}$	$\frac{L}{D} \text{Valvulas}$	f	f_T
Generador al Absorbedor	Antes del economizador	1336	50	150	0.0479	0.038
	Después del economizador	1342	50	150	0.0477	0.0504
Absorbedor al Generador	Antes del economizador	3695	50	150	0.070	0.076
	Después del economizador	1310	50	150	0.0489	0.0488

En la tabla 5.1 se muestra la mezcla cuaternaria del generador al absorbedor el flujo en el economizador sigue un régimen laminar. Del absorbedor al generador el flujo en el economizador sigue un régimen laminar- transición.

En la tabla 5.2 se muestran los resultados de las pérdidas de energía por altura por (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O).

Tabla 5.2 Resultados de las pérdidas de energía por altura para (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O).

Dirección de la mezcla absorbente		$h_{L \text{ fricción}} (m)$	$h_{L \text{ accesorios}} (m)$	$h_{L \text{ totales}} (m)$
Generador al Absorbedor	Antes del economizador	0.037	0.066	0.103
	Después del economizador	0.026	0.087	0.113
Absorbedor al Generador	Antes del economizador	0.035	0.118	0.153
	Después del economizador	0.017	0.078	0.093

En la tabla 5.3 se muestran cálculos de las pérdidas de energía por altura para las recirculaciones obtenidos por la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O).

Tabla 5.3 Cálculos de las pérdidas de energía por altura en recirculaciones para (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O).

Equipo	R_e	$\frac{L}{D} \text{ Codos}$	$\frac{L}{D} \text{ Valvulas}$	f	f_T
Generador	1579	50	150	0.0405	0.027
Absorbedor	2002	50	150	0.0320	0.027

En la tabla 5.4 se muestran los resultados de las pérdidas de energía por altura para las recirculaciones por la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O).

Tabla 5.4 Resultados de las pérdidas de energía por altura en recirculaciones para (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O).

Equipo	$h_{L \text{ fricción}} (m)$	$h_{L \text{ accesorios}} (m)$	$h_{L \text{ totales}} (m)$
Generador	0.015	0.052	0.067
Absorbedor	0.017	0.047	0.064

En la tabla 5.5 se muestran los cálculos de las pérdidas de energía por altura obtenidos por la mezcla absorbente (LiBr+H₂O).

Tabla 5.5 Cálculos de las pérdidas de energía por altura para LiBr+H₂O.

Dirección de la mezcla absorbente		Re	$\frac{L}{D} \text{ Codos}$	$\frac{L}{D} \text{ Valvulas}$	f	f_T
Generador al Absorbedor	Antes del economizador	2105	50	150	0.0303	0.038
	Después del economizador	2359	50	150	0.027	0.0504
Absorbedor al Generador	Antes del economizador	3344	50	150	0.0385	0.0758
	Después del economizador	2035	50	150	0.0225	0.0488

En la tabla 5.5 se muestra la mezcla absorbente (LiBr+ H₂O) del generador al absorbedor el flujo en el economizador sigue un régimen laminar. Del absorbedor al generador el flujo en el economizador sigue un régimen transición – laminar.

En la tabla 5.6 se muestran los resultados de las pérdidas de energía por altura por (LiBr+H₂O).

Tabla 5.6 Resultados da las pérdidas de energía por altura para LiBr+H₂O.

Dirección de la mezcla absorbente		$h_{L \text{ fricción}} (m)$	$h_{L \text{ accesorios}} (m)$	$h_{L \text{ totales}} (m)$
Generador al Absorbedor	Antes del economizador	0.0232	0.066	0.103
	Después del economizador	0.0146	0.087	0.113
Absorbedor al Generador	Antes del economizador	0.0192	0.118	0.153
	Después del economizador	0.0077	0.076	0.093

En la tabla 5.7 se muestran cálculos de las pérdidas de energía por altura para las recirculaciones obtenidos por la mezcla absorbente (LiBr+ H₂O).

Tabla 5.7 Cálculos de las pérdidas de energía por altura en recirculaciones para LiBr+H₂O.

Equipo	R_e	$\frac{L}{D} \text{ Codos}$	$\frac{L}{D} \text{ Valvulas}$	f	f_T
Generador	1579	50	150	0.0405	0.027
Absorbedor	2002	50	150	0.0320	0.027

En la tabla 5.8 se muestran los resultados de las pérdidas de energía por altura para las recirculaciones por la mezcla absorbente (LiBr+H₂O).

Tabla 5.8 Resultados de las pérdidas de energía por altura en recirculaciones para LiBr+H₂O.

Equipo	$h_{L \text{ fricción}} (m)$	$h_{L \text{ accesorios}} (m)$	$h_{L \text{ totales}} (m)$
Generador	0.015	0.042	0.067
Absorbedor	0.017	0.047	0.064

Los resultados de las caídas de presión entre el generador y absorbedor de los fluidos de trabajo se muestran en la tabla 5.9.

Tabla 5.9 Resultados de las caídas de presión para cada mezcla absorbente en el circuito absorbedor-generador.

Mezcla absorbente		LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O	LiBr+H ₂ O
Dirección de la mezcla absorbente		$\Delta P (kPa)$	$\Delta P (kPa)$
Generador al Absorbedor	Antes del economizador	8.360	7.699
	Después del economizador	10.443	9.709
Absorbedor al Generador	Antes del economizador	17.828	16.620
	Después del economizador	15.473	14.499

Los resultados de las caídas de presión en los circuitos de recirculación del absorbedor y del generador, se muestran en la tabla 5.10.

Tabla 5.10 Resultados de las caídas de presión para cada mezcla absorbente para las recirculaciones de flujo del generador y absorbedor.

	LiBr+LiI+LiNO ₃ +LiCl+H ₂ O	LiBr+H ₂ O
Equipo	ΔP (kPa)	ΔP (kPa)
Generador	19.515	18.896
Absorbedor	18.371	17.760

El análisis comparativo de las caídas de presión en el circuito de la mezcla absorbente absorbedor - generador se muestra en la tabla 5.11. La tabla muestra el porcentaje de incremento en la caída de presión de la mezcla absorbente LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O con respecto a LiBr+H₂O. Los resultados muestran que los incrementos están entre el 7-9%.

Tabla 5.11 Análisis comparativo del incremento en las caídas de presión para las mezclas absorbentes en el circuito generador-absorbedor.

		$\% \Delta P$ (kPa)
Generador al Absorbedor	Antes del economizador	9
	Después del economizador	8
Absorbedor al Generador	Antes del economizador	7
	Después del economizador	7

El análisis comparativo de las caídas de presión de las mezclas absorbentes en los circuitos de recirculación para el absorbedor y el generador se muestra en la tabla 5.12. La tabla muestra el porcentaje de incremento en la caída de presión de la mezcla absorbente $\text{LiBr}+\text{LiI}+\text{LiNO}_3+\text{LiCl}+\text{H}_2\text{O}$ con respecto a $\text{LiBr}+\text{H}_2\text{O}$. Los resultados muestran que los incrementos son del 3%.

Tabla 5.12 Análisis comparativo del incremento en las caídas de presión para las mezclas absorbentes para las recirculaciones del generador y absorbedor.

Equipo	$\% \Delta P$ (kPa)
Generador	3
Absorbedor	3

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

- ✓ Se realizaron pruebas experimentales en un Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de agua de las mezclas absorbentes (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) y (LiBr+H₂O) para determinar las caídas de presión.

- ✓ Se calcularon las caídas de presión en el circuito absorbedor-generator donde las caídas de presión son mayores para la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) que para (LiBr+H₂O):

En el circuito de recirculación del generador las caídas de presión fueron de 19.515 kPa para (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) y de 18.896 kPa para (LiBr+H₂O).

En el circuito de recirculación del absorbedor las caídas de presión fueron de 18.371 kPa para (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) y de 17.76 kPa para (LiBr+H₂O).

- ✓ Después de analizar los resultados obtenidos de las pruebas experimentales comparando las dos mezclas absorbentes se obtienen las siguientes conclusiones:

En el circuito absorbedor– generador el porcentaje de incremento en la caída de presión de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) con respecto a (LiBr+H₂O) están entre el 7 y 9%.

En los circuitos de recirculación del absorbedor y del generador el porcentaje de incremento en la caída de presión es del 3% para (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) con respecto a (LiBr+H₂O).

Recomendaciones:

- ❖ Dado el trabajo de [Torres 2017] y el estudio previo de [Salgado 2018] si se hacen modificaciones al diseño de tuberías del TTAPPA podrían reducir aún más las caídas de presión usando LiBr+H₂O.
- ❖ Para obtener un óptimo desempeño del TTAPPA es necesario usar mezclas absorbentes con caídas de presión aún más bajas para permitir el bombeo con el equipo disponible.

APÉNDICE A

Datos de seguridad del Bromuro de litio (LiBr)



Page 1 of 7
 SDS Ref. No: QS-SDS-050
 Date Approved: 1 May, 2015
 Revision No: 1

SAFETY DATA SHEET

LITHIUM BROMIDE

1. Identification of the Substance/Mixture and of the Company/Undertaking:

- 1.1 **Product Identifier:** Lithium bromide anhydrous
 1.1.1 **Substances** Lithium bromide anhydrous
Alternate names and trade name Lectro[®] Lyte 500 Salt
 1.1.2 **Mixture name:** Not applicable
 1.2 **Relevant Identified Uses of the Substance or Mixture and Uses Advised Against:**
 Component in closed systems for air conditioning applications.
 Formulation and chemical synthesis in industrial manufacturing operations.
 Additive for preparations and articles for industrial and consumer use.
 Do not use for private purposes (household).

1.3 **Details of the Supplier of the Safety Data Sheet**

North America FMC Lithium Seven LakePointe Plaza 2801 Yorkmont Rd, Suite 300 Charlotte, NC 28208 Phone: +1.704.868.5300 Fax: +1.704.868.5370 1.888.lithium	Europe FMC Chemicals Commercial Road Bromborough, Merseyside CH62 3NL, England Phone: +44.151.334.8085 Fax: +44.151.482.7361	Asia Pacific FMC Asia Innovation Center No 3 Building No. 4560 Jinke Road Shanghai, China 201203 T: +86.21.2067.5888
--	---	--

Email: lithium.info@fmc.com
 Web: www.fmclithium.com

1.4 **Emergency Telephone Number:**

North America CHEMTREC: +1.800.424.9300 +1.703.527.3887 Plant: +1.704.629.5361 Medical: +1.303.595.9048	Europe 24 hr Specialist advice number: CHEMTREC: +1.703.527.3887 Office (0900-1700): +44.151.334.8085	Asia Pacific Phone: +86.21.2067.5888
--	---	--

2. Hazards Identification

2.1 **Classification of the Substance or mixture:**
2.1.1 **GHS Classification [EC Regulation No 1272/2008 and US OSHA regulations]**

Acute Toxicity, Category 4
 Eye Irritant, Category 2
 Skin irritant, Category 2
 Skin sensitization, Category 1

2.1.2 **EC: Classification according to 67/548/EEC or 1999/45/EC [DSD/DPD]**

Xn, R22; Xi, R36/38, R43

2.2 **Label Elements:**2.2.3 **Hazard Pictograms(s):**2.2.4 **Signal Word:**

Hazard Statement(s):	Warning	
	Harmful if swallowed	H302
	Causes serious eye irritation	H319
	Causes skin irritation	H315
	May cause an allergic skin reaction	H317

Precautionary Statement(s):

Wear protective gloves/protective clothing/eye protection/face protection.	P280
IF IN EYES: Rinse cautiously w/ water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.	P305 + P351 + P338
If eye irritation persists: Get medical advice/attention.	P337 + P313
IF SWALLOWED: Call a POISON CENTER or doctor/physician if you feel unwell.	P301 + P312
IF ON SKIN: Wash with plenty of soap and water.	P302 + P352

If skin irritation occurs: Get medical advice/attention. P332 + P313
Additional Precautionary Statements(s):
 Avoid breathing dust/fume/gas/mist/vapours/spray. P261
 Wash hands thoroughly after handling. P264
 Do not eat, drink or smoke when using this product. P270
 Contaminated work clothing should not be allowed out of the workplace. P272
 Take off contaminated clothing and wash before reuse. P362
 Wash contaminated clothing before reuse. P363
 Dispose of contents/ container to an approved waste disposal plant. P501

2.3 **Other Hazards**
 None.

3. Composition / Information on Ingredients

3.1 **Substances**

3.1.1 **GHS Classification [EC: Regulation No 1272/2008; US: OSHA regulations]**

Chemical Name	CAS #	EC No	EC Index No	REACH Reg No	Wt. %	Classification, Hazard Statement Codes	
Lithium bromide	7550-35-8	231-439-8	not avail.	not available	100	Acute Tox. 4 Eye Irrit. 2 Skin Irrit. 2 Skin Sens. 1	H302 H319 H315 H317

3.1.2 **EC: Classification according to 67/548/EEC or 1999/45/EC [DSD/DPD]**

Chemical Name	CAS #	EC No	Wt. %	Symbols	R-phrases
Lithium bromide	7550-35-8	231-439-8	100	Xn Xi	R22 R36/38 R43

3.2 **Mixtures** Not applicable.

(see Section 16 for R-phrase text)

4. First Aid Measures

4.1 **Description of First Aid Measures**

EYES: Flush with water for at least 15 minutes. If irritation occurs and persists, contact a medical doctor.

SKIN: Wash with plenty of soap and water. Get medical attention if irritation occurs and persists.

INGESTION: Drink 1 or 2 glasses of water. Never give anything by mouth to an unconscious person. If any discomfort persists, obtain medical attention.

INHALATION: Remove to fresh air. If breathing difficulty or discomfort occurs and persists, contact a medical doctor.

4.2 **Most Important Symptoms and effects, both acute and delayed**

Skin and eye irritation. May cause allergic skin reaction.

4.3 **Indication of any immediate medical attention and special treatment needed.**

Notes to medical doctor:

This product has low oral, dermal and inhalation toxicity, and is a mild irritant. Treatment is controlled removal of exposure followed by symptomatic and supportive care.

5. Fire-Fighting Measures

5.1 **Extinguishing media** Dry chemical, CO₂, water spray or regular foam.

5.2 **Special hazards arising from the substance or mixture**

Hazardous combustion products None

General Hazard No known physical hazard, non-combustible.

Properties contributing to

Flammability None

Flashpoint Not applicable

Flammable limits in air Upper: Not available Lower: Not available.

APÉNDICE B

Datos de seguridad del Ioduro de Litio (LiI)


 Sigma-Aldrich®

www.sigmaaldrich.com

SAFETY DATA SHEET

 Version 6.2
 Revision Date 01/15/2020
 Print Date 01/05/2021
SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking**1.1 Product identifiers**

Product name : Lithium iodide hydrate

 Product Number : 223816
 Brand : Aldrich
 CAS-No. : 85017-80-7
1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Identified uses : Laboratory chemicals, Synthesis of substances

1.3 Details of the supplier of the safety data sheet
 Company : Sigma-Aldrich Quimica S de RL de CV
 Parque Industrial Toluca 2000
 Calle 6 Norte No. 107
 50200 TOLUCA
 MEXICO

 Telephone : +52 (0)1 800 007 5300
 Fax : +52 (0)1 800 712 9920
1.4 Emergency telephone number
 Emergency Phone # : 800-00-214-00 (SETIQ)
 800-681-9531 (CHEMTREC)
 (55) 55-59-15-88
SECTION 2: Hazards identification**2.1 Classification of the substance or mixture**

Not a hazardous substance or mixture.

2.2 GHS Label elements, including precautionary statements

Not a hazardous substance or mixture.

2.3 Hazards not otherwise classified (HNOC) or not covered by GHS - none**SECTION 3: Composition/information on ingredients****3.1 Substances**
 Molecular weight : 133.85 g/mol
 CAS-No. : 85017-80-7
 EC-No. : 233-822-5

Component	Classification	Concentration
Lithium iodide hydrate		
		<= 100 %

SECTION 4: First aid measures
4.1 Description of first aid measures**If inhaled**

If breathed in, move person into fresh air. If not breathing, give artificial respiration.

In case of skin contact

Wash off with soap and plenty of water.

In case of eye contact

Flush eyes with water as a precaution.

If swallowed

Never give anything by mouth to an unconscious person. Rinse mouth with water.

4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed

The most important known symptoms and effects are described in the labelling (see section 2.2) and/or in section 11

4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

No data available

SECTION 5: Firefighting measures
5.1 Extinguishing media**Suitable extinguishing media**

Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.

5.2 Special hazards arising from the substance or mixture

Lithium oxides

5.3 Advice for firefighters

Wear self-contained breathing apparatus for firefighting if necessary.

5.4 Further information

No data available

SECTION 6: Accidental release measures
6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures

Avoid dust formation. Avoid breathing vapours, mist or gas.
For personal protection see section 8.

6.2 Environmental precautions

No special environmental precautions required.

6.3 Methods and materials for containment and cleaning up

Sweep up and shovel. Keep in suitable, closed containers for disposal.

APÉNDICE C

Datos de seguridad del Nitrato de Litio (LiNO₃)

SIGMA-ALDRICH

sigma-aldrich.com

SAFETY DATA SHEET

Version 4.7
 Revision Date 08/21/2014
 Print Date 04/29/2015

1. PRODUCT AND COMPANY IDENTIFICATION

1.1 Product identifiers

Product name : Lithium nitrate

Product Number : 229741

Brand : Aldrich

CAS-No. : 7790-69-4

1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against

Identified uses : Laboratory chemicals, Manufacture of substances

1.3 Details of the supplier of the safety data sheet

Company : Sigma-Aldrich
 3050 Spruce Street
 SAINT LOUIS MO 63103
 USA

Telephone : +1 800-325-5832

Fax : +1 800-325-5052

1.4 Emergency telephone number

Emergency Phone # : (314) 776-6555

2. HAZARDS IDENTIFICATION

2.1 Classification of the substance or mixture

GHS Classification in accordance with 29 CFR 1910 (OSHA HCS)

Oxidizing solids (Category 3), H272

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

2.2 GHS Label elements, including precautionary statements

Pictogram



Signal word : Warning

Hazard statement(s)
 H272 : May intensify fire; oxidiser.

Precautionary statement(s)

P210 : Keep away from heat.

P220 : Keep/Store away from clothing/ combustible materials.

P221 : Take any precaution to avoid mixing with combustibles.

P280 : Wear protective gloves/ protective clothing/ eye protection/ face protection.

P370 + P378 : In case of fire: Use dry sand, dry chemical or alcohol-resistant foam for extinction.

P501 : Dispose of contents/ container to an approved waste disposal plant.

2.3 Hazards not otherwise classified (HNOC) or not covered by GHS - none

3. COMPOSITION/INFORMATION ON INGREDIENTS
3.1 Substances

Formula : LiNO_3
 Molecular weight : 68.95 g/mol
 CAS-No. : 7790-69-4
 EC-No. : 232-218-9

Hazardous components

Component	Classification	Concentration
Lithium nitrate	Ox. Sol. 3; H272	90 - 100 %

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

4. FIRST AID MEASURES
4.1 Description of first aid measures**General advice**

Consult a physician. Show this safety data sheet to the doctor in attendance. Move out of dangerous area.

If inhaled

If breathed in, move person into fresh air. If not breathing, give artificial respiration. Consult a physician.

In case of skin contact

Wash off with soap and plenty of water. Consult a physician.

In case of eye contact

Flush eyes with water as a precaution.

If swallowed

Never give anything by mouth to an unconscious person. Rinse mouth with water. Consult a physician.

4.2 Most important symptoms and effects, both acute and delayed

The most important known symptoms and effects are described in the labelling (see section 2.2) and/or in section 11

4.3 Indication of any immediate medical attention and special treatment needed

No data available

5. FIREFIGHTING MEASURES
5.1 Extinguishing media**Suitable extinguishing media**

Use water spray, alcohol-resistant foam, dry chemical or carbon dioxide.

5.2 Special hazards arising from the substance or mixture

Nitrogen oxides (NO_x), Lithium oxides

5.3 Advice for firefighters

Wear self-contained breathing apparatus for firefighting if necessary.

5.4 Further information

Use water spray to cool unopened containers.

6. ACCIDENTAL RELEASE MEASURES
6.1 Personal precautions, protective equipment and emergency procedures

Avoid dust formation. Avoid breathing vapours, mist or gas. Ensure adequate ventilation. Evacuate personnel to safe areas.

For personal protection see section 8.

6.2 Environmental precautions

Do not let product enter drains.

APÉNDICE D

Datos de seguridad del Cloruro de Litio (LiCl)

Sigma-Aldrich®

www.sigmaaldrich.com

SAFETY DATA SHEET

Version 6.2
Revision Date 12/18/2020
Print Date 01/05/2021**SECTION 1: Identification of the substance/mixture and of the company/undertaking****1.1 Product identifiers**

Product name : Lithium chloride

Product Number : 213233
Brand : SIGALD
CAS-No. : 7447-41-8**1.2 Relevant identified uses of the substance or mixture and uses advised against**

Identified uses : Laboratory chemicals, Synthesis of substances

1.3 Details of the supplier of the safety data sheetCompany : Sigma-Aldrich Quimica S de RL de CV
Parque Industrial Toluca 2000
Calle 6 Norte No. 107
50200 TOLUCA
MEXICOTelephone : +52 (0)1 800 007 5300
Fax : +52 (0)1 800 712 9920**1.4 Emergency telephone**Emergency Phone # : 800-00-214-00 (SETIQ)
800-681-9531 (CHEMTREC)
(55) 55-59-15-88**SECTION 2: Hazards identification****2.1 Classification of the substance or mixture****GHS Classification in accordance with 29 CFR 1910 (OSHA HCS)**Acute toxicity, Oral (Category 4), H302
Skin irritation (Category 2), H315
Eye irritation (Category 2A), H319

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

2.2 GHS Label elements, including precautionary statements

Pictogram



Signal word

Warning

Hazard statement(s)	
H302	Harmful if swallowed.
H315	Causes skin irritation.
H319	Causes serious eye irritation.
Precautionary statement(s)	
P264	Wash skin thoroughly after handling.
P270	Do not eat, drink or smoke when using this product.
P280	Wear protective gloves/ eye protection/ face protection.
P301 + P312 + P330	IF SWALLOWED: Call a POISON CENTER/ doctor if you feel unwell. Rinse mouth.
P302 + P352	IF ON SKIN: Wash with plenty of soap and water.
P305 + P351 + P338	IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.
P332 + P313	If skin irritation occurs: Get medical advice/ attention.
P337 + P313	If eye irritation persists: Get medical advice/ attention.
P362	Take off contaminated clothing and wash before reuse.
P501	Dispose of contents/ container to an approved waste disposal plant.

2.3 Hazards not otherwise classified (HNOC) or not covered by GHS - none

SECTION 3: Composition/information on ingredients

3.1 Substances

Formula	: CLi
Molecular weight	: 42.39 g/mol
CAS-No.	: 7447-41-8
EC-No.	: 231-212-3

Component	Classification	Concentration
Lithium chloride	Acute Tox. 4; Skin Irrit. 2; Eye Irrit. 2A; H302, H315, H319	<= 100 %

For the full text of the H-Statements mentioned in this Section, see Section 16.

SECTION 4: First aid measures

4.1 Description of first-aid measures

General advice

Show this material safety data sheet to the doctor in attendance.

If inhaled

After inhalation: fresh air.

In case of skin contact

In case of skin contact: Take off immediately all contaminated clothing. Rinse skin with water/ shower.

APÉNDICE E

Tablas de la ubicación de los termopares

Para tener un mejor panorama del equipo TTAPPA se necesita saber la ubicación de los termopares. Si en algún momento se necesitaran remover, para la tarjeta 1 la ubicación de los termopares es la siguiente:

Tarjeta 1

Canal	Ubicación
103	Entrada de agua de enfriamiento hacia el condensador auxiliar 2
104	Reserva
105	Reserva
106	Salida del absorbedor del circuito de la mezcla absorbente
107	Reserva
108	Entrada del absorbedor del circuito de la mezcla absorbente
109	Reserva
110	Salida del evaporador hacia el calor de desecho
111	Salida del absorbedor del agua destilada
112	Entrada del evaporador del refrigerante
113	Salida del condensador auxiliar 1 del agua destilada
114	Salida del condensador del refrigerante
115	Salir del evaporador del refrigerante
116	Entrada de la mezcla absorbente al economizador proveniente del absorbedor
117	Salida de la mezcla absorbente del generador hacia el economizador
118	Reserva
119	Reserva
120	Entrada del agua a destilar hacia el absorbedor

Para la tarjeta 2 la ubicación de los termopares es la siguiente:

Tarjeta 2

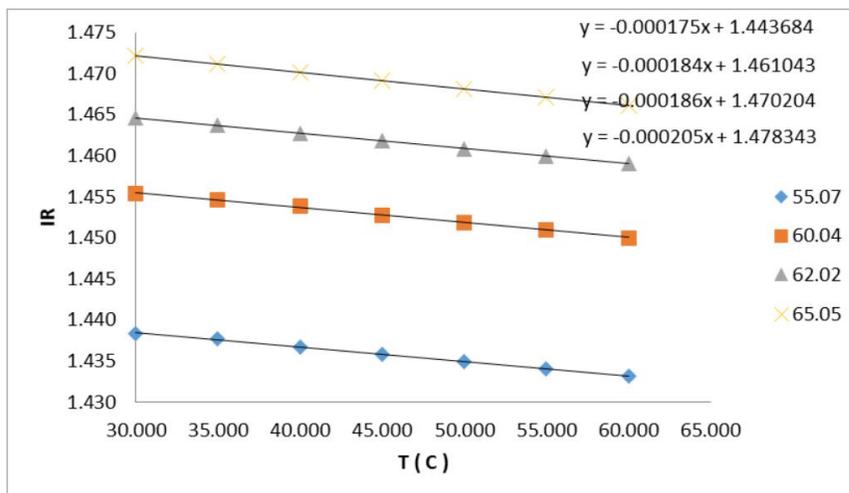
Canal	Ubicación
201	Reserva
202	Salida del agua de enfriamiento del condensador
203	Entrada hacia el condensador
204	Salida del calor de desecho del generador
205	Entrada al evaporador del calor de desecho
206	Reserva
207	Reserva
208	Salida del generador de la mezcla absorbente
209	Entrada de la mezcla absorbente al generador
210	Salida del refrigerante del generador
211	Salida de la mezcla absorbente del generador hacia el economizador
213	Entrada del condensador auxiliar 1 del agua purificada
214	Entrada del condensador del agua de enfriamiento
215	Entrada del generador del calor de desecho
216	Reserva
217	Salida del condensador auxiliar 2 del agua de enfriamiento
219	Salida del economizador de la mezcla absorbente hacia el generador

APÉNDICE F

Estimación de la concentración de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) e índice de refracción.

Correlación de la concentración de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) e índice de refracción. Para conocer la concentración de la solución cuaternaria en el generador y absorbedor en cada prueba experimental, se realizó una correlación por mínimos cuadrados entre las concentraciones de solución de 55% hasta 65% y el índice de refracción a una temperatura de 30 a 60 °C. Los datos obtenidos se muestran en la siguiente tabla y gráfica:

T	IR			
	55.07	60.04	62.02	65.05
30.00	1.438359	1.455438	1.464646	1.472227
35.00	1.437636	1.454632	1.463675	1.471170
40.00	1.436670	1.453852	1.462726	1.470145
45.00	1.435782	1.452762	1.461796	1.469130
50.00	1.434921	1.451854	1.460858	1.468107
55.00	1.434046	1.450929	1.459929	1.467084
60.00	1.433154	1.450005	1.459065	1.466081



La ecuación que se obtuvo se muestra a continuación

$$X_{\text{Cuaternaria}} = 11326(\text{IR})^2 - 32810(\text{IR}) + 23821$$

Para 60% a 65% a una temperatura de 40 °C [Torres 2017].

APÉNDICE G**Mantenimiento del Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de Agua**

Para realizar un mantenimiento que no altere las propiedades de la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O), se deben de seguir lo siguiente pasos:

1. Abrir las válvulas V2 y V1 para retirar vacío del equipo TTAPPA, mientras que al mismo tiempo se monitorea la disminución de esta y posteriormente cerramos las válvulas ya que no haya vacío para proseguir con el siguiente paso.
2. Retirar la mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O) del equipo mediante la apertura de la válvula de drenado que se ubica entre el generador y economizador, poner un recipiente que esté fabricado de vidrio para evitar derrames por el nivel de corrosión de la mezcla absorbente a la salida de válvula y se empezará a drenar toda solución contenida en el circuito correspondiente a la mezcla absorbente.
3. Abrir la válvula V2 y V1, conectar el compresor a la boquilla de la manguera que conecta a estas válvulas e introducimos presión no mayor 8 psi para retirar la mezcla absorbente sobrante que se encuentra en las tuberías del circuito. Al terminar de retirar toda la mezcla absorbente, dejamos de introducir presión y cerramos la válvula de drenado, y las válvulas V2 y V1.
4. Abrir la válvula V2 y V1, conectar la bomba de vacío a la boquilla de la manguera que conecta a estas válvulas y generar vacío no mayor a -14 psi. Posteriormente cerramos las válvulas V2 y V1.

5. Mediante un vaso de precipitado o recipiente graduado medir 3 litros de agua destilada. Posteriormente introducir la manguera que está conectada a la válvula de drenado al vaso de precipitado y abrir la válvula de drenado para que el agua destilada sea absorbida por el vacío que se encuentra en el interior del equipo.
6. Cerrar la válvula de drenado cuando el vacío disminuya, repetir el punto 4 hasta terminar de introducir los 3 litros de agua destilada. Al terminar de introducirlos, cerrar la válvula de drenado sin volver a generar el vacío en el equipo.
7. Encender la bomba B1, B2 y B3 para hacer recircular el agua destilada durante 30 minutos. Posteriormente, apagar la bomba B1, B2 y B3, drenar el agua destilada mediante la apertura de la válvula de drenado y la cerrarla ya que se haya drenado toda el agua destilada.
8. Se tienen que repetir los mismos pasos desde el punto 4 hasta el 7 hasta que se hayan introducido 9 litros de agua destilada para que el equipo tenga un funcionamiento óptimo al momento de operar.

APÉNDICE H

Calibración de termopares

Para la calibración de los termopares se tiene que realizar lo siguiente pasos:

1. Ordenar los termopares de la primera tarjeta, que van del canal 103 al 120 y para la segunda tarjeta, que van del canal 201 al 219, considerando que no están ubicados los termopares 212 y 218. Posteriormente, juntarlos de tal manera que no tengan contacto entre sí.
2. Preparar un recipiente con hielo granulado y aislarlo para evitar que aumente la temperatura, esperar a que la temperatura se estabilice 5 °C e introducir los termopares sin que tengan contacto entre ellos, junto con el termómetro estándar de referencia.
3. Configurar el programa Agilent BenchLink Data Logger para acortar el tiempo de cada escaneo y reducir el error de lectura. Posteriormente, iniciar el escaneo mediante el adquisidor de datos y el programa, y detener el programa hasta que se obtengan los datos en la temperatura correspondiente.
4. Preparar el baño termostático con aceite térmico para incrementar la temperatura a 10 °C, después dejar estabilizar entre 5 a 10 minutos e introducir los termopares y el termómetro estándar de referencia previamente secados.
5. Iniciar el escaneo mediante el adquisidor de datos y el programa. Posteriormente, detener el programa hasta que se tengan los datos necesarios de la temperatura correspondiente.

6. Incrementar la temperatura en intervalos de 10 °C con los controles del baño termostático hasta llegar a los 120 °C y en cada intervalo iniciar el escaneo mediante el adquisidor de datos y el programa.

APÉNDICE I

Calibración de transductores de presión

Para la calibración de los transductores de presión se tienen que realizar los siguientes pasos:

1. Desmontar los transductores de presión conectados al canal 101 y 102 que se ubican en la parte inferior de cada manovacuómetro.
2. Poner el calibrador de presión en su soporte y sujetarlo mediante cinchos de plástico para evitar cualquier movimiento inesperado. Posteriormente, verificar que las boquillas correspondientes estén completamente selladas para evitar pérdidas de vacío.
3. Conectar el manómetro calibrador de presión en la boquilla que se encuentra en el extremo derecho y después conectar en el extremo izquierdo el transductor de presión 101, teniendo en cuenta una reducción de diámetro $\frac{1}{2}$ a $\frac{1}{4}$ in por parte del transductor de presión.
4. Conectar la bomba de vacío en la boquilla restante para evitar fugas.
5. Iniciar la calibración del transductor de presión 101 mediante el encendido de la fuente, el adquisidor de datos junto con el programa, mediante incrementos en intervalos de 1 InHg hasta llegar a -22 InHg, considerando que 1 InHg = 0.4911 psi.
6. Retirar el transductor de presión 101 y sustituirlo por el transductor de presión 102. Posteriormente, se repite el mismo procedimiento.

APÉNDICE J

Tablas de la pendiente y la ordenada al origen de los termopares y transductores de presión

La siguiente tabla muestra la pendiente y la ordenada al origen dada por la ecuación $y=mx+b$ de cada transductor de presión y termopar que está en la tarjeta 1:

Tarjeta 1		
Canal	m	b
101	- 9.6971	31.286
102	- 12.44	36.14
103	0.9995	0.3226
104	1.0034	- 0.4375
105	1.0031	- 0.2953
106	1.0099	- 0.6579
107	1.0038	- 0.3877
108	1.0029	- 0.3828
109	1.0001	0.0405
110	1.0035	- 0.3735
111	1.0022	- 0.2962
112	1.0047	- 0.2569
113	1.0009	0.0694
114	1.0031	- 0.1265
115	1.0029	- 0.1385
116	1.0087	- 0.2139
117	1.0034	0.0161
118	1.0044	0.0674
119	1.0016	0.3139
120	1.0021	0.2294

La siguiente tabla muestra la pendiente y la ordenada al origen dada por la ecuación $y=mx+b$ de cada termopar que está en la tarjeta 2:

Tarjeta 2

Canal	m	b
201	1.0046	- 0.7693
202	1.0037	- 0.8664
203	1.0076	- 0.9806
204	1.0038	- 0.9193
205	1.0155	- 1.4371
206	1.0037	- 1.1069
207	1.0035	- 0.9689
208	1.0035	- 0.951
209	1.0031	- 0.9472
210	1.0044	- 0.9707
211	1.0037	- 0.9452
213	1.0029	- 0.7896
214	1.0049	- 0.8911
215	1.0029	- 0.7594
216	1.0058	- 0.702
217	1.0036	- 0.5985
219	1.005	- 0.7587

APÉNDICE K

Arranque del Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de Agua

Posteriormente que se hayan llenado los depósitos con los niveles adecuados y colocarse el equipo de seguridad (Bata, botas y Lentes de seguridad), se inicia con el arranque del equipo con los siguientes pasos a seguir:

1. Verificar que los circuitos estén en orden, que los termopares estén en su respectivo lugar y que los transductores de presión estén puestos correctamente. También verificar que el equipo se encuentra aislado para que no haya pérdidas de calor.
2. Se debe encender la fuente de los transductores de presión. Posteriormente se enciende el adquisidor de datos y se configura el programa Agilent BenchLink Data Logger para visualizar el comportamiento, la temperatura y el vacío que se encuentra en el equipo.
3. Abrir la válvula V1 y V2 del circuito principal que se ubican en la parte inferior de cada transductor de presión. La manguera que se encuentra conectada a las válvulas se conecta a la bomba de vacío y se genera una el vacío de -22 InHg. Al terminar de alcanzar el vacío óptimo, se cierran las válvulas V1 y V2 para mantener la condición de operación.
4. Encender la bomba B5 del calor de desecho y se ajustan los flujómetros F5 y F6, Posteriormente, se encienden las bombas B1 y B2 del circuito de la mezcla absorbente y se ajustan los flujómetros F1 y F2.
5. Encender la resistencia 1 y la resistencia 2 y mediante el Variac ajustar la potencia de la resistencia 1 a 400 watts equivalente a 7.4 amp.

6. Encender la bomba B6 correspondiente al circuito del agua destilar y ajustar el flujómetro F8.

7. Encender bomba B3 correspondiente a la recirculación de la mezcla absorbente del generado y ajustar el flujómetro F3 a su máximo nivel.

8. Encender la bomba B7 del circuito de enfriamiento y ajustar el flujómetro F7 a 6 L/min.

APÉNDICE L

Operación del Transformador Térmico por Absorción Para Purificación de Agua

Para la operación del equipo TTAPPA se necesita tener trabajando los circuitos principales que intervienen en él, el monitoreo constante de las variables implicadas y seguir los siguientes pasos:

1. Controlar y monitorear los flujómetros F1, F2 y F3 correspondientes al circuito de la mezcla absorbente, ajustar cuando sea necesario por cualquier cambio inesperado, hasta alcanzar el estado estable.
2. Controlar los flujómetros F5 y F6 correspondientes al calor desecho y monitorear la temperatura de los termopares T205 y T215 que no sobrepase los 75 °C. Cuando alcance esta temperatura, apagar el Variac.
3. Encender la bomba B4 y ajustar el flujómetro F4 para dejar pasar la mezcla absorbente proveniente del generador.
4. Cuando el equipo alcance el estado estable, recolectar el agua destilada colocando un recipiente limpio a la salida del condensador auxiliar 2 y tapanlo de inmediato cuando se recolecte para evitar alguna contaminación del agua destilada.
5. Cuantificar el agua destilada mediante el peso y el tiempo de salida del condensador auxiliar 2.
6. Extraer muestras de la mezcla absorbente ($\text{LiBr} + \text{LiI} + \text{LiNO}_3 + \text{LiCl} + \text{H}_2\text{O}$) del generador y absorbedor del punto de muestro 1 y 2 ubicados a las salidas de estos componentes.

APÉNDICE M

Ecuación general de pérdidas de energía

La ecuación general de energía agrupa el total de energías que pueden existir entre dos puntos [Mott 2013]:

$$Z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + h_A - h_R - h_L = Z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g}$$

Para el circuito de la mezcla absorbente se considera que $Z_1 = 0$ y $v_1 = v_2$:

$$\frac{P_1}{\rho g} + h_A - h_R - h_L = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g}$$

Considerando que $h_R = h_A = 0$ dado que en el tramo de tubería no existen dispositivos mecánicos:

$$\frac{P_1}{\rho g} - h_{L \text{ totales}} = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g}$$

La carga de presión $\left(\frac{P_2}{\rho g}\right)$ pasa restando a la carga de presión $\left(\frac{P_1}{\rho g}\right)$:

$$\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} - h_{L \text{ totales}} = Z_2$$

Pasa sumando la pérdida de energía por fricción y accesorios ($h_{L \text{ totales}}$) a la altura (Z_2):

$$\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g} = h_{L \text{ totales}} + Z_2$$

Se extrae el factor común de $\frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}$:

$$\frac{1}{\rho g} (P_1 - P_2) = h_{L \text{ totales}} + Z_2$$

Pasa multiplicando ρg a $h_{L \text{ totales}} + Z_2$:

$$P_1 - P_2 = (h_{L \text{ totales}} + Z_2)\rho g$$

Las caídas de presión de cada fluido se determinan mediante las pérdidas de energía por fricción y accesorios, finalmente la ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$\Delta p = (h_{L \text{ totales}} + Z_2)\rho g$$

APÉNDICE N

Factor de fricción por perdidas de altura y longitud equivalente en diámetros de tubería mediante accesorios.

Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción f_r	Tamaño nominal de la tubería (pulg)	Factor de fricción f_r
1/2	0.027	3 1/2, 4	0.017
3/4	0.025	5	0.016
1	0.023	6	0.015
1 1/4	0.022	8 – 10	0.014
1 1/2	0.021	12-16	0.013
2	0.019	18-24	0.012
2 1/2, 3	0.018		

Tabla N.1 Factor de fricción mediante tamaño nominal de tubería [Mott 2013].

Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería $\left(\frac{L_e}{D}\right)$
Válvula de globo—abierta por completo	340
Válvula de Angulo—abierta por completo	150
Válvula de compuerta—abierta por completo	8
— 3/4 abierta	35
— 1/2 abierta	160
— 1/4 abierta	900
Válvula de verificación—tipo giratorio	100
Válvula de verificación—tipo bola	150
Válvula de mariposa—abierta por completo, 2 a 8 pulg	45
—10 a 14 pulg	35
—16 a 24 pulg	25
Válvula de pie—tipo disco de vástago	420
Válvula de pie—tipo disco de bisagra	75
Codo estándar a 90°	30

Tabla N.2 Longitud equivalente en diámetros de tubería [Mott 2013].

BIBLIOGRAFÍA

Albertí A.M. (2015). Estudio de la viabilidad técnica y económica de la desalinización de agua de mar mediante unidades autónomas de ósmosis inversa, Memoria de trabajo, UPC.

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

Campayo G. I. (2019). Análisis técnico-económico de una planta de desalación de agua salobre mediante electrodiálisis.

Chang J., Zuo, J., Lu, K. J., & Chung T. S. (2016). Freeze desalination of seawater using LNG cold energy. *Water research*, 102, 282-293.

Demesa N., Hernandez J.A., Siqueiros J., Garcia J.C., Huicochea A.R. (2015). Improvement of the performance of an absorption heat transformer through a single effect process to obtain freshwater. *Applied Thermal Engineering*, Volume 78, pp. 162 - 171.

Flores F.O. (2016). Análisis teórico – experimental del coeficiente de transferencia de calor en un evaporador helicoidal de tubos concéntricos integrado a un transformador térmico, Tesis de Doctorado, UAEM.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). AQUASTA. database. Retrieved September 2021. <http://www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=en>.

Garcia-Gutierrez A., Barragán A. M., Arellano V. M. (2008). Investigación y desarrollo tecnológico sobre bombas de calor en México operando con energía geotérmica.

Hernández S.A. (2016). Análisis teórico – experimental de la transferencia de energía en un condensador helicoidal de tubos concéntricos vertical, utilizado en un transformador térmico que opera con solución carrol – agua. Tesis de Doctorado, UAEM.

Huicochea R.A. (2009). Estudio teórico - experimental de un sistema portátil para purificación de agua integrado a un transformador de calor, Tesis de Doctorado, UAEM.

Ibarra-Bahena J., Romero R.J., Cerezo J., Valdez-Morales C.V., Galindo-Lunaa Y.R., Velazquez-Avelar L. (2014). Experimental assessment of an absorption heat transformer prototype at different temperature levels into generator and into evaporator operating with water/Carrol mixture. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 60, pp. 275 - 283.

International Desalination Association (IDA). (2017). GWI DesalData/IDA. Retrieved September 2019. <https://www.globalwaterintel.com/staticfilecontainers>.

Koo K. K., Lee H. R., Jeong S., Oh Y. S., Park D. R. and Back Y. S. (1999). Solubility, vapor pressures, and heat capacities of the wáter + lithium bromide + lithium nitrate + lithium Iodide + Lithium Chloride system. *International Journal of Thermophysics*. 20(2), 589-599.

Latorre M. (2004). Costes económicos y medioambientales de la desalación de agua de mar. IV Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua. Tortosa.

Moreno, O. B. (2004). La desalinización del agua Tesis de Licenciatura, Universidad de Sevilla.

Mott Robert L. (2013). *Mecánica de Fluidos*. México D.F. Pearson-Prentice Hall. Ed. 6.

Parham K., Yari M., Atikol M. (2013). Alternative absorption heat transformer configurations integrated with water desalination system. *Desalination*, Volume 328, pp. 74 - 82.

Pradillo B. (2019). Estrés del agua. Sitio web: iagua <https://www.iagua.es/blogs/beatriz-pradillo/estres-agua>.

Romero, R.G. (2019). Estrés Hídrico en el mundo. Estrategia sustentable. <https://www.estrategia-sustentable.com.mx/2019/12/02/estres-hidrico-en-el-mundo/> .

Salgado P. M. (2018). Incremento de purificación de agua en un transformador térmico por absorción utilizando (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O), Tesis de Maestría, UAEM.

Santoyo S., Siqueiros J., Heard C., Santoyo E. (1996). Bomba de calor por absorción integrada a un sistema de purificación de efluentes. Boletín IIE, septiembre-octubre. México.

Santoyo-Gutiérrez S., Barragán-Reyes R.M., Holland F.A. (2007). Bomba de calor para purificación de salmuera geotérmica. Revista mexicana de geoenergía, Volumen 20, pp. 41-52.

Sanz, B. M. (2018). El crecimiento de la población y la escasez hídrica. In Congreso Nacional del Agua Orihuela: Innovación y Sostenibilidad (pp. 509-519). Universitat d'Alacant/Universidad de Alicante.

Torres D.T. (2017). Estudio experimental de un transformador térmico integrado a un sistema de purificación de agua utilizando (LiBr+LiI+LiNO₃+LiCl+H₂O), Tesis de Doctorado, UAEM.

UNESCO. (2021). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2021: el valor del agua, Programa Mundial de la UNESCO de Evaluación de los Recursos Hídricos [536]. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000378890>.

Velasco, J. G. (2009). Energías renovables. Reverte.

WATER, U. (2016). 3er Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo: El agua en un mundo en constante cambio. Informe.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGI certificado en la norma ISO 9001:2015 e ISO 21001:2018

FORMATO T4
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR

Cuernavaca, Mor., a 1° de marzo de 2023

DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ
DR. VÍCTOR MANUEL VELÁZQUEZ FLORES
DR. DAVID JUÁREZ ROMERO
DRA. LAURA IRENE MORALES GÓMEZ
DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO
P R E S E N T E

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de: **TESIS**
Titulado: **Caídas de presión de un sistema térmico integrado a un sistema de purificación de agua y análisis de reciclo de mezcla absorbente (LiBr+LiI+LiNO₃ +LiCl+H₂O) y (LiBr+H₂O).**

Que presenta (el) o (la) **C. ISAAC RODRIGUEZ AVILEZ.** Del programa educativo de: **LICENCIATURA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA

Se anexa firma electrónica

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQel
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

VOTO	NOMBRE	FIRMA
	DR. ROBERTO FLORES VELÁZQUEZ	
	DR. VÍCTOR MANUEL VELÁZQUEZ FLORES	
	DR. DAVID JUÁREZ ROMERO	
	DRA. LAURA IRENE MORALES GÓMEZ	
	DRA. MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO	

El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas

VALH/fmg

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

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2023-03-02 15:43:45 | Firmante

fQwrPoWWSBF+RY0SC/jtXc0JlzE66vYPg+ZurSTPMHTcWylKLZPa0TQCGKYUATzLSsfsu4HLz1OzG0E+bIXvr15r8sffgK9WrG1S7YHovV0GtimuuCFLbTIB3jUwsYvf5tmi/8skH
PHODCiTx/fMXxAju5g1hSo6PZcdh/JuxeRDYoutb+FQApRfHjHgXN8D4Vmw6249BHw9UTVZjVvdphMkvzajP07IMqls/Cvc7fznPh3iqSgCiYLOu6zVrEMibrs9k48F2ztjf2nJmYcnk
+GeGS1dtHbFAnMkTtCLTRTXoNmVTWnKxvw2gSFdSw2CDy50hrqsuxP8FlqAoSMw==

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



[XqESL5oF7](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/kv0cLpbGUKIpuCL9SRU0ol2WRBmajSMY>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

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

DAVID JUAREZ ROMERO | Fecha:2023-03-06 19:59:33 | Firmante

AD//7BjO8RprvAVRdQMkny0Og6ci+RvCSeg7gwFaeg5C2Zd0lWBdCC5s417UvXD1GCM63NdiuxtEsGvT8O1UuVhRqfy4MzqYiEkJ4HTzQ7R8tJtEtHsIP1HY0XAONDF6x+Yrlcxtweyq9SgCiSACAsrDgGIEuh5Gt58VKeK/03w9Adi44kUM7B9s3k3+HxrlOw+brSQZuOkqRAkogLOWr3OMYySqwqon2d4JIU3RaFIaGpPQ7yY5/f6+VQtRAiTKYylz2zb/gdYpDJPX8XpNN5MTFFiBUIzZtNEX1v/H34U+9J757TtWh68yQa0GZdXoCuqkkoLcS40S9tkUI5gC==

ROBERTO FLORES VELAZQUEZ | Fecha:2023-03-15 12:25:10 | Firmante

Uc/XlkGUK4ATnjcACqzjWTOm+KVbgZxeVO6Fz9guUZrpwovt1sh+GNeWVFDNM/okRUtOWZiapXfiZB4MEOCf4oZ984mCDJODe4V4EpHplULX5y3rOqINDOjDa8Y24nKSFvcQjfW1oYn/oVXay6+MjKtOSXfyxBpjEH0AP5hPsXA8Ylwt3WEHsphC26Mir/Wc8hGxRMV1dXpRzyybHq6VJy1dQJd2mZnYd/1F85bLcAXP2vWGcEXYssImdxlbgKRaMY8G66JlFREqLkpZKuXh4sS/ej2pVEOITEP7g+qMaO+etP10lb2X1dMA8TMnSIOQ85SMY+FmdxitpF1pg3Vw==

MIRIAM NAVARRETE PROCOPIO | Fecha:2023-03-22 13:03:07 | Firmante

B/xbmLQaK+V/4gx2x4AFMTKebhrH9CV+tQN7eFrL9ZZN/1MzbNyAWDMFrm8ITCcS/dBtHEJLwexML8+RY4QUvbm6HOxWnuOWu+OgB0CtToJ2HsA4xF0JfvDlkwhitiimBZclw8hfmXdyqzkuFjTPaRjzW0scFBN9glSsDwoPZuFzKilmtk95i4VSGlGCrLHQuq1Pr6nQZpRILQcCwBBnY7r+PkIEPHOHtrUmKlBnSd/t/aeuhCFIupBXsCm8xfrLUIBhliapPeTk4GE8CECPBlxv0cXFraYD8G7GWJYtopSa5F8778ev9TMZ32U9ejfkXkJ6/xjf2Zb7U9dQ==

VICTOR MANUEL VELAZQUEZ FLORES | Fecha:2023-03-23 18:08:39 | Firmante

1dVmjmdxF55z00a3RZECdLTYd1nOCHqq9LXvSxbAdYgie8pvVzYXEWwP1epQHMyP3/mTaFyVWVGQ3bb9RBAZ6HAK1h+3wpx7rKcOw7FqFISufBi+SMDiUe3EW0otDAJdEBxPcQiuCAj2dKU8BoC43snQptSLmplILLSDLCCZINKkzwSCGRvpf8vhQTGwtJGIWT2Q/sAXt+oh+g6l58C8HRVfFL53AbFVDpbMt8Hw1RppB3ZKuzyr8rHETUxEXSTKMLsISHCqBstEZKXDach5ShCqrpdpIyXXdLTDxHq/a12tULk5FvI3CvcX64h1YZKmlwzJcu2QF+To4WbfeFW2PZQ==

LAURA IRENE MORALES GOMEZ | Fecha:2023-05-02 11:44:29 | Firmante

QEWS0PMcyJg8KdV5JX4Xk7aTM37M/CI5QdppbFD7Nt/vAtdjGTN3wujc8/kn2MFZt+b/4QjRtaCd4ZDJW8rNdf+e6Jy9Gmc7lafhZ2ckwJfxkOvgIn7Qx3c+WmQDa2NMhzn7oZ0pcRu7smWqJdN5ipM7PWU+PWYIKW1nFJrLppglwZ68c1u/tVEozb5iQh+g4vdlSFXVTUuJYy9kZnaXejMKMNER+jEjuTBq3+3UoZHgSkPeW0AGcqmHt/tPuRcSnOSQz2xWv3Hli mTgSzzgMRjP6JAG36lbsJb9jHiYI+NyCO9MWayHY+3jgUMEM9c2qbGhRXul8UMyXdZLohw==

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



Lse6FufZb

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/LD8b4OaQr0OeoK2VsHEBtWdhrWPmXALP>

