



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

**Determinación De La Composición de Soluciones Acuosas Usadas En Un
Trasformador Térmico Y Análisis del Efecto de La Transferencia de Masa en el
Proceso De Absorción**

TESIS PROFESIONAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS CON OPCIÓN
TERMINAL EN TECNOLOGÍA QUÍMICA**

PRESENTA:

M.I.C.A. JOSÉ LUIS LABRA LIBORIO

ASESOR:

DR. DAVID JUÁREZ ROMERO

SINODALES:

DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ

DRA. SUSANA SILVA MARTÍNEZ

DR. ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS

DR. ARMANDO HUICOCHEA RODRÍGUEZ

DR. JESÚS TORRES MERINO

DR. JAVIER SIQUEIROS ALATORRE

CUERNAVACA, MORELOS

AGOSTO 2019



INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
Jefatura de Posgrado en Ingeniería y Ciencias Aplicadas



Cuernavaca, Morelos, 23 de mayo de 2019.

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

Atendiendo a la solicitud para emitir DICTAMEN sobre la revisión de la tesis titulada "Determinación De La Composición de Soluciones Acuosas Usadas En Un Transformador Térmico Y Análisis del Efecto de La Transferencia de Masa en el Proceso De Absorción" que presenta el alumno JOSÉ LUIS LABRA LIBORIO, para obtener el título de DOCTORADO EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS con opción terminal en TECNOLOGÍA QUÍMICA.

Nos permitimos informarle que nuestro voto es:

NOMBRE	DICTAMEN	FIRMA
DR. SUSANA SILVA MARTÍNEZ	APROBADO	
DR. JESÚS TORRES MERINO	APROBADO	
DR. ARMANDO HUICOHEA RODRÍGUEZ	Aprobado	
DR. ALBERTO ARMANDO ÁLVAREZ GALLEGOS	Aprobado	
DR. JAVIER SIQUEIROS ALATORRE	Aprobado	
DR. JOSÉ ALFREDO HERNÁNDEZ PÉREZ	Aprobado	
DR. DAVID JUÁREZ ROMERO	Aprobado	

PLAZO PARA LA REVISIÓN 20 DÍAS HÁBILES (A PARTIR DE LA FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO)

NOTA. POR CUESTIÓN DE REGLAMENTACIÓN LE SOLICITAMOS NO EXCEDER EL PLAZO SEÑALADO, DE LO CONTRARIO LE AGRADECEREMOS SU ATENCIÓN Y NUESTRA INVITACIÓN SERÁ CANCELADA.

RESUMEN

Para determinar la concentración de la solución LiBr-H₂O se obtuvieron datos experimentales de propiedades físicas que dependen de la concentración: a) conductividad eléctrica, b) índice de refracción, c) densidad y d) velocidad del sonido de la solución de LiBr a diferentes temperaturas y concentraciones. Los resultados obtenidos experimentalmente, presentan una adecuada concordancia con los datos experimentales publicados previamente. Las discrepancias van desde un 0.2 % hasta un 13 %, esto se debe al procedimiento para llevar a cabo la medición y al instrumento de mediciones empleado.

Se proponen correlaciones semiempíricas que determinan la concentración del LiBr, como una función de la temperatura y de la propiedad física medida. Las correlaciones son validadas para el intervalo de operación de los transformadores térmicos por absorción (TTA).

Dadas las alternativas de medición de propiedades físicas de la solución LiBr-H₂O, se ha seleccionado la técnica de la Conductimetría Eléctrica, como método confiable para determinar la concentración de la solución de LiBr-H₂O en los TTA. El instrumento de medición requiere poco volumen de muestra y puede ser instalado en línea. Se desarrollaron pruebas experimentales de mediciones de conductividad eléctrica y temperatura a la salida del generador, bajo las condiciones de operación de un TTA.

ABSTRACT

To determine the concentration of the LiBr-H₂O solution, we obtained experimental data of physical properties that depend on the concentration: a) electrical conductivity, b) refractive index, c) density and d) sound speed of the LiBr solution at different temperatures and concentrations. The results obtained experimentally show an adequate concordance with previously published experimental data. The discrepancies range from 0.2% to 13%, this is due to the procedure to carry out the measurements and the instrument used.

Semi-empirical correlations are proposed that determine the LiBr concentration, as a function of the measured physical temperature and property. The correlations are validated for the operation interval of the thermal transformers by absorption.

Given the alternatives for measuring the physical properties of the LiBr-H₂O solution, the technique of electrical conductimetry has been selected as a reliable method to determine the concentration of the LiBr-H₂O solution in thermal transformers. The measuring instrument requires little sample volume and can be installed online. Experimental tests were developed to measure the electrical conductivity and temperature at the generator output, under the operating conditions of a thermal transformer by absorption.

AGRADECIMIENTOS

Al **Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAp)**, por la estancia de la realización de mis estudios de doctorado en las instalaciones.

Al Dr. Javier Siqueiros Alatorre por brindarme una oportunidad de alcanzar la formación profesional, la confianza y el apoyo para la realización del presente proyecto.

Al Dr. Dr. David Juárez Romero por la paciencia, consejos, motivación y dedicación durante el tiempo de estancia en el laboratorio de Térmica Aplicada del CIICAp; a quien agradezco en gran parte este logro adquirido en mi formación profesional.

A mis amigos: Horacio, Oliver, Miguel, Noé, Aldo, Javier, Jordi, Irán, Israel a quienes aprecio, admiro y valoro, gracias por los consejos, el apoyo manifestado en todo momento y sobre todo por haber compartido grandes momentos inolvidables durante todo este tiempo.

DEDICATORIA

A mis Padres

Agustín Labra García

Ana Lilia Liborio García

A mi Familia

Esposa Andrea Olvera Rosas

Hijas Emíreth y Elsy Labra Olvera

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 Instrumentos de Medición.

1.1	Introducción	01
1.2	Métodos Electroanalíticos	02
1.3	Métodos Espectroscópicos	04
1.4	Selección de un Método Analítico	06
1.5	Justificación	07
1.6	Objetivo General	08
1.7	Objetivos Específicos	08
1.8	Estructura de Trabajo	09

CAPÍTULO 2 Equipos Experimentales de Mediciones de Propiedades

Para la Solución LiBr-H₂O.

2.1	Introducción	11
2.2	Preparación de la Solución LiBr-H ₂ O	14
2.3	Intervalo de Medición de Propiedades	15
2.4	Principio de Medición de las Propiedades	16
2.4.1	Conductividad Eléctrica	16
2.4.2	Densidad y Velocidad del Sonido	17
2.4.3	Índice de Refracción	17
2.5	Instrumentación y Procedimiento Experimental	18
2.5.1	Conductividad Eléctrica	18
2.5.2	Densidad y Velocidad del Sonido	20
2.5.3	Índice de Refracción	21

CAPÍTULO 3 Determinación de la Concentración mediante la Conductividad Electrica y Temperatura.

3.1	Introducción	23
3.2	Conductividad Electrica	24
3.3	Principios de Medición	27
3.4	Mediciones de Conductividad Electrica	29
3.4.1	Medición de Conductividad por Contacto	29
3.4.2	Medición de Conductividad de no Contacto	31
3.5	Efecto de la Temperatura de la Conductividad Electrica	32
3.6	Efecto de la Concentración en la Conductividad Electrica	33
3.7	Ecuaciones para Calcular la Conductividad Electrica	34
3.7.1	Ecuación de Casteel-Amis	35
3.7.2	Ecuación de Falkenhagen	36
3.7.3	Ecuación de Wishaw-Stokes	37
3.7.4	Ecuación de Della Monica	37
3.7.5	Ecuación de Diego	38

CAPÍTULO 4 Análisis y Discusión de Datos Experimentales

4.1	Introducción	40
4.2	Comparación de Datos Experimentales vs Datos Reportados en la Literatura	41
4.2.1	Conductividad Electrica	41
4.2.2	Indice de Refraccion	42
4.2.3	Densidad	43
4.2.4	Velocidad del Sonido	44
4.3	Resultados y Discusión de Datos Experimentales	45

4.3.1 Conductividad Electrica	45
4.3.2 Indice de Refraccion	48
4.3.3 Densidad	50
4.3.4 Velocidad del Sonido	52

CAPÍTULO 5 Determinación de la Concentración en un Transformador Térmico

5.1 Introducción	56
5.2 Transformador Térmico por Absorción Convencional	57
5.3 Descripción del Transformador térmico por absorción	58
5.4 Ciclo de Absorción en un Transformador Térmico	60
5.5 Instalación de la Técnica de Conductimetría en el Transformador Térmico por Absorción	61
5.6 Pruebas Experimentales	64

CAPÍTULO 6 Conclusiones y Recomendación

6.1 Conclusiones	66
6.2 Recomendaciones	68

REFERENCIAS 70

APÉNDICES

APÉNDICE A Calibración del Conductímetro Eléctrico	76
--	----

ANEXOS

Anexo 1	
Producción Científica	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Propiedades de la Solución LiBr-H ₂ O	12
Tabla 2.2	Especificaciones del Sensor de Conductividad	19
Tabla 3.1	Mediciones de Conductividad Eléctrica y Temperatura de Soluciones	24
Tabla 3.2	Constante de Celda Sensor de Conductividad Eléctrica	27
Tabla 3.3	Compensación de Temperatura para Disoluciones	32
Tabla 3.4	Conductividad Eléctrica Individual	34
Tabla 4.1	Datos Experimentales de Conductividad Eléctrica de la Solución de LiBr	46
Tabla 4.2	Coeficientes A, B, C para la Ecuación propuesta de Conductividad Eléctrica	48
Tabla 4.3	Datos Experimentales de Índice de Refracción de la Solución de LiBr	48
Tabla 4.4	Coeficientes A, B, C para la Ecuación propuesta de Índice de Refracción	50
Tabla 4.5	Datos Experimentales de Densidad de la Solución LiBr	50
Tabla 4.6	Coeficientes A, B, C para la Ecuación propuesta de Densidad	52
Tabla 4.7	Datos Experimentales de Velocidad del Sonido de la Solución LiBr	52
Tabla 4.8	Coeficientes A, B, C para la Ecuación propuesta de Velocidad del Sonido	54
Tabla 5.1	Condiciones de Operación del GE-CO	64
Tabla 5.2	Datos Experimentales de Conductividad Eléctrica y	

Temperatura	65
-------------	----

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Proceso de Medición de una Muestra	01
Figura 1.2	Clasificación de Métodos Electroanalíticos	03
Figura 1.3	Espectro Electromagnético	04
Figura 1.4	Longitud de Onda y Temperatura de la Radiación	05
Figura 2.1	Diagrama de Operación de la Solución LiBr-H ₂ O	11
Figura 2.2	Reactivo LiBr	14
Figura 2.3	Medición de la Concentración del LiBr-H ₂ O	15
Figura 2.4	Sensor de Conductividad Crison Basic 30	18
Figura 2.5	Termómetro de Precisión MKT 100 Anton Paar	19
Figura 2.6	Medición Experimental de Conductividad Eléctrica	20
Figura 2.7	Analizador de Densidad y Velocidad del Sonido	21
Figura 2.8	Refractómetro Anton Paar Abbemat RXA 170	22
Figura 3.1	Electrodos de una Celda de Medición	25
Figura 3.2	Movimiento de Iones en la Disolución	28
Figura 3.3	Medición de Conductividad por Contacto	30
Figura 3.2	Medición de Conductividad por no Contacto	31
Figura 4.1	Comparación de valores reportados vs valores reportados Por Fried Segal	42
Figura 4.2	Comparación de valores reportados vs valores reportados Por Zaltash & Ally	43
Figura 4.3	Comparación de valores reportados vs valores reportados Por Fried Segal, Lee et al and Wimby & Berntsson	44
Figura 4.4	Comparación de valores reportados vs valores reportados	

	Por Rohman	45
Figura 4.5	Conductividad Electrica del LiBr-H ₂ O a diferentes Temperaturas y Concentraciones	47
Figura 4.6	Indice de Refracción del LiBr-H ₂ O a diferentes Temperaturas y Concentraciones	49
Figura 4.7	Densidad del LiBr-H ₂ O a diferentes Temperaturas y Concentraciones	51
Figura 4.8	Velocidad del Sonido del LiBr-H ₂ O a diferentes Temperaturas y Concentraciones	53
Figura 4.9	Normalización de la Conductividad Electrica, Densidad e Indice de Refracción	55
Figura 5.1	Ciclo Termodinámico de un Transformador Térmico	57
Figura 5.2	Diagrama de Flujo del TTA-DA	59
Figura 5.3	Transformador Térmico por Absorción	61
Figura 5.4	Celda de Conductividad Signet 2823-1	62
Figura 5.5	Conductímetro Eléctrico Signet 5800CR	62
Figura 5.6	Instalación de Celda de Conductividad Electrica	63

Nomenclatura

A	Superficie de electrodos
AB	Absorbedor
c	Concentración
CO	Condensador
DC	Corriente continua
EC	Economizador
EV	Evaporador
G	Conductancia
GE	Generador
IR	Infrarrojo
k	Conductividad eléctrica
L	Distancia de electrodos
M	Concentración molar
mA	miliampers
MKT	Milikelvin
N	Concentración normal
nD	Indice de refracción
Pt	Platino
R	Resistencia
RF	Radiofrecuencias
Rx	Resistencia de la solución
S	Siemens
T	Temperatura
TTA	Transformador Térmico por Absorción
μS	Microsiemens
UV	Ultravioleta
v	Velocidad del sonido

Subíndices

cell celda

sol solución

max máxima

GE generador

CO condensador

Letras Griegas

α Coeficiente de compensación de temperatura

γ Rayos gama

ε Constante dieléctrica

η Viscosidad

λ Longitud de onda

ρ Densidad

Λ Conductividad molar

CAPÍTULO 1

Instrumentos de Medición

1.1 Introducción

La Química Analítica se ocupa de los métodos empleados para la identificación y determinación de la composición química de diferentes sustancias. Para lograr su objetivo, es necesario llevar a cabo análisis cualitativos y cuantitativos. El primero revela la identidad de los elementos y compuestos presentes en la muestra; mientras que el segundo determina la cantidad de cada sustancia presente en la muestra (Skoog *et. al.*, 2000).

Los métodos empleados para la identificación y determinación de sustancias presentes en la muestra se clasifican en:

- Métodos Electroanalíticos
- Métodos Espectroscópicos

El principio de los instrumentos de medición de análisis químico radica en transformar la información relacionada con las propiedades físicas o químicas del analito (componente de la sustancia), en información que puede ser manipulada e interpretada por un ser humano. Por tanto, un instrumento de medición puede considerarse como un dispositivo de comunicación entre el sistema objeto de estudio y el científico, Figura 1.1.



Figura 1.1 Proceso de Medición de una Muestra.

1.2 Métodos Electroanalíticos

Los métodos electroanalíticos incluyen una variedad de métodos electroquímicos para obtener información acerca de la composición de la muestra y de su naturaleza molecular. Todos tienen en común el uso de celdas con electrodos, poseen de buena a excelente sensibilidad, excelente precisión, poca resolución y selectividad (Settle 1997).

El principio de los métodos analíticos radica en la medida de potencial, corriente o carga en una celda electroquímica, la cual sirve como señal analítica. Aunque solo hay tres fuentes principales para la señal analítica: potencial, corriente y carga, es posible una amplia variedad de diseños experimentales. La división más simple es entre los métodos en el seno de la solución, que miden las propiedades de toda la solución, y los métodos de interface, en los que la señal es una función de los fenómenos que ocurren en la interfaz entre un electrodo y la solución en contacto con el electrodo (Figura 1.2).

La medición de la conductividad de una solución, que es proporcional a la concentración total de iones disueltos, es un ejemplo de un método electroquímico en el seno de la solución. Una determinación de pH usando un electrodo de pH es un ejemplo de un método electroquímico de interface. Las mediciones electroquímicas se realizan en una celda electroquímica, que consta de dos o más electrodos, además de componentes electrónicos asociados para controlar y medir la corriente y el potencial.

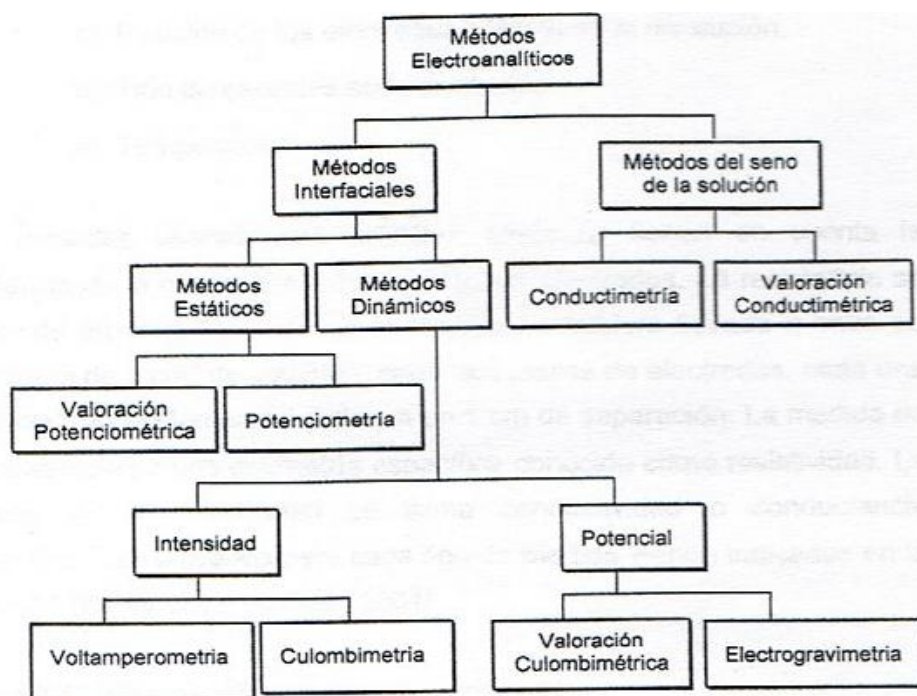


Figura 1.2 Clasificación de Métodos Electroanalíticos (Settle 1997).

La celda electroquímica más simple utiliza dos electrodos. El potencial de uno de los electrodos es sensible a la concentración del analito y se denomina *electrodo de trabajo*. El segundo electrodo, que se llama *contraelectrodo*, sirve para completar el circuito eléctrico y proporciona un potencial de referencia contra el cual se mide el potencial del electrodo de trabajo. Idealmente, el potencial del contraelectrodo permanece constante, de modo que cualquier cambio en el potencial de la celda global se atribuye al electrodo de trabajo. En un método dinámico, donde el paso de la corriente cambia la concentración de las especies en la celda electroquímica, el potencial del contraelectrodo puede cambiar con el tiempo (Harvey 2000).

1.3 Métodos Espectroscópicos

Los métodos de análisis que se basan en la medición de la luz y otras formas de radiación electromagnética son los que más se utilizan en la química analítica. La espectroscopia es una ciencia que estudia las interacciones que suceden entre la radiación y la materia.

Los métodos espectroscópicos miden la cantidad de radiación producida o absorbida por las especies atómicas o moleculares que se analizan. Estos métodos también se clasifican de acuerdo con la región del espectro electromagnético (Figura 1.3), que se utiliza para hacer la medición. Estas regiones incluyen los rayos gamma (γ), X, ultravioleta (UV) visible, Infrarrojo (IR), las microondas y radiofrecuencias (RF).

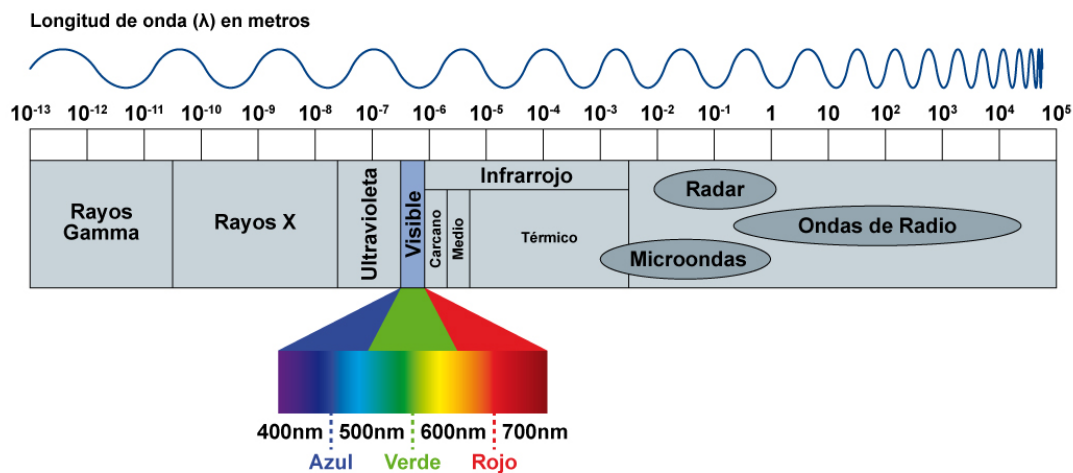


Figura 1.3 Espectro Electromagnético.

Además de la radiación electromagnética, la espectroscopia también incluye técnicas de espectroscopia acústica, de masa y electrónica (Skoog *et. al.*, 2000).

La producción y la detección de radiación requieren de diferentes técnicas en diferentes regiones del espectro electromagnético. Sin embargo, en todos los métodos espectroscópicos se miden fundamentalmente dos variables (Figura 1.4):

- La longitud de onda (o energía) de la radiación.
- La cantidad de radiación de esa longitud de onda

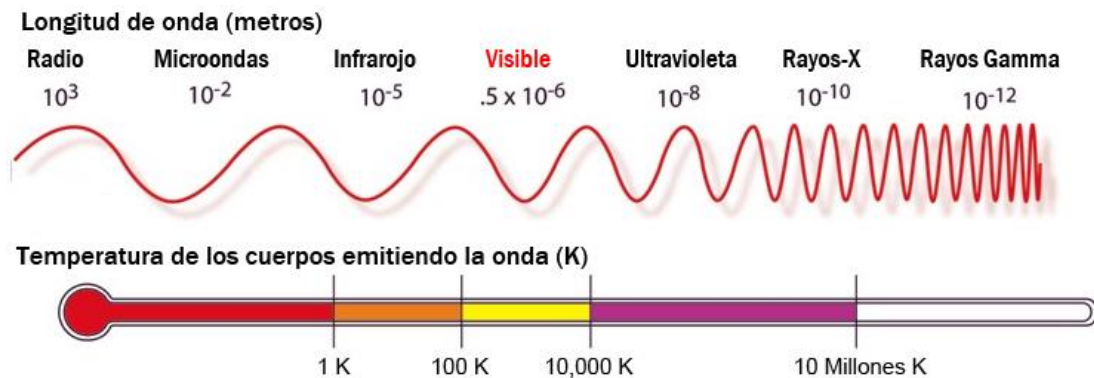


Figura 1.4 Longitud de Onda y Temperatura de la Radiación

Cuando un material específico absorbe energía de la luz, este absorbe únicamente ciertas longitudes de onda. Para otras longitudes de onda, el material puede ser transparente.

En resumen, las longitudes de onda absorbidas y emitidas dependen del tipo de compuesto. La cantidad de luz absorbida o emitida depende de la

concentración del compuesto presente en el paso óptico (Rubinson *et. al.*, 2001).

1.4 Selección de un Método Analítico

Los requisitos de análisis para determinar el mejor método analítico, es elegir un método, en el cual se consideren algunos o todos los siguientes criterios de diseño:

- Exactitud
- Precisión
- Sensibilidad
- Selectividad
- Escala de operación
- Tiempo de análisis
- Disponibilidad de equipo
- Costo

Después de seleccionar un método, es necesario desarrollar un procedimiento que cumpla con los objetivos del análisis. Al desarrollar el procedimiento, se presta atención a compensar las interferencias, seleccionar y calibrar equipos, estandarizar el método, adquirir una muestra representativa y validar el método (Harvey 2000).

1.5 Justificación

Para un control continuo del ciclo de absorción en un transformador térmico por absorción, es necesario monitorear las propiedades de la solución, de esta forma se aprecia el desempeño de las máquinas de absorción.

La determinación adecuada de LiBr en agua es una de las mediciones que determinan en forma precisa el comportamiento en el ciclo de absorción en un transformador térmico por absorción

A partir de la comparación de varias alternativas de propiedades (índice de refracción, conductividad eléctrica, densidad y velocidad del sonido) y sensores (Tapscott *et. al.*, 1997), se propone la técnica de la Conductimetría, para determinar la concentración de la solución de LiBr-H₂O, que se emplea en los transformadores térmicos por absorción.

Las pruebas experimentales de conductividad eléctrica y temperatura (Shahata *et. al.*, 2012), (Elsafty *et. al.*, 2000), demuestran que la técnica de Conductimetría puede emplearse para la medición de la concentración de LiBr en línea y tiempo real. Así como la posibilidad de instalación en las máquinas de absorción.

1.6 Objetivo General

Establecer un método de medición in situ y confiable, que determine la concentración de LiBr en función de la conductividad eléctrica y temperatura, en los ciclos de absorción, de un transformador térmico.

1.7 Objetivos Específicos

- Seleccionar y establecer un método de medición de concentración de LiBr, en un transformador térmico, de acuerdo a las mediciones de propiedades físicas y de temperatura de la solución LiBr-H₂O.
- Desarrollar pruebas experimentales de medición de conductividad eléctrica y temperatura en un transformador térmico a las condiciones de operación.
- Analizar y discutir los resultados experimentales obtenidos de las pruebas experimentales.
- Proponer correlaciones semiempírica que determinen la concentración del LiBr, en función de la conductividad y temperatura, en el intervalo de operación de un transformador térmico. Así como la validación de la misma para la determinación de su confiabilidad.
- Publicar un artículo con los resultados obtenidos de las pruebas experimentales

1.8 Estructura de Trabajo

El presente trabajo ha sido planteado y estructurado de la siguiente forma:

Capítulo 1 Instrumentos de Medición. Se da a conocer acerca de los instrumentos de medición, principio de muestreo, su clasificación y criterios de selección.

Capítulo 2 Equipos Experimentales de Mediciones de Propiedades para la Solución LiBr-H₂O. Se da a conocer la preparación de la solución LiBr-H₂O, el intervalo de medición de las propiedades y temperatura de la solución, el principio de medición de la técnica y su instrumento para llevar a cabo la parte experimental.

Capítulo 3 Determinación de la Concentración mediante la Conductividad Eléctrica y Temperatura. Se comparan los trabajos reportados en la literatura, acerca de las mediciones de conductividad eléctrica y temperatura para la determinación de la concentración de soluciones. Se reportan ecuaciones que determinan la conductividad eléctrica en función de la temperatura y concentración

Capítulo 4 Análisis y Discusión de Datos Experimentales.

Se analizan y discuten los resultados experimentales, se analiza el comportamiento de la conductividad eléctrica con respecto a la temperatura y concentración, finalmente se proponen correlaciones semiempíricas que determinan la concentración del LiBr presente en la solución, en función de la conductividad eléctrica y temperatura.

Capítulo 5 Medición de la Conductividad Eléctrica y Temperatura en un Transformador Térmico. Se realizan pruebas experimentales de conductividad eléctrica y temperatura, en el transformador térmico.

Capítulo 6 Conclusiones y Recomendaciones. Se deducen las conclusiones obtenidas con base a los resultados experimentales obtenidos en la realización del presente trabajo. Finalmente se expresan las recomendaciones a realizar.

CAPÍTULO 2

EQUIPOS EXPERIMENTALES DE MEDICIONES DE PROPIEDADES PARA LA SOLUCION LIBR-H₂O

2.1 Introducción

La solución de LiBr-H₂O, es un fluido de trabajo, empleado como absorbente en el ciclo de absorción de bombas de calor, transformadores térmicos y sistemas de refrigeración. El LiBr-H₂O es una de las mejores opciones de fluidos de trabajos en los procesos de absorción, ya que presenta un intervalo amplio de operación de temperatura, presión y concentración (Kaita 2000), Diagrama de Olhdam Clapeyron, Figura 2.1.

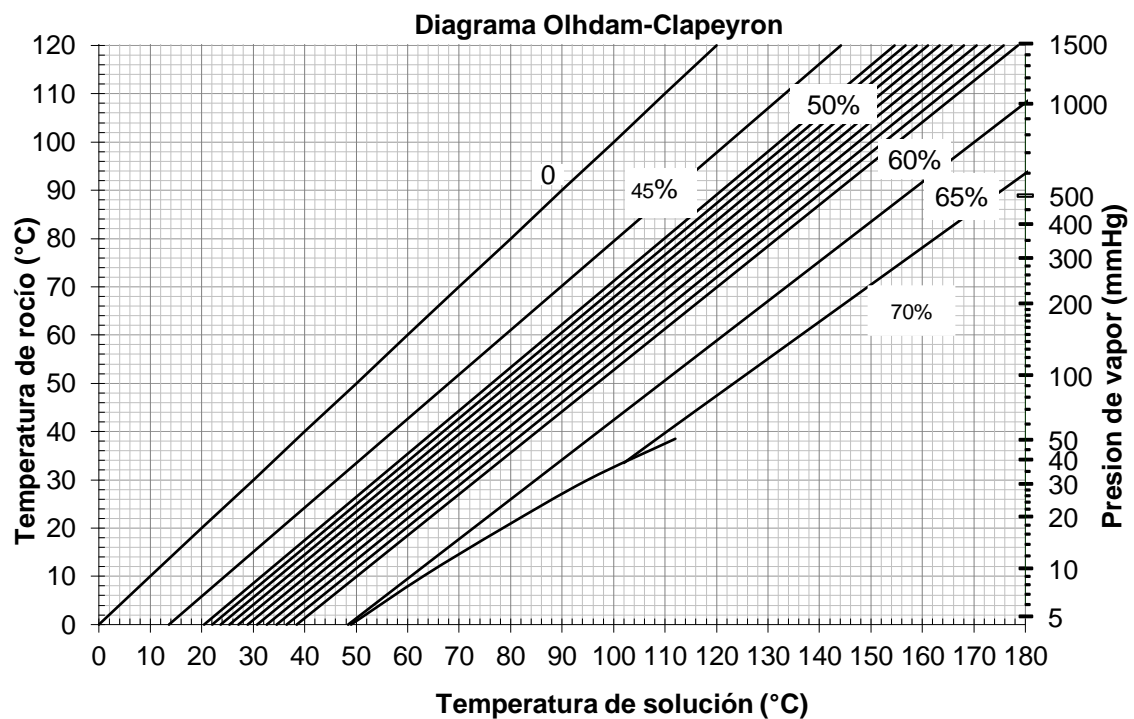


Figura 2.1 Diagrama de operación de la solución LiBr-H₂O.

El LiBr-H₂O alcanza un buen desempeño, en el ciclo de absorción, cuando se trabaja a condiciones muy cercanas al límite de operación de la temperatura y concentración. Sin embargo, si se excede de este límite de operación, el LiBr-H₂O presenta problemas de cristalización, esto debido al exceso de LiBr presente en la solución. Por tal motivo es necesario monitorear y cuantificar la concentración para evitar que se presente la cristalización en el ciclo de absorción (Tapscott *et. al.*, 1997).

En la literatura se han encontrado algunos trabajos reportados, acerca del estudio de la concentración del LiBr-H₂O, a través de la medición de propiedades como: conductividad eléctrica (Fried *et. al.*, 1983), conductividad térmica (DiGuilio *et. al.*, 1992), densidad (Lee *et. al.*, 1990), índice de refracción (Zaltash *et. al.*, 1992), solubilidad (Boryta 1970), velocidad del sonido (Rohman *et. al.*, 2002), viscosidad (Lee *et. al.*, 1990) y presión de vapor (Patil *et. al.*, 1990), los trabajos se reportan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Propiedades de la solución LiBr-H₂O

Año	Autor	Propiedad	Temperatura (°C)	Concentración (% mass)
1970	Boryta	Solubilidad	-50–100	45-70
1983	Fried & Segal	Conductividad Eléctrica	15–80	40-63
1990	Lee <i>et. al.</i>	Densidad y Viscosidad	25–200	45-65
1990	Patil <i>et. al.</i>	Presión de Vapor	30-70	17.4-45
1992	DiGuilio <i>et. al.</i>	Conductividad Térmica	20–185	30-65
1992	Zaltash & Ally	Índice de Refracción	5–80	0-58
2002	Rohman <i>et. al.</i>	Velocidad del Sonido	0–50	0-55

Las mediciones obtenidas de las propiedades y temperatura de LiBr-H₂O, se ajustan para obtener una correlación semiempírica que está en función de la concentración.

El objetivo del presente trabajo es obtener un método que permita determinar la concentración del LiBr a partir de la medición de propiedades que presenta la solución LiBr-H₂O y obtener correlaciones de las mediciones obtenidas con respecto a su concentración y temperatura. Las propiedades a medir son: la conductividad eléctrica, la densidad, el índice de refracción y la velocidad del sonido. Estas propiedades se miden en un intervalo de temperatura y concentración, cercano a las condiciones de operación de los transformadores térmicos.

El sensor seleccionado para llevar a cabo las mediciones de la propiedad de la solución LiBr-H₂O, deberá medir de manera confiable la concentración del LiBr e instalarse en la línea del ciclo de absorción, donde opera el transformador térmico. La precisión del sensor dependerá de la disponibilidad de los datos confiables para todo el intervalo de temperatura y concentración a las que se opera el transformador térmico. Los experimentos se realizaron en el Laboratorio de Propiedades Termofísicas de Fluidos, en el Centro de Refrigeración y Valorización Energética (CREVER), ubicado en Av. de los Países Catalanes 26, Tarragona, España.

2.2 Preparación de la solución LiBr-H₂O

Las muestras fueron preparadas con bromuro de litio grado reactivo con una pureza $\geq 99\%$, Figura 2.2, suministrado por la compañía Sigma Aldrich y Agua Milliq (solvente característico en términos de conductividad eléctrica típicamente a $0.54\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}$ a $25\ ^\circ\text{C}$).



Figura 2.2 Reactivo LiBr

El LiBr fue vertido dentro de un vaso de precipitados tapado con un vidrio de reloj, después se colocó en un horno eléctrico a una temperatura de $100\ ^\circ\text{C}$ para su deshidratación, durante aproximadamente 48 horas. Las muestras fueron enfriadas en el laboratorio a temperatura ambiente en un desecador que contiene sílica-gel para remover cualquier cantidad de traza de agua.

Una balanza analítica digital (Mettler AE 206) fue empleada para medir las masas del reactivo de bromuro de litio y del disolvente, agua Milliq, antes de mezclarse, para obtener las diferentes concentraciones, Figura 2.3.



Figura 2.3 Medición de la concentración del LiBr-H₂O.

Las soluciones de LiBr-H₂O fueron preparadas para el intervalo de concentración de 45 a 65 % aproximadamente, a cada 5 %, esto realizo para todas las propiedades medidas de la solución LiBr-H₂O. Cada muestra se preparó en forma independiente. La precisión de la balanza es del $\pm 0.0001\text{g}$.

2.3 Intervalo de Medición de Propiedades

La medición de las propiedades de la solución LiBr-H₂O se realizó en los intervalos siguientes:

- Concentración de 45 a 65 % en peso de LiBr
- Temperatura: de 20 a 70 °C.

Las propiedades que han sido medidas y estudiadas en función de estos intervalos son:

- Conductividad eléctrica
- Densidad
- Índice de refracción
- Velocidad del sonido.

Se realizaron 3 pruebas experimentales para cada medición de propiedad. El procedimiento empleado para realizar las mediciones de las propiedades en el intervalo de concentración y temperatura propuesto, fue de calentar la solución desde la temperatura más baja posible, alcanzar el equilibrio, tomar la medición y pasar a la siguiente temperatura. Cuando la temperatura máxima fue alcanzada, el procedimiento se repitió con el enfriamiento de la solución. La repetitividad para cada medición de propiedad fue de 2 veces en incremento de temperatura y 1 vez en descenso.

2.4 Principio de Medición de las Propiedades

2.4.1 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica en líquidos es la medida de los iones presentes en una solución para el transporte de corriente eléctrica. La conductividad eléctrica k ($S\ cm^{-1}$) se expresa en función de la geometría de la constante de la celda (área de los electrodos y distancia entre ellos) y de la resistividad eléctrica.

El principio de medición se basa en la aplicación de una diferencia de potencial entre dos electrodos inertes de una superficie, A , situada a una distancia, L , introducida en la solución electrolítica. Se genera un gradiente de potencial, con lo que cada ion se desplaza hacia el electrodo con dirección opuesta. Debido a la carga asociada con los iones, este desplazamiento producirá una corriente eléctrica (Robson 2007).

2.4.2 Densidad y Velocidad del Sonido

La densidad es la medida de la cantidad de materia que tiene una sustancia en un volumen dado. La densidad ρ (g cm^{-3}), se expresa en términos de masa de la sustancia por unidad de volumen. La velocidad del sonido es la dinámica de propagación de las ondas sonoras. La velocidad del sonido v (m s^{-1}), se expresa como una función de la longitud por unidad de tiempo. La densidad y velocidad del sonido de la solución LiBr se determinó mediante la medición del tubo en forma de U.

El principio de medición se basa en un tubo en forma de U de metal o vidrio que contiene la muestra de medición que se activa electromagnéticamente para vibrar a su frecuencia resonante en un tubo en forma de U. Esta frecuencia de resonancia es una función de la construcción del material, la geometría del tubo y la masa del conjunto del tubo (que consiste en el propio tubo y el fluido en el tubo). A medida que el volumen se mantiene constante, se determina la densidad. La velocidad del sonido se determina en función de la densidad y del factor de compresibilidad de las moléculas presentes en la muestra (Zafarani-Moattar et al 2007).

2.4.3 Índice de Refracción

El índice de refracción es la medida del cambio de la velocidad de la luz al pasar de un medio a otro. Los índices de refracción, n_D son adimensionales.

El principio de la medición se basa en el cambio de velocidad experimentado por la radiación electromagnética que pasa de un medio a otro, como resultado de su interacción con átomos y moléculas. Dicho cambio de

velocidad se manifiesta en una variación en la dirección de propagación, usando dos prismas: una luz fija sobre la que se deposita la muestra y una refracción móvil.

2.5 Instrumentación y Procedimiento Experimental

2.5.1 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica fue medida mediante un sensor de conductividad de marca Crison Basic 30, Figura 2.4, acoplado a una celda de electrodos de forma toroidal. La celda de conductividad se calibro con una solución estándar de KCl a una concentración de 1 M. El punto de calibración fue a 25 °C con un valor de conductividad de 111.8 mS cm^{-1} .



Figura 2.4 Sensor de conductividad crison basic 30

La temperatura de la solución fue contralada a través de un baño térmico de marca Julabo con una precisión de $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$. La temperatura se midió con un termómetro de precisión MKT 100 Anton Paar con una precisión de $\pm 0.001 \text{ }^\circ\text{C}$, Figura 2.5, previamente calibrado.



Figura 2.5 Termómetro de precisión MKT 100 Anton Paar

La especificación de la celda de conductividad del sensor de conductividad se especifica en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Especificaciones del sensor de conductividad

Celda	5298
Constante de celda	10 cm ⁻¹
Temperatura de referencia.	20 y 25 °C
Temperatura de trabajo	-30 a 80 °C
Material celda	Vidrio/Pt
Escala de medida (μS cm ⁻¹)	100 a 500 000
Coefficiente de compensación de temperatura	Lineal, 2 %
Precisión	± 0.1 % conductividad
Resolución	± 0.01 mS cm ⁻¹

El procedimiento consistía en colocar un volumen de aproximadamente 12 ml de solución de LiBr en un matraz de vidrio Erlenmeyer, con un agitador magnético, un sensor de temperatura de precisión y una célula de forma toroidal. El sistema fue aislado para evitar pérdidas de calor. Se utilizó un baño térmico para calentar la solución de LiBr contenida en un matraz de vidrio Erlenmeyer, Figura 2.6.

La solución de LiBr de medición se llevó a cabo a una temperatura de 30 ° C y se calentó hasta 80 ° C. Las mediciones de conductividad eléctrica se tomaron después de alcanzar el estado estacionario. El tiempo de muestreo fue de aproximadamente 30 minutos para cada temperatura. Las mediciones se realizaron en un laboratorio en condiciones ambientales. La incertidumbre de las mediciones de conductividad eléctrica es de $\pm 3.68 \text{ mS cm}^{-1}$.



Figura 2.6 Medición Experimental de Conductividad Eléctrica

2.5.2 Densidad y Velocidad del Sonido

La densidad y la velocidad del sonido de la solución de LiBr se midieron continuamente con un medidor de velocidad y densidad de sonido Anton Paar DSA 5000, Figura 2.7. El medidor de densidad y velocidad sonora tiene una densidad y la velocidad del sonido oscila entre 0 y 3 g cm^{-3} y 1000 a 2000 ms^{-1} , con resoluciones $1 \times 10^{-7} \text{ g cm}^{-3}$ y $0,1 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente.

La temperatura de la solución se midió empleando un medidor de temperatura incorporado, con una resolución de $1 \times 10^{-3} \text{ }^\circ \text{C}$. El medidor de densidad y velocidad sonora se calibró previamente.



Figura 2.7. Analizador de la Densidad y Velocidad del Sonido

El procedimiento fue colocar un volumen de solución de LiBr de aproximadamente 4 ml en el medidor de densidad y velocidad sonora, a través de un tubo de llenado a través de una jeringa. La solución de LiBr de medición se llevó a cabo a una temperatura de 20 ° C y se calentó hasta 70 ° C. La densidad y la medición de la velocidad del sonido se tomaron después de alcanzar el estado estacionario.

El tiempo de muestreo fue de aproximadamente 12 minutos para la velocidad del sonido y 15 minutos para la densidad. Las mediciones se realizaron en un laboratorio en condiciones ambientales. La incertidumbre estimada en la densidad de medición de las soluciones de LiBr está dentro de $\pm 0.00007 \text{ g cm}^{-3}$ y $\pm 0.5 \text{ m s}^{-1}$ para las mediciones de la velocidad del sonido.

2.5.3 Índice de Refracción

El índice de refracción de la solución de LiBr se midió continuamente con un refractómetro Anton Paar Abbemat RXA170, Figura 2.8. El refractómetro

Abbemat tiene un rango de medición del índice de refracción de 1,3 a 1,7 con resolución $1 \times 10^{-6} nD$ y precisión $\pm 4 * 10^{-5} nD$. La temperatura de la solución se midió utilizando una célula con un medidor de temperatura incorporado, con una resolución de $0,03^{\circ}C$. El refractómetro Abbemat se calibró previamente.



Figura 2.8 Refractómetro Anton Paar Abbemat RXA 170

El procedimiento fue colocar un volumen de solución de LiBr de aproximadamente 4 ml en el refractómetro, a través de un tubo de llenado a través de una jeringa. La solución de LiBr de medición se llevó a cabo a una temperatura de $20^{\circ}C$ y se calentó hasta $70^{\circ}C$. Las mediciones de índices de refracción se tomaron después de alcanzar el estado estacionario. El tiempo de muestreo fue de aproximadamente 6 minutos. Las mediciones se realizaron en un laboratorio en condiciones ambientales. La incertidumbre estimada en la medición de los índices de refracción de las soluciones de LiBr está dentro de $\pm 0,00005 nD$.

CAPÍTULO 3

DETERMINACION DE LA CONCENTRACION MEDIANTE LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA Y TEMPERATURA

3.1 Introducción

La conductividad eléctrica es una medida de la habilidad de la solución para conducir la electricidad. Si un ion se coloca entre dos electrodos de carga opuesta en un campo eléctrico, éste emigra al electrodo de carga opuesta, conduciendo de esta forma la electricidad. Debido a que los portadores de carga (iones) en la solución conducen la electricidad, la naturaleza de los iones y el movimiento de los iones en un solvente en particular determinan la magnitud de la conductividad eléctrica.

La naturaleza de los iones puede ser descrita por propiedades como: tamaño, carga, movilidad and concentración. El movimiento de los iones puede ser relacionado con la temperatura de la solución y viscosidad del solvente. A medida que aumenta la temperatura, los iones se mueven más rápidamente y conducen más electricidad. Un aumento en la viscosidad retarda el movimiento de los iones. La constante dieléctrica del solvente también afecta a la conductividad eléctrica (De Diego et al 2001).

En una solución iónica, los iones (cationes (+) y aniones (-)) presentes en la solución contribuyen a la conductividad eléctrica, y las contribuciones de los iones individuales no se pueden distinguir entre sí. Por lo tanto, la conductividad eléctrica no es específica. La conductividad eléctrica de soluciones es útil para obtener información cualitativa y cuantitativa, así como

la pureza del solvente y contenido iónico presente en la solución (Settle 1997).

En la Tabla 3.1, se reportan trabajos de la literatura en los que se determina la concentración, a través de la medición de conductividad eléctrica y temperatura para diversas soluciones de trabajo.

Tabla 3.1 Mediciones de conductividad Eléctrica y temperatura de soluciones

Año	Autor	Solución	Temperatura (°C)	Concentración (% mass)
1983	Fried & Segal	LiBr-H ₂ O	15-80	40-63
1995	Cartón et al	LiSO ₄ - H ₂ O	5-65	0-4
1997	See & White	KOH-H ₂ O	-15 -100	15-45
2000	Elsafty et al.	LiBr-H ₂ O	20-85	40-65
2006	Gilliam et al.	KOH-H ₂ O	0-100	0-27
2012	Shahata et al.	LiBr-H ₂ O	20-60	45-65

3.2 Conductividad Eléctrica

Cuando en una disolución iónica, los iones presentes son sometidos a la acción de un voltaje aplicado (campo eléctrico) impuesto en los extremos de un conductor, las cargas que tienen libertad de movimiento comienzan a fluir, dando lugar a una corriente eléctrica. La conductividad eléctrica (k) es una medida de la habilidad con que los iones migran bajo la acción de un campo eléctrico.

La conducción de una corriente eléctrica a través de una solución iónica se realiza por medio del movimiento de los iones en la disolución. Una forma de conocer la capacidad conductora de las disoluciones es colocar dos electrodos en una disolución y medir su conductividad eléctrica. Esta

conductividad eléctrica depende de los siguientes factores (Rubinson et al 2001).

- Área de la superficie de los electrodos
- Forma de los electrodos
- Posición de los electrodos en la solución
- Naturaleza (tamaño, carga, movilidad) de las especies
- Concentración de las especies
- Temperatura de la solución
- Propiedades del disolvente

Para medir la conductividad eléctrica de una disolución, se emplea como instrumento de medición una celda de conductividad eléctrica, la cual está constituida por al menos dos electrodos con carga opuesta (el término electrodo se refiere al polo o al conjunto de polos que forman la celda de medición), Figura 3.1.

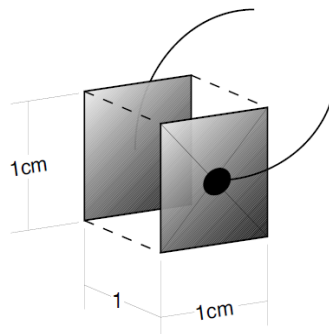


Figura 3.1 Electrodos de una celda de medición

Los electrodos de las celdas de conductividad eléctrica, presentan una relación entre la distancia (l) y el área de los electrodos (A), denominada

como constante de celda (k_{cell}), ecuación 3.1, la cual representa la geometría de la celda de medición.

$$K_{cell} = \frac{l}{A} \quad 3.1$$

Dónde:

k_{cell} = Constante de celda (cm^{-1}).

l = Distancia entre los electrodos (cm).

A = Sección transversal de los electrodos (cm^2).

La constante de celda recomendada para la celda de conductividad eléctrica variará dependiendo del intervalo de medición de conductividad eléctrica de la solución. Mediciones altas de conductividad eléctrica requieren una constante de celda alta, en tanto que bajas mediciones de conductividad eléctrica requieren una constante de celda baja. En la Tabla 3.2 se reportan las constantes de celda y su intervalo de medición de conductividad eléctrica (proporcionadas por los manuales del instrumento de medición, IC Control 2017). La selección del instrumento de medición estará en función de la constante de la celda y de las mediciones de conductividad eléctrica. La constante de la celda (k_{cell}) dependerá de la longitud y área de los electrodos.

Tabla 3.2 Constante de Celda Sensor de Conductividad Eléctrica

Constante de Celda	Intervalo de Conductividad Eléctrica (μS)
1.0	0 – 1000
2.0	0 – 2000
5.0	0 – 5000
10.0	0 - 10 000
20.0	0 - 20 000
50.0	0 - 50 000

3.3 Principio de Medición

En las disoluciones iónicas, la corriente eléctrica es transportada por los iones de la disolución. En ausencia de un campo eléctrico los iones, que constituyen un conductor iónico, se encuentran en un constante movimiento aleatorio. Este movimiento es debido a la acción de fuerzas térmicas y de convección.

Cuando se aplica una corriente continua (DC) a los electrodos, los iones son sometidos a la acción de un campo eléctrico; por lo tanto los iones cargados positivamente (cationes) migran hacia el electrodo cargado negativamente (cátodo). Análogamente a esto, los iones de carga negativa (aniones) se mueven en la dirección inversa a la carga positiva (ánodo), como se ilustra en la Figura 3.2. El movimiento de los iones debido al voltaje aplicado genera el transporte de la corriente eléctrica en la disolución. La conductividad eléctrica varía con la temperatura y con la concentración de iones presentes en la disolución.

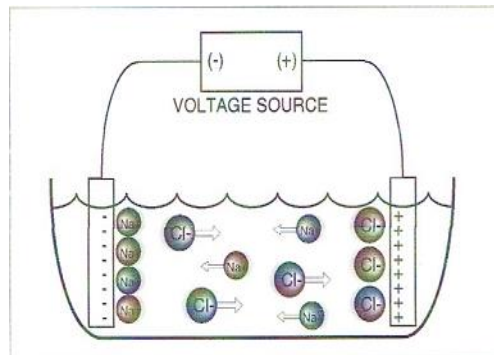


Figura 3.2 Movimiento de Iones en la Disolución

La resistencia, ecuación 3.2, entre los dos electrodos será inversamente proporcional al área (A) y directamente proporcional a la distancia (l) y a la resistividad (ρ) propia del medio (solución), a la conducción de cargas.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad 3.2$$

La inversa de la resistencia (R) es la conductancia (G) cuya unidad es el Siemens (S), también llamado mho. Ecuación 3.3.

$$G = \frac{1}{R} \quad 3.3$$

Combinando las ecuaciones 3.2 y 3.3, se obtiene:

$$G = \frac{1}{\rho} \frac{A}{l} = k \frac{A}{l} \quad 3.4$$

Donde k es la conductividad eléctrica de la disolución expresada en (S cm^{-1}), definida como la inversa de la resistividad (Laidler et al 2011).

3.4 Mediciones de Conductividad Eléctrica

Las mediciones de la conductividad eléctrica en las disoluciones se efectúan a través de:

- Métodos de contacto
- Métodos de no contacto (inductiva)

3.4.1 Medición de Conductividad por Contacto

Los sensores de contacto de conductividad consisten de dos electrodos de metal, generalmente de acero inoxidable o titanio, los cuales se encuentran en contacto con la disolución y la corriente se hace pasar a través de ella.

En la Figura 3.3. Se muestra el proceso de medición de conductividad eléctrica por contacto. El circuito consta de un juego de 4 resistencias, una de ellas es la resistencia de la disolución (R_x), una fuente de corriente alterna y un multímetro. Se modifica el valor de la resistencia variable R_2 , hasta que la lectura en el multímetro sea nula. Posteriormente, aplicando las leyes de Kirchhoff, con el valor de R_2 y conociendo R_1 y R_4 se puede calcular R_3 (resistencia de la disolución).

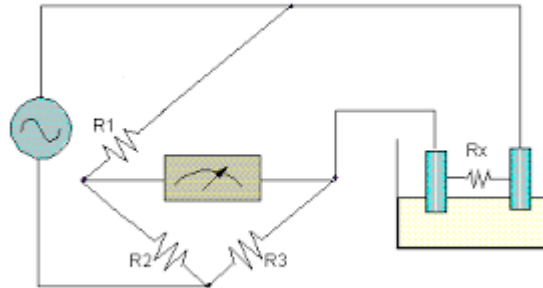


Figura 3.3 Medición de Conductividad por Contacto

Los dos electrodos en contacto con estas disoluciones permiten la medición de la resistencia (R). La conductividad eléctrica (k) es determinada mediante la siguiente ecuación.

$$k = \frac{K_{\text{cell}}}{R} \quad 3.5$$

Dado que la conductancia (G) es el recíproco de la resistencia. La ecuación 3.5 se puede re expresar de la siguiente forma:

$$k = K_{\text{cell}} * G \quad 3.6$$

Donde:

k = Conductividad Eléctrica (S cm^{-1}).

K_{cell} = Constante de Celda (cm^{-1}).

G = Conductancia (S).

3.4.2 Medición de Conductividad de no Contacto

La conductividad inductiva, también conocida como mediciones de conductividad sin electrodos, comúnmente emplea un par de toroides, Figura 3.4. El sensor inductivo consiste de dos toroides de metal recubiertos de alambre enrollado en un cuerpo de plástico resistente a la corrosión. Un toroide es la bobina de excitación, mientras que el otro funciona como recepción. El sensor inductivo es inmerso en el líquido conductor.

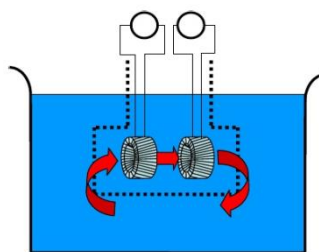


Figura 3.4 Medición de Conductividad por no Contacto

Se aplica al sensor inductivo una corriente alterna, a la bobina de accionamiento, que induce un voltaje en el líquido que rodea a la bobina. La tensión hace que una corriente iónica fluya proporcional a la conductancia del líquido. La corriente iónica induce una corriente eléctrica en la bobina de recepción, que el analizador mide. La corriente inducida es directamente proporcional a la conductancia de la solución (Emerson 2010).

La conductividad eléctrica en una solución acuosa es afectada principalmente por:

- La temperatura.
- La concentración de la solución.

3.5 Efecto de la Temperatura en la Conductividad Eléctrica.

Un incremento en la temperatura de la disolución, causa una disminución en su viscosidad y, por lo tanto, un aumento en la movilidad de los iones presentes en la disolución. Un incremento en la temperatura puede también causar un incremento en el número de iones en la disolución, esto debido a la disociación de moléculas. Como la conductividad eléctrica de una disolución depende de estos factores, un incremento de la temperatura de la disolución permitirá incrementar su conductividad eléctrica (Barron et al 2005). El Aumento de la conductividad eléctrica se presenta de forma aproximadamente lineal con la temperatura (See et al 1997).

El cambio de la conductividad eléctrica de las disoluciones dependerá del cambio de la temperatura de la disolución; este cambio es conocido como compensación de temperatura. El coeficiente de compensación de temperatura es la relación a la cual la conductividad eléctrica de la disolución incrementa con el aumento de la temperatura y es expresado como el porcentaje del incremento de la conductividad eléctrica por el cambio de temperatura de 1 °C. El coeficiente de compensación de temperatura deberá ser diferente para cada disolución, como se presenta en la Tabla 3.3

Tabla 3.3 Compensación de Temperatura para Disoluciones.

Disoluciones	Compensación de temperatura % por °C
Ácidos	1.0 - 1.6
Bases	1.8 - 2.2
Sales	2.2 – 3.0

Para la compensación de temperatura lineal, se asume que el coeficiente de compensación de temperatura (α) tiene el mismo valor para todas las mediciones de temperatura. Las mediciones de conductividad dependen de la temperatura. Debido a ello, es importante calcular el coeficiente de compensación de temperatura, empleando la siguiente ecuación.

$$\alpha = \frac{k_{sol} - k_{25}}{k_{25}(T_{sol} - 25)} * 100\% \quad 3.7$$

Dónde:

α = Coeficiente de compensación de temperatura.

k_{sol} = Conductividad eléctrica medida de la solución.

k_{25} = Conductividad eléctrica medida a 25 °C.

T_{sol} = Temperatura medida de la disolución

Cuando las mediciones de conductividad eléctrica no se realizan a 25 °C, el coeficiente de compensación de temperatura (α) puede ser utilizado para determinar la conductividad compensada de la solución a 25 °C, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$k_{25} = \frac{k_{sol}}{1 + \left(\frac{\alpha}{100}\right)(T_{sol} - 25)} \quad 3.8$$

3.6 Efecto de la Concentración en la Conductividad Eléctrica.

Para el caso de un conductor iónico (solución), el valor de la conductividad eléctrica dependerá del número de iones presentes en el volumen entre las placas, es decir, de su concentración. Cada ion presenta diferente movilidad

en la solución y por lo tanto diferente conductividad eléctrica (λ_0), Tabla 3.4, afectando su capacidad para el transporte de corriente.

Tabla 3.4 Conductividad Electrica Individual

Catión	λ_0	Anión	λ_0
H ⁺	349.8	OH ⁻	198.6
K ⁺	73.5	Br ⁻	78.1
Ag ⁺	61.9	I ⁻	76.8
Na ⁺	50.1	Cl ⁻	76.4
Li ⁺	38.7	HCO ₃ ⁻	44.5

La conductividad eléctrica aumentará con la concentración, pero puede llegar a un máximo para luego disminuir con el aumento de la concentración. La disminución de la conductividad eléctrica a concentraciones más altas se atribuye principalmente a la obstrucción mutua entre las Iones que se mueven en la dirección opuesta.

Se concluye que la conductividad eléctrica depende linealmente con la temperatura, y cuadráticamente de la composición de la solución.

3.7 Ecuaciones para Calcular la Conductividad Electrica

A continuación se presenta diversas ecuaciones de ajuste de conductividad eléctrica, se han realizado mediaciones experimentales en medios acuosos a 25 °C y solo se aplica a concentraciones de hasta 5 molar. Las ecuaciones que se presentan son: *Casteel-Amis*, *Falkenhagen*, *Wishaw-Stokes*, *Della Monica* y *De Diego*.

3.7.1 Ecuación de Casteel-Amis

La ecuación de Casteel-Amis incluye el efecto de la temperatura sobre la conductividad eléctrica de la solución. La conductividad eléctrica k , es una función compleja no lineal de la concentración del electrolito y alcanza un máximo en muchas soluciones a una concentración que es característica del solvente y soluto.

La ecuación matemática propuesta por Casteel-Amis es la siguiente:

$$\left(\frac{k}{k_{max}}\right) = \left(\frac{c}{c_{max}}\right)^a \exp\left[b(c - c_{max})^2 - \frac{a}{c_{max}}(c - c_{max})\right]$$

Donde k_{max} (mS cm⁻¹) es el máximo de la conductividad eléctrica a una temperatura constante, c_{max} , es la concentración a la cual k_{max} es alcanzada, a y b son parámetros de ajuste que no presentan ningún significado físico, y que se obtienen mediante una regresión lineal. La concentración esta expresada en unidades de molalidad (Kg L⁻¹)

Una desventaja de este modelo se debe a que solo presenta dos parámetros ajustables a y b . Parámetros que tienen poco significado en la interacción o comportamiento que presenta la conductividad eléctrica en el intervalo de altas concentraciones (De Diego et al, 1997).

3.7.2 Ecuación de Falkenhagen

La ecuación de Falkenhagen es un modelo empírico que se aplica a electrolitos univalentes. Considera los parámetros de viscosidad, temperatura constante dieléctrica y tamaño iónico, el cual es considerado como la distancia de aproximación más cercana entre dos iones. La ecuación matemática propuesta por Falkenhagen es la siguiente:

$$\Lambda = \left[\Lambda^0 - \frac{B_2 \sqrt{c}}{1 + Ba\sqrt{c}} \right] \left[1 - \frac{B_1 \sqrt{c}}{1 + Ba\sqrt{c}} F(c) \right]$$

$$B = \frac{50.29}{(\varepsilon_0 T)^{\frac{1}{2}}}$$

$$B_1 = \frac{8.20 \cdot 10^{-7}}{(\varepsilon_0 T)^{\frac{1}{2}}}$$

$$B_2 = \frac{82.50}{\eta_0 (\varepsilon_0 T)^{\frac{1}{2}}}$$

$$F(c) = \frac{e^{0.2929 \cdot Ba\sqrt{c}} - 1}{0.2929 Ba\sqrt{c}}$$

Donde Λ es la conductividad molar en $S \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^2$, c es la concentración molar; η , ε , T y a son la viscosidad (poise), constante dieléctrica (adimensional), la temperatura termodinámica (kelvin) y el tamaño iónico (cm), respectivamente. El superíndice 0 se refiere a las condiciones de dilución infinita y el subíndice 0 a propiedades del soluto (De Diego et al, 1997). Esta ecuación considera más parámetros, pero dichos parámetros son propiedades del soluto y no considera las propiedades de la solución.

3.7.3 Ecuación Wishaw-Stokes

La ecuación de Wishaw-Stokes es un modelo empírico que introdujo el término de la viscosidad relativa de lado derecho de la ecuación de Falkenhagen. Su idea era extender el modelo de Debye-Huckel a concentraciones más altas, alrededor de 5 N. La ecuación propuesta es la siguiente:

$$\Lambda = \left[\Lambda^0 - \frac{B_2 \sqrt{c}}{1 + Ba\sqrt{c}} \right] \left[1 - \frac{B_1 \sqrt{c}}{1 + Ba\sqrt{c}} F(c) \right] \frac{\eta_0}{\eta}$$

Donde η_0 y η representan la viscosidad del solvente y la solución, respectivamente. Esta ecuación corrige las mediciones de la conductividad eléctrica (movilidad iónica) con respecto al cambio de la viscosidad (Della 1983).

Los parámetros no descritos en esta sección, son similares a la ecuación de Falkenhagen; por consiguiente, se emplea el mismo procedimiento. Sin embargo, esta ecuación presenta un inconveniente cuando la relación de la viscosidad del soluto y la solución llega a ser muy alta (Islam et al, 1991).

3.7.4 Ecuación Della Monica

La ecuación propuesta por Della Monica es una modificación a la presentada por Wishaw-Stokes. La ecuación considera la dependencia del efecto electroforético en el término B_2 , considerando la viscosidad de la solución y no la de soluto como es empleada en la ecuación de Wishaw-Stokes .

La ecuación propuesta es la siguiente:

$$\Lambda = \left[\Lambda^0 - \frac{B_2 \sqrt{c}}{1 + Ba\sqrt{c}} \right] \left[1 - \frac{B_1 \sqrt{c}}{1 + Ba\sqrt{c}} F(c) \right] \frac{\eta_0}{\eta}$$

$$B_2(c) = \frac{82.50}{\eta(\varepsilon_0 T)^{\frac{1}{2}}}$$

La inadecuada ecuación de Wishaw-Stokes para interpretar el comportamiento de la conductividad eléctrica de sistemas caracterizados por la relación de altas viscosidades, se observa debido a que no había sido considerado el efecto electroforético en la viscosidad (Della et al. 1983).

El único término que cambió en esta ecuación propuesta fue B_2 , por consiguiente, los demás términos son determinados como las ecuaciones anteriores.

3.7.5 Ecuación De Diego

La ecuación propuesta por De Diego es una modificación de la ecuación establecida por Falkenhagen. En ella se modifica el parámetro de la concentración mediante el coeficiente de actividad. El coeficiente de actividad puede ser considerado como un factor de corrección empírico para explicar la desviación observada de la idealidad cuando se calculan las propiedades termodinámicas y coligativas de soluciones concentradas. (De Diego et al, 1997).

La ecuación propuesta es la siguiente:

$$\Lambda = \left[\Lambda^0 - \frac{B_2 \sqrt{A}}{1 + Ba\sqrt{A}} \right] \left[1 - \frac{B_1 \sqrt{A}}{1 + Ba\sqrt{A}} F(A) \right]$$

$$F(A) = \frac{e^{0.2929Ba\sqrt{A}} - 1}{0.2929Ba\sqrt{A}}$$

$$A = \gamma_{\pm}^{(c)} c$$

Donde $\gamma_{\pm}^{(c)}$ se refiere al coeficiente de actividad de la sal en escala molar.

El coeficiente de actividad representa a todos los efectos que se producen a altas concentraciones y que no permiten que las soluciones se comporten como soluciones ideales. Considerando esto en cuenta, se mira razonable el intento de emplear el coeficiente de actividad para emplearse en la conductividad eléctrica de soluciones concentradas. En una mezcla de iones se espera que la conductividad eléctrica varíe linealmente con la temperatura, y cuadráticamente con su concentración.

CAPÍTULO 4

ANALISIS Y DISCUSION DE DATOS EXPERIMENTALES

4.1 Introducción

En este capítulo se reportan los resultados experimentales de las mediciones, de las diferentes propiedades físicas de la solución LiBr-H₂O, las cuales son:

- Conductividad eléctrica
- Densidad
- Velocidad del Sonido
- índice de refracción

Se analizan los resultados obtenidos con respecto al comportamiento que presentan con la temperatura y concentración. El comportamiento se da a conocer mediante gráficas. Además, se lleva a cabo una comparación de datos experimentales obtenidos previamente con los datos reportados en la literatura.

Las pruebas experimentales se realizaron con la solución de trabajo LiBr-H₂O, considerando parámetros de operación de un transformador térmico por absorción. El intervalo de medición, para la concentración fue 45 a 65 % en peso de LiBr a un intervalo de temperatura: de 20 a 70 °C.

Las propiedades fueron medidas a una temperatura controlada con una celda de temperatura con una resolución 0.001 °C. El procedimiento fue calentar la solución a intervalos de 10 °C, esperar la estabilidad de la

temperatura, medir la propiedad y continuar con la temperatura siguiente. Cuando se alcanzó el máximo de temperatura, el procedimiento se repitió con temperatura de enfriamiento. Las mediciones fueron desarrolladas en un laboratorio de propiedades termo-físicas a condiciones ambientales.

4.2 Comparación de Datos Experimentales vs Datos Reportados en la Literatura

4.2.1 Conductividad Eléctrica

En la Figura 4.1 se muestra una comparación de datos experimentales de conductividad eléctrica, obtenidos en el presente trabajo y los reportados por Fried & Segal 1983. Esta comparación se llevó a cabo considerando las concentraciones de 45 % y 55 % en peso de LiBr, para el intervalo de temperatura descrito. Estas mediciones fueron consideradas por la similitud de condiciones de medición. Los datos experimentales de conductividad eléctrica obtenidos en este trabajo, muestran un buen acuerdo con los presentados por Fried & Segal 1983.

Existe una diferencia de hasta el 13.2 % con los datos obtenidos experimentalmente. Esta discrepancia se atribuye al instrumento de medición, ya que Fried y Segal emplearon celda de conductividad empleando el método de conductividad de contacto con la solución y en el presente trabajo se llevó a cabo mediante una celda toroidal, el cual emplea el método de conductividad de no contacto con la solución.

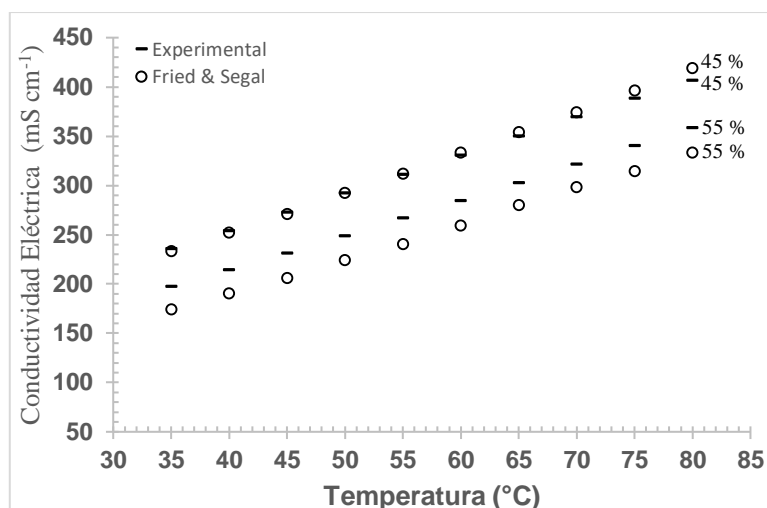


Figura 4.1. Comparación de valores experimentales (-) vs valores reportados por Fried & Segal (o).

4.2.2 Índice de Refracción

En la Figura 4.2 se muestra una comparación de datos experimentales de índice de refracción, obtenidos en el presente trabajo y los reportados por Zaltash & Ally (1992). Esta comparación se llevó a cabo considerando las concentraciones de 45 %, 50 % y 55 % en peso de LiBr, para el intervalo de temperatura descrito. Estas mediciones fueron consideradas por la similitud de condiciones de medición. Los datos experimentales de índice de Refracción obtenidos en este trabajo, muestran un buen acuerdo con los presentados por Zaltash & Ally (1992). Existe una diferencia de hasta el 0.2 % con los datos obtenidos experimentalmente.

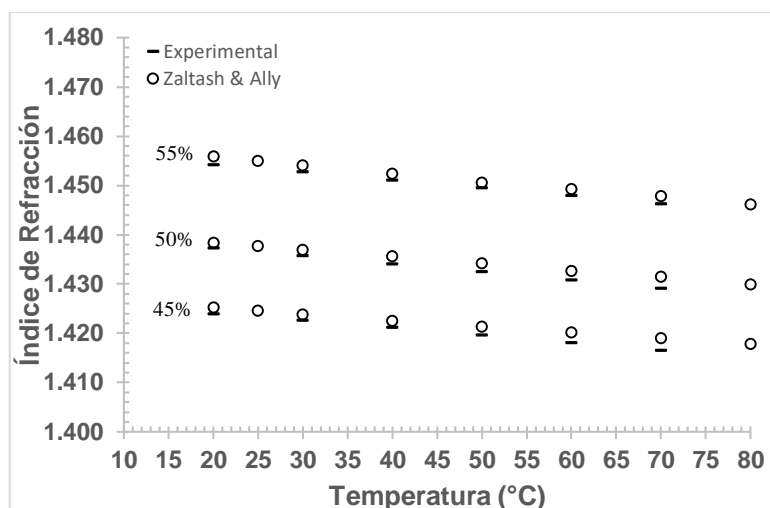


Figura 4.2. Comparación de valores experimentales (-) vs valores reportados por Zaltash & Ally (o).

4.2.3 Densidad

En la Figura 4.3 se muestra una comparación de datos experimentales de densidad, obtenidos en el presente trabajo y los reportados por Fried & Segal (1983), Wimby & Berntsson (1994) y Lee et al. (1990). Esta comparación se llevó a cabo considerando las concentraciones de 45 % y 55 % en peso de LiBr, para el intervalo de temperatura descrito. Estas mediciones fueron consideradas por la similitud de condiciones de medición. Los datos experimentales de densidad obtenidos en este trabajo, muestran un buen acuerdo con los presentados por Fried & Segal (1983), Wimby & Berntsson (1994) y Lee et al. (1990). Existe una diferencia de hasta el 3.4 % con los datos obtenidos experimentalmente.

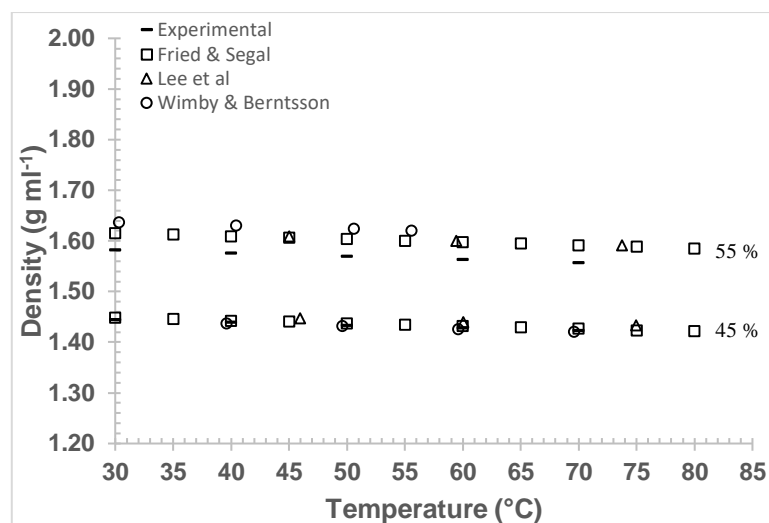


Figura 4.3. Comparación de valores experimentales (-) reportados por Fried & Segal (\square), Lee *et al* (Δ) and Wimby & Berntsson (\circ).

4.2.4 Velocidad del Sonido

En la Figura 4.4 se muestra una comparación de datos experimentales de velocidad del sonido, obtenidos en el presente trabajo y los reportados por Rohman. Esta comparación se llevó a cabo considerando las concentraciones de 50 % y 55 % en peso de LiBr, para el intervalo de temperatura descrito. Estas mediciones fueron consideradas por la similitud de condiciones de medición. Los datos experimentales de la velocidad del sonido obtenidos en este trabajo, muestran un buen acuerdo con los presentados por Rohman (2002).

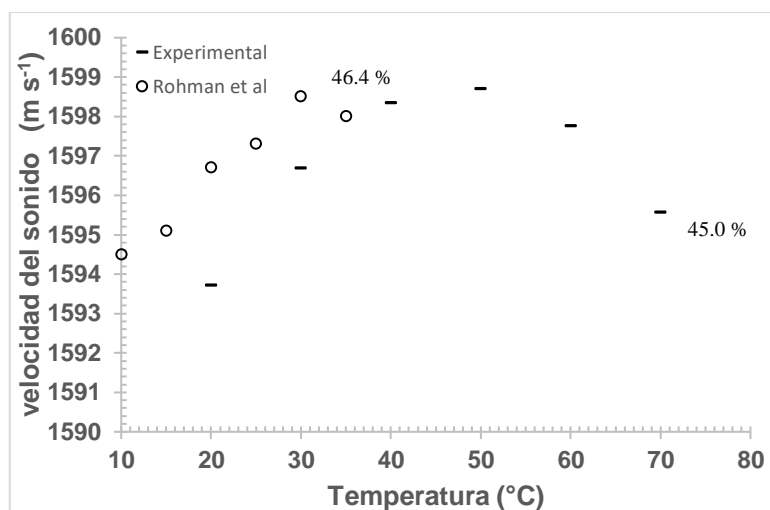


Figura 4.4. Comparación de valores experimentales (-) vs valores reportados por Rohman (o).

4.3 Resultados y Discusión de Datos Experimentales

4.3.1 Conductividad Eléctrica

La conductividad eléctrica de la solución de LiBr fue medida en un intervalo de temperatura de 35 a 80 °C y un intervalo de concentración de 45% a 65% en peso de LiBr. Los datos obtenidos de las mediciones de la propiedad de la conductividad eléctrica a diferentes temperaturas y concentraciones, se observa en la Tabla 4.1. Mientras que la tendencia que presenta con la temperatura y concentración se grafica en la Figura 4.5.

Table 4.1 Datos Experimentales de Conductividad Eléctrica [κ , mS cm⁻¹] de la Solución de LiBr.

°C	44.96%	50.05%	55.02%	60.03%	64.95%
35.00	235.1	217.7	197.0	153.1	118.1
40.00	253.5	235.4	213.7	167.5	130.3
50.00	291.3	272.0	248.2	198.1	157.2
60.00	329.9	309.3	283.9	230.5	186.7
70.00	368.6	347.0	320.6	264.5	218.2
80.00	405.7	383.9	357.7	299.6	251.5

El aumento de la conductividad eléctrica se produce cuando la temperatura aumenta. La viscosidad de la solución de LiBr disminuye, favoreciendo la movilidad de iones. Esta movilidad favorece el transporte de carga eléctrica (De Diego, 2001).

Se muestra gráficamente que a concentraciones de hasta 55% en peso de LiBr, la conductividad eléctrica aumenta con respecto al aumento de temperatura, a concentraciones por encima del 55% en peso de LiBr el aumento persiste pero en menor magnitud. Esto es debido al exceso de iones disueltos de esa concentración (Islam 1991), produciendo la saturación de la solución de LiBr, por lo tanto, una disminución en la conductividad eléctrica.

Para este intervalo de mediciones, la conductividad eléctrica presenta un comportamiento lineal con respecto a la temperatura.

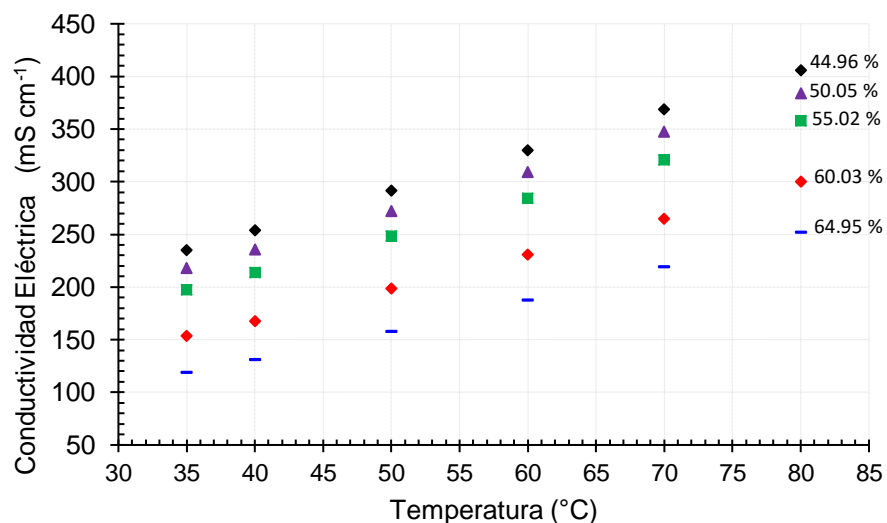


Figura 4.5 Conductividad eléctrica del LiBr-H₂O a diferentes temperaturas y concentraciones.

Se obtuvo una correlación a través del ajuste de mínimos cuadrados para producir una relación de la concentración del LiBr como una función de la temperatura y la conductividad eléctrica, esta se presenta en la ecuación (4.1).

$$\% \text{ LiBr} = A(T)k^2 + B(T)k + C(T) \quad (4.1)$$

Donde % LiBr es la concentración del LiBr en unidades de %, A, B y C son coeficientes en función de la temperatura y k es la conductividad eléctrica en unidades de mS cm^{-1} . Los coeficientes obtenidos a través del método de los mínimos cuadrados, se presentan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Coeficientes A, B, C para la ecuación propuesta de conductividad eléctrica

	1	2	3	
1	1.3348E-5	-3.0879E-3	-7.6133E-2	A
2	-8.9372E-4	2.3159E-1	5.4926	B
3	1.3222E-2	-3.6024E-1	8.9221	C

4.3.2 Índice de Refracción

El índice de refracción de la solución de LiBr fue medida en un intervalo de temperatura de 20 a 70 °C y un intervalo de concentración de 45% a 65% en peso de LiBr. Los datos obtenidos de las mediciones de la propiedad del índice de refracción a diferentes temperaturas y concentraciones, se observa en la Tabla 4.3. Mientras que la tendencia que presenta con la temperatura y concentración se grafica en la Figura 4.6.

Tabla 4.3 Datos Experimentales de Índice de Refraccion [IR] de la Solucion de LiBr.

°C	45.00%	50.15%	55.30%	59.95%	64.85%
20.00	1.423746	1.437114	1.453971	1.463704	
30.00	1.422463	1.435534	1.452544	1.462009	
40.00	1.420980	1.433910	1.450944	1.460245	
50.00	1.419481	1.432277	1.449335	1.458504	1.478116
60.00	1.417915	1.430632	1.447748	1.456773	1.476188
70.00	1.416320	1.428969	1.446089	1.455044	1.474466

El índice de refracción disminuye con el aumento de la temperatura, debido a que la temperatura tiene una gran influencia sobre la densidad del medio causando un cambio en la velocidad de propagación en el vacío y en la muestra.

Para este intervalo de medición, el índice de refracción tiene un comportamiento lineal con respecto a la temperatura. El índice de refracción tiende a aumentar cuando la concentración aumenta.

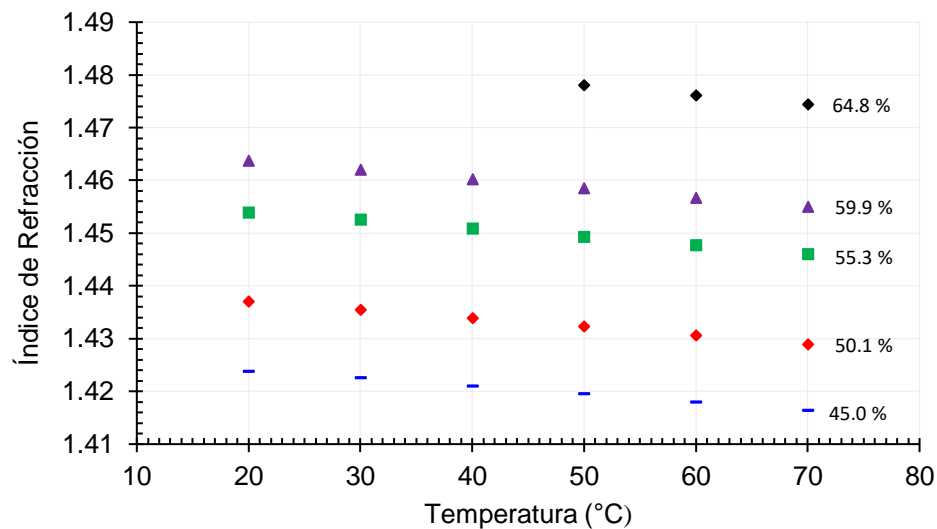


Figura 4.6. Índice de Refracción del LiBr-H₂O a diferentes temperaturas y concentraciones.

Se obtuvo una correlación a través del ajuste de mínimos cuadrados para producir una relación de la concentración del LiBr como una función de la temperatura y el índice de refracción, esta se presenta en la ecuación (4.2).

$$\% LiBr = A(T)nD^2 + B(T)nD + C(T) \quad (4.2)$$

Donde % *LiBr* es la concentración del LiBr en unidades de %, A, B y C son coeficientes en función de la temperatura y *nD* es el índice de refracción en unidades adimensionales. Los coeficientes obtenidos a través del método de los mínimos cuadrados, se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Coeficientes A, B, C para la ecuación propuesta de índice de refracción

	1	2	3	
1	-5.767E-10	3.6167E-8	-3.6763E-5	A
2	7.8251E-8	-6.7480E-6	6.6462E-3	B
3	-2.6583E-6	1.0659E-4	1.2011	C

4.3.3 Densidad

La densidad de la solución de LiBr fue medida en un intervalo de temperatura de 20 a 70 °C y un intervalo de concentración de 45% a 65% en peso de LiBr. Los datos obtenidos de las mediciones de la propiedad de la densidad a diferentes temperaturas y concentraciones, se observa en la Tabla 4.5. Mientras que la tendencia que presenta con la temperatura y concentración se grafica en la Figura 4.7.

Tabla 4.5 Datos Experimentales Densidad [ρ , g cm⁻³] de la Solucion LiBr

°C	45.00%	50.15%	55.30%	59.95%	64.85%
20.00	1.447655	1.514361	1.586826	1.655064	
30.00	1.442662	1.508916	1.580058	1.648673	
40.00	1.437452	1.503401	1.574177	1.642309	
50.00	1.432106	1.497800	1.568165	1.635948	1.745914
60.00	1.426623	1.492104	1.562083	1.629575	1.738809
70.00	1.421015	1.486314	1.555934	1.623178	1.731743

La densidad disminuye con el aumento de la temperatura, debido a que, con el aumento de la temperatura en la solución, los átomos de LiBr comienzan a vibrar y expandirse, generando un volumen mayor.

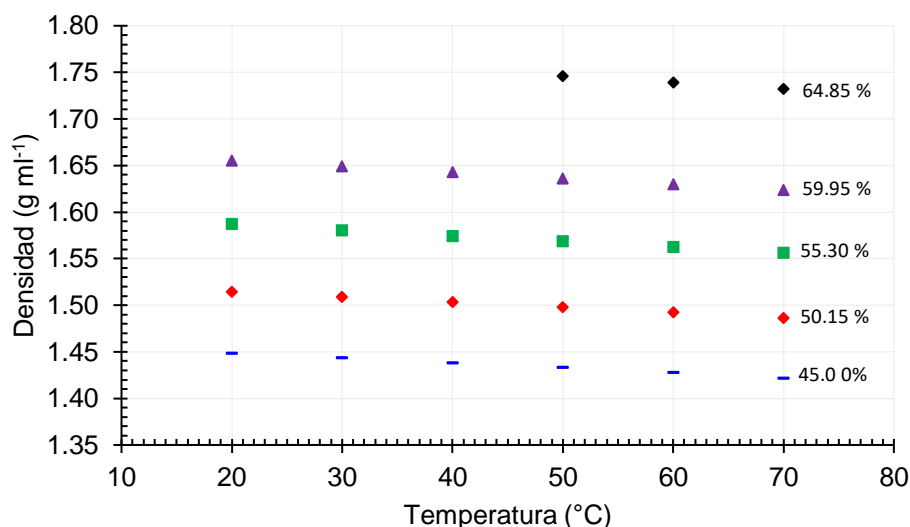


Figura 4.7 Densidad del LiBr-H₂O a diferentes temperaturas y concentraciones.

Por otro lado, la densidad aumenta, al incrementar la concentración, esto se debe a que existe mayor cantidad de masa de LiBr, para un mismo volumen de muestra.

Se obtuvo una correlación a través del ajuste de mínimos cuadrados para producir una relación de la concentración del LiBr como una función de la temperatura y la densidad, esta se presenta en la ecuación (4.3).

$$\% LiBr = A(T)\rho^2 + B(T)\rho + C(T) \quad (4.3)$$

Donde $\% LiBr$ es la concentración del LiBr en unidades de %, A, B y C son coeficientes en función de la temperatura y ρ es la densidad en unidades de $g\ ml^{-1}$. Los coeficientes obtenidos a través del método de los mínimos cuadrados, se presentan en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Coeficientes A, B, C para la ecuación propuesta de densidad

	1	2	3	
1	-7.2767E-9	6.8122E-7	6.4044E-6	A
2	8.2493E-7	-8.4286E-5	1.3447E-2	B
3	-2.3220E-5	1.9577E-3	8.3853E-1	C

4.3.4 Velocidad del Sonido

La velocidad del sonido de la solución de LiBr fue medida en un intervalo de temperatura de 20 a 70 °C y un intervalo de concentración de 45% a 65% en peso de LiBr. Los datos obtenidos de las mediciones de la propiedad de la densidad a diferentes temperaturas y concentraciones, se observa en la Tabla 4.7. Mientras que la tendencia que presenta con la temperatura y concentración se grafica en la Figura 4.8

Tabla 4.7 Datos Experimentales de Velocidad del Sonido [v , $m\ s^{-1}$] de la Solucion LiBr.

°C	45.00%	50.15%	55.30%	59.95%	64.85%
20.00	1593.70	1601.94	1615.12	1625.67	
30.00	1596.67	1603.64	1616.24	1626.34	
40.00	1598.34	1604.29	1616.08	1625.90	
50.00	1598.69	1603.90	1615.01	1624.98	1645.49
60.00	1597.74	1602.42	1613.00	1622.89	1642.89
70.00	1595.56	1599.92	1610.27	1619.96	1639.42

La velocidad del sonido presenta un máximo con la variación de temperatura, del cual dependerá de la concentración.

Para este intervalo de medición, la velocidad del sonido tiene un comportamiento parabólico con respecto a la temperatura.

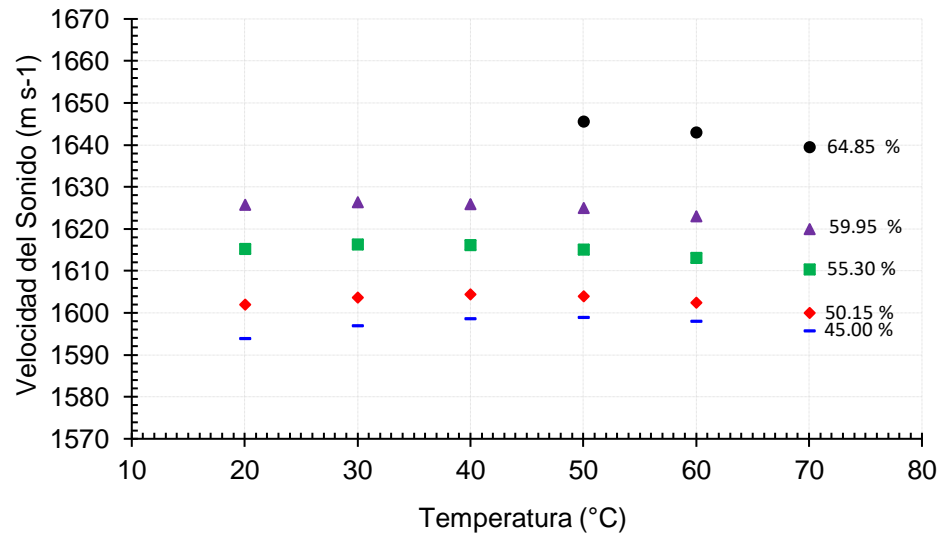


Figura 4.8 Velocidad del Sonido del LiBr-H₂O a diferentes temperaturas y concentraciones

Se obtuvo una correlación a través del ajuste de mínimos cuadrados para producir una relación de la concentración del LiBr como una función de la temperatura y la velocidad del sonido, esta se presenta en la ecuación (4.4).

$$\% LiBr = A(T)v^2 + B(T)v + C(T) \quad (4.4)$$

Donde % *LiBr* es la concentración del LiBr en unidades de %, A, B y C son coeficientes en función de la temperatura y v es la velocidad del sonido en unidades de $m s^{-1}$. Los coeficientes obtenidos a través del método de los mínimos cuadrados, se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8. Coeficientes A, B, C para la ecuación propuesta de velocidad del sonido

	1	2	3	
1	-8.3214E-6	1.3840E-3	-1.9885E-3	A
2	1.0086E-3	-1.6768E-1	2.7850	B
3	-3.4979E-2	5.3612	1.4622E3	C

4.4 Comparación Normalizada de la Conductividad Eléctrica, Densidad e Índice de Refracción

La Figura 4.9 muestra la comparación de la temperatura con respecto a la conductividad eléctrica, la densidad y el índice de refracción con escalas normalizadas para variables dependientes e independientes, es decir, para estas propiedades, se produce una tendencia lineal con respecto a la temperatura y composición.

A partir de esta figura se aprecia que la conductividad eléctrica es más sensible a las variaciones de temperatura, en comparación con la densidad y el índice de refracción. Los cambios de densidad y el índice de refracción con respecto a la variación de temperatura son muy similares.

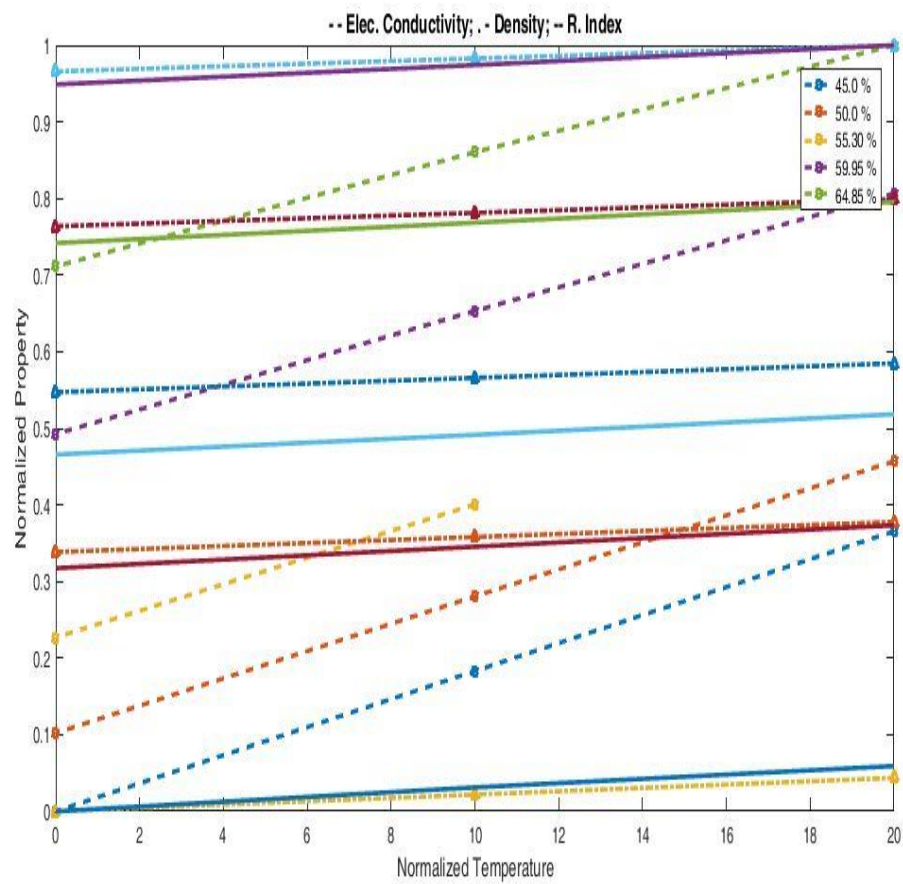


Figura 2.13 Normalización de la conductividad eléctrica (- -) densidad (. -) e índice de refracción (-).

CAPÍTULO 5

DETERMINACION DE LA CONCENTRACION EN UN TRANSFORMADOR TERMICO.

5.1 Introducción

Mediante un sistema por absorción es posible recuperar energía a partir del calor residual o a partir de la energía térmica solar.

De acuerdo con los trabajos experimentales, acerca de la transferencia de calor y masa en un absorbedor (Deng et al 1999), se sabe que la relación de absorción de vapor, en la solución absorbente, es el proceso clave para mejorar el coeficiente de rendimiento térmico (COP) de los sistemas de aire acondicionado con absorción de vapor. La mejora del proceso de absorción lleva a reducir el tamaño del intercambiador de calor del absorbedor.

Para un control continuo de cualquier sistema de absorción, es importante determinar la concentración de la solución LiBr-H₂O a diferentes puntos en el ciclo. Las técnicas empleadas para la determinación de la concentración han empleado la medición de propiedades y de la temperatura de la solución (Herold et al. 2005), como: índice de Refracción, conductividad térmica (Romero et al. 2006) y conductividad eléctrica (Elsafty 2012).

Este trabajo describe un procedimiento preciso para obtener la concentración de la solución LiBr basado en las mediciones de la conductividad eléctrica y temperatura.

5.2 Transformador Térmico por Absorción Convencional

El transformador térmico por absorción (TTA) es un tipo de bomba de calor, el cual tiene la capacidad de aprovechar el calor de desecho de un proceso industrial o una fuente de baja de calidad, y elevar su temperatura con el fin de aprovecharla en un fin específico (Holland et al 1999).

El transformador térmico por absorción opera mediante el ciclo inverso de una bomba de calor por absorción convencional para elevar el nivel térmico de la fuente de calor, como se muestra en el esquema de la Figura 5.1. Los componentes principales de un transformador térmico por absorción para un ciclo son un evaporador, un absorbedor, un generador y un condensador.

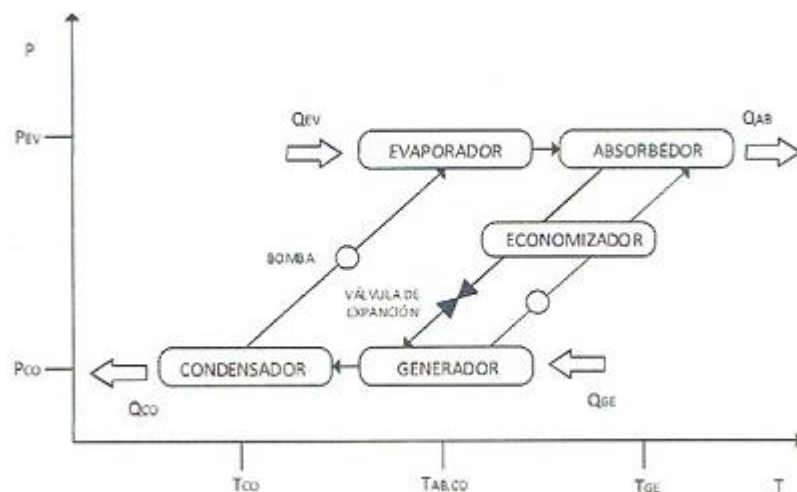


Figura 5.1 Ciclo termodinámico de un transformador térmico

5.3 Descripción del Transformador térmico por absorción

El transformador térmico por absorción para destilación de agua (TTA-DA) está instalado en el laboratorio de ingeniería térmica aplica del CIICAp (UAEM) y fue diseñado para una capacidad de 2 kW (Demesa 2012). La Figura 5. 2 muestra el diagrama general del TTA-DA con los dos componentes duales y la ubicación de los instrumentos de medición a lo largo del ciclo termodinámico.

El GE-CO consiste en dos cámaras cilíndricas conectadas por una tapa que permite el flujo del refrigerante desorbido en el GE hacia el CO. Internamente, el GE consiste en dos serpentines del mismo número de vueltas pero con el diámetro diferente del arrollamiento ordenados concéntricamente. Los serpentines del GE son alimentados por un distribuidor circular de gota por el cual fluye solución de LiBr-H₂O. El CO, al igual que el GE se compone de dos serpentines concéntricos de diámetro diferente de enrollamiento.

El EV-AB se compone de una cámara donde internamente se encuentran dos serpentines concéntricos verticales, que son alimentados de refrigerante y solución de LiBr-H₂O, cada uno por un distribuidor independiente.

Cada componente dual tiene una mirilla de vidrio de borosilicato que permite controlar el nivel de la mezcla absorbente en cada una de las cámaras en el momento de la operación.

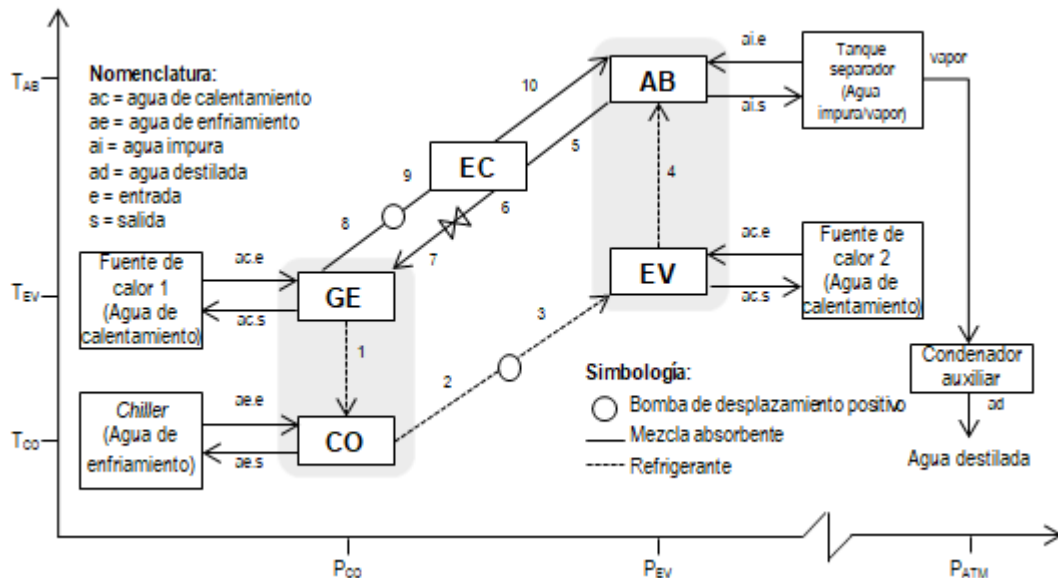


Figura 5.2 Diagrama de flujo del TTA-DA.

Entre el GE y AB se cuenta con un intercambiador de calor helicoidal con una configuración a contra-corriente denominado Economizador (EC), el cual permite la transferencia de calor entre la solución diluida y concentrada de LiBr-H₂O. De este modo se incrementa el nivel térmico de esta última.

El material utilizado para la coraza, los serpentines de los intercambiadores de calor, las líneas que conectan a cada uno de los componentes y demás dispositivos del ciclo termodinámico, es acero inoxidable 316L para reducir los efectos de corrosión por LiBr-H₂O. El TTA-DA ha sido térmicamente aislado por espuma elastomérica para minimizar la pérdida de calor al entorno. Se cuenta además de dos tanques de agua que suministran agua caliente por medio de resistencias eléctricas que emulan la fuente de calor de desecho (Delgado 2018).

5.4 Ciclo de Absorción en un Transformador Térmico

Cuando se alcanzan las condiciones de saturación de la mezcla absorbente en el GE, se lleva a cabo la desorción del refrigerante. El refrigerante sale del GE como vapor sobrecalentado hacia el CO, donde es condensado por el intercambio de calor con el agua de enfriamiento.

El refrigerante condensado se envía al EV, donde es evaporado por la transferencia de calor del agua de calentamiento que fluye por el interior del tubo del EV. Este vapor saturado es absorbido por la solución concentrada de LiBr-H₂O que escurre sobre el serpentín del AB y se lleva a cabo una reacción exotérmica, liberando calor que es aprovechado por el agua impura que fluye por el interior del AB, para alcanzar la condición de saturación y así obtener una mezcla líquido-vapor.

La mezcla es enviada por bombeo a un tanque separador, donde el vapor sale por la parte superior y el agua líquida vuelve a la entrada del AB. El vapor separado se dirige a un condensador auxiliar donde se condensa para finalmente obtener agua destilada como producto.

A continuación, la solución diluida de LiBr-H₂O sale del AB hacia el EC donde intercambia calor con la solución concentrada de LiBr-H₂O que sale del GE hacia el AB. Al salir del EC la solución de LiBr-H₂O se dirige al GE para reiniciar el ciclo termodinámico (Delgado 2018). El equipo experimental se presenta en la Figura 5.3.



Figura 5.3 Transformador Térmico por Absorción

5.5 Instalación de la Técnica de Conductimetría en el Transformador Térmico por Absorción

La técnica de Conductimetría consta principalmente de dos componentes: una celda de conductividad eléctrica y un conductímetro. La celda de conductividad eléctrica es de marca Signet, modelo 2823-1, con una constante de celda de 20 cm^{-1} , su rango de medición es de 200 a 400 000 μS , sus electrodos son de acero inoxidable 316L, la presión y temperatura máxima de operación es de 100 psi y 150 °C respectivamente, cuenta con juntas tóricas de Caucho de Etileno-Propileno (EPR), material aislante de poliéster éter acetona (PEEK) y emplea un PT1000 como compensación de la temperatura. En la Figura .4 se presenta la celda de medición.



Figura 5.4 Celda de Conductividad Signet 2823-1

El conductímetro eléctrico utilizado es de marca Signet, modelo 5800CR. El intervalo con que opera es de 0.055 a 400 000 μS con una precisión de $\pm 2\%$ de lectura y tiene una salida analógica de 4 a 20 mA. La fuente de alimentación que se requiere es de 12 a 24 Volts de corriente directa o alterna a una frecuencia de 50 a 60 Hz. El instrumento se observa en la Figura 5.5. En el Apéndice A, se describe el procedimiento de calibración del conductímetro eléctrico.



Figura 5.5 Conductímetro Eléctrico Signet 5800CR

Para la celda de conductividad eléctrica fue necesario diseñar una cavidad, para asegurar un volumen de muestra para la medición, posición vertical de la celda de conductividad y se lograra la instalación en el Transformador Térmico.

La conexión en el Transformador Térmico se realizó entre una bomba de desplazamiento positivo y un medidor de flujo (Rotámetro), la cual se encuentra a la salida del componente Dúplex Generador-Condensador (GE-CO). En la Figura 5.6 se observa la instalación de la celda de conductividad eléctrica en el Transformador Térmico.



Figura 5.6 Instalación de Celda de Conductividad Eléctrica

Para la tubería donde fluye la solución LiBr-H₂O se empleó tubería de acero inoxidable 316L ya que la solución LiBr es altamente corrosiva. Para la

interconexión a la bomba y rotámetro, se utilizó tubing de diámetro nominal de 1/2 in (1.27 cm) de acero inoxidable 316L, calibre 18, doblado a diferentes ángulos para mejorar la hermeticidad y la disminución de la caída de presión por las uniones roscables, logrando la interconexión mediante conexiones rápidas (racores) de la marca comercial Swagelok®.

5.6 Pruebas Experimentales

Las pruebas experimentales se realizaron con la solución de trabajo LiBr-H₂O, tomando en cuenta los parámetros de operación de un Transformador Térmico por Absorción. Reportados en la Tabla 5.1 (Delgado 2018).

Tabla 5.1. Condiciones de Operación del GE-CO.

Variable	Intervalo de operación
Flujo másico (kg/s)	
$\dot{m}_{GE, LiBr.s}$	0.01259-0.01962
Presión (kPa)	
P_{GE-CO}	2.97-10.83
Temperatura (°C)	
$T_{GE, LiBr.s}$	20.0 -78.9
Concentraciones (%)	
$X_{GE.s}$	52.38-58.89

Los datos obtenidos de las mediciones de conductividad eléctrica y temperatura, en el transformador térmico, se reportan en la tabla 5.2. Los datos experimentales demuestran que la conductividad eléctrica aumenta conforme incrementa la temperatura, y decrece al aumentar la concentración. Pero también se observa que este comportamiento solo se manifiesta hasta la temperatura de 40 °C, por arriba de este valor el comportamiento es anormal, de acuerdo con datos presentados en la literatura (Fried et al 1983).

Tabla 5.2 Datos Experimentales de conductividad eléctrica y temperatura

Temperatura (°C)	Conductividad Electrica mS cm ⁻¹					
	52.3 %			55.6 %		
30	169.07	152.06	170.32	165.93	165.23	167.68
40	225.08	224.07	220.50	184.62	184.08	188.91
50	168.75	165.35	163.52	144.91	145.65	140.35
60	130.45	125.35	120.65	115.89	120.90	117.32

Posiblemente el comportamiento se debe a que se genera burbujas en el sistema, debido a la temperatura, o debido a turbulencia generada por la bomba de desplazamiento positivo, de esta forma la celda no realiza bien la medición. Otro posible problema es la posición de instalación de la celda, ya que el manual recomienda que sea de forma horizontal. Finalmente que la cavidad de la celda no sea la adecuada.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

1. La técnica de medición de la propiedad de la conductividad eléctrica es considerada no invasiva, ya que no se extrae muestra del sistema, el muestreo se realiza en situ, tiempo real y no afecta las condiciones de operación del proceso.
2. Los valores obtenidos de las mediciones de la conductividad eléctrica de la solución de bromuro de litio acuoso a diferentes concentraciones y temperaturas concuerdan con los valores obtenidos en los trabajos reportados previamente en la literatura. Existe una discrepancia de hasta 13.2 % en los datos.
3. Se propone una correlación semiempírica de conductividad eléctrica del bromuro de litio (LiBr) acuoso en el intervalo de operación de 45 a 65 % en peso del LiBr a un intervalo de temperatura de 35 °C a 80 °C, con una incertidumbre $\pm 3.68 \text{ mS cm}^{-1}$. El intervalo de medición está dentro de las condiciones de operación de los transformadores térmicos por absorción.
4. Mediante el análisis de la comparación de medición de las propiedades de densidad, velocidad del sonido, índice de refracción y conductividad eléctrica de la solución de bromuro de litio acuoso, se comprueba que la técnica de conductividad eléctrica es un método

confiable en el intervalo de operación de los transformadores térmicos, debido a que es no invasivo, requiere poco volumen de muestreo e instrumentación de bajo costo.

5. Se diseñó una cavidad para el dispositivo de medición de conductividad eléctrica. El muestreo se llevó de forma localizada y uniforme. Se asegura el volumen necesario de la solución, en el área de los electrodos.
6. La celda de conductividad eléctrica, presento saturación de cargas en los electrodos (ánodo y cátodo). Esto se generó como resultado de una diferencia de voltaje constante.
7. La instalación de la técnica de muestreo de conductividad eléctrica en el transformador térmico se localizó a la salida del componente del generador, bajo las condiciones de operaciones siguientes

Variable	Intervalo de operación
Flujo másico (kg/s)	
$\dot{m}_{GE, LiBr,s}$	0.01259-0.01962
Presión (kPa)	
P_{GE-co}	2.97-10.83
Temperatura (°C)	
$T_{GE, LiBr,s}$	20.0 -78.9
Concentraciones (%)	
$X_{GE,s}$	52.38-58.89

Este punto de muestreo se consideró dada las condiciones de operación y la configuración de los componentes del transformador térmico.

8. Las mediciones de conductividad eléctrica y temperatura, realizadas en el transformador térmico, presentaron un comportamiento diferente a temperaturas superiores a los 40 °C, posiblemente se vea afectada por la turbulencia del flujo másico y polarización de los electrodos.

5.1 Recomendaciones

Con base en la realización de este proyecto de experimentación y debido a los resultados obtenidos se recomienda lo siguiente.

1. Acoplar una fuente de alimentación de voltaje externa a la celda de conductividad eléctrica, para variar el voltaje suministrado, disminuyendo así la polarización.
2. Emplear una celda de conductividad eléctrica de tipo toroidal, los electrodos no tienen contacto con la solución de trabajo, procurando que no se manifieste el fenómeno de la polarización, presente en los electrodos.
3. Instalar el método de medición de conductividad eléctrica en la entrada y salida del generador, así como en la entrada y salida del absorbedor de un transformador térmico. Con el objetivo de determinar la concentración de la solución LiBr-H₂O.

4. La posición de instalación de la celda de conductividad eléctrica, deberá ser en forma paralela a las conexiones de tubería de la salida del generador. Para lograr atenuar el efecto del flujo másico en las mediciones.

5. Realizar diseños de caracterización de la celda de conductividad eléctrica, para su instalación y adecuación en el muestreo de la concentración de la solución de trabajo presente en los transformadores térmico.

BIBLIOGRAFIA

- Barron J. J. and Ashton C. (2005). The Effect of Temperature on Conductivity Measurement
- Boryta D. (1970). Solubility of Lithium Bromide in Water between -50 and 100 °C. *J. Chem. Eng. Data* 1, 142-144.
- Cartón A., Sobrón F., Bolado S. and Gerboles J. (1995). Density, viscosity, and Electrical Conductivity of Aqueous Solutions of Lithium Sulfate. *J. Chem. Eng. Data* 40, 987-991.
- De Diego A., Madariaga J. M. & Chapela E. (1997). Empirical model of general application to fit (c, T, k) experimental data from concentrated aqueous electrolyte solutions. *Electrochimica* vol 42 No 9 pp 1449-1456.
- De Diego A., Usobiaga A., Fernandez L. A. y Madariaga J. M. (2001). Application of the electrical conductivity of concentrated electrolyte solutions to industrial process control and design: from experimental measurement towards prediction through modelling. *Analytical Chemistry*, vol 20, No 2, 65- 78.
- Delgado G. J. (2018). Análisis Experimental de un Transformador Térmico por absorción para Purificación de Agua que opera con componentes Duales. . Tesis de Doctorado. Centro de Investigación

en Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México.

- Della M. M., Cegli A. & Agostiano A. (1983). A Conductivity Equation for Concentrated Aqueous Solutions. *Electrochimica* vol 29 pp 933-937.
- Deng S. M. & Ma W. B. (1999). Experimental studies on the characteristics of an absorber using LiBr/H₂O solution as working fluid. *International Journal of Refrigeration* 22, pp 293-301.
- Demesa López Francisco Noé. (2012). Diseño y Construcción de una Intercambiador de Calor Dúplex para un Transformador Térmico por Absorción. Tesis de Maestría. Centro de Investigación en Ingeniería en Ciencias Aplicadas. Universidad Autónoma del Estado de Morelos. México
- Diguilio R.M. and Teja A.S. (1992). Thermal Conductivity of Aqueous salt solutions at high temperaturas and high concentration. *Ind. Eng. Chem. Res.* 31, 1081-1085.
- Elsafty A. (2013). Effect of surfactant concentration on aqueous LiBr solution absorption rate. *Journal of Physical Chemistry* 3, 1-6.

-
- Elsafty A., Al-Samarraie and Al-Daini A. J. (2000). Concentration Measurement in Aqueous Lithium Bromide. Worl Renewable Energy Congress VI
 - Emerson (2010). Theory and Application of conductivity. Rosemount Analytical.
 - Fried I. and Segal M. (1983). Electrical conductivity of concentrated lithium bromide aqueous solutions. J. Chem. Eng. Data 28, 127-130.
 - Gilliam R. J., Graydon J. W., Kirk D. W., and Thorpe S. J. (2007). A review of specific conductivities of potassium hydroxide solutions for various concentrations and temperatures, Int J Hydrogen Energy. 32 359-364.
 - Harvey D. (2000). Modern Analytical, Mc Graw Hill. U.S.A. pp 461-542.
 - Herold K. E. & Yuan Z. (2005). Thermodynamic Properties of Aqueous Lithium Bromide using a Multiproperty Free Energy Correlation.
 - Holland F., Siqueiros, J., Santoyo, S., Heard, C. L. y Santoyo, E. R. (1999). Water purification using heat pumps. E & FN Spon. Taylor & Francis Group. London.
 - IC Controls (2017). Conductivity Thoery and Measurement.

-
- Islam S.S., Gupta R.L. and Ismail K. (1991). Extension of the Falkenhagen-Leist-Kelbg Equation to the Electrical Conductance of Concentrated Aqueous Electrolytes. J. Chem. Eng. Data 36, 102-104
 - Kaita Y. (2000) Thermodynamic properties of lithium bromide –water solutions at high temperatures. International Journal of Refrigeration 24, 374-390.
 - Patil K. R., Tripathi A. D., Pathak G. and Katti S. S. (1990). Thermodynamic Properties of Aqueous Electrolyte Solutions. Vapor Pressure of Aqueous Solutions of LiCl, LiBr, and LiI. J. Chem. Eng. Data 35, 166-168.
 - Laidler K. J. & Meiser (2011). Fisicoquímica, décima edición, Patria, México, D.F
 - Lee R. J., DiGuilio R. M. , Jeter S.M: and Teja A.S (1990). Properties of Lithium Bromide-water solution at high temperatura and concentration-II Density and viscosity, ASHRAE Trans, 413-434.
 - Robson W. M.(2007). An Introduction to Aqueous Electrolyte Solutions. John Wiley & Sons Ld. England pp 422-473.
 - Rohman N., Dass N. N. and Mahiuddin S. (2002). Isentropic compressibility , effective pressure, classical sound absorption and

shear relaxation time of aqueous lithium bromide, sodium bromide and potassium bromide solution. J. of Molecular Liquids 100/3 265-290.

- Romero R.J. and Silva S. S. (2006). Comparison of the instrumental methods for in-line determination of LiBr concentration in solar absorption thermal system. Solar energy materials & solar cells 90, 2549-2555.
- Rubinson K. A. & Rubinson J. F. (2001). Análisis Instrumental, primera edición, Prentice Hall. Madrid, España. Pp 281-290
- Shahata A. I., Elsafty A. F. y Elnasr M.M.(2012). Concentration Measurement Technique for Aqueous Lithium Bromide Solution in Vapor Absorption Air Conditioning System. International Journal of Science and Technology Vol. 2 No. 4. 234-236
- Skoog D. A., Holler F.J. and Nieman T. A. (2001). Análisis Instrumental, quinta edición, Mc Graw Hill. España Pp 607- 638.
- Skoog D., West D. M., Holler F. J. y Crouch S. R. (2000). Química Analítica, séptima edición, Mc Graw Hill. México, D.F. Pp 2-567.
- See D. M. and White R. E.(1997), Temperature and concentration dependence of the specific conductivity of concentrated solutions of potassium hydroxide, J. Chem. Eng. Data. 42 1266-1268.

-
- Settle F. (1997). Handbook of Instrumental Techniques for analytical Chemistry Prentice Hall. New Jersey ,U.S.A. pp 684-764
 - Tapscott R. E. & Heinonen E.W. (1997). Secondary Properties of aqueous lithium bromide solutions.
 - Wimby J. M. & Berntsson T. S. (1994). Viscosity and density of aqueous solutions of LiBr,LiCl, ZnBr₂, CaCl₂ and LiNO₃. 1 Single salt solutions. J. Chem. Eng. 39, 68-72
 - Zafarani-Moattar M. T. and Shekaari H. (2007). Density and Speed of Sound of Lithium Bromide with Organic Solvents: Measurement and Correlation. J. Chem. Thermodynamic 39, 1649-1660.
 - Zaltash A. and Ally R. M. (1992). Refractive indexes of aqueous LiBr solutions . J.Chem. Eng. 37, 110-113.

○ .

APÉNDICE A CALIBRACIÓN DEL CONDUCTIMETRO ELÉCTRICO

La calibración puede realizarse por medio de una solución de conductividad conocida y un termómetro de gran exactitud (A) o por simulación de resistores fijos (B).

A) Calibración con soluciones conocidas de NIST.

Al usar estándares de calibración conocidas del Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST), debe tenerse cuidado de asegurar de que el sensor y la solución de prueba estén a la temperatura de solución especificada en la etiqueta de la solución. Para evitar que se contamine la solución de calibración. Se recomienda enjuagar cuidadosamente el sensor en una pequeña cantidad de solución de prueba antes de colocarlo en alguna solución de prueba con propósitos de calibración. En la Figura B.1, se da a conocer la solución estándar de calibración expedida por el NIST.



Figura B.1. Solución de Estándar de Calibración

En la Figura B.2 se ilustra la calibración del conductímetro mediante la solución estándar de calibración del NIST, empleando un baño térmico para determinar la temperatura y un sensor PT100 para medir la temperatura.



Figura B.2 Procedimiento de Calibración.

B) Calibración por simulación de resistencias.

Se utilizan resistores de precisión [$\pm 0.1\%$] conectados a las terminales de "Temp In", "Signal In" y "Iso Gnd" ubicadas en la parte posterior del conductímetro en lugar del sensor Signet, se obtiene una calibración de instrumentos electrónicos rápida y exacta. El procedimiento de calibración en húmedo [WET CAL] permite verificar o calibrar la temperatura, y después la conductividad, resistividad o ppm [TDS] utilizando resistores de precisión. La calibración se lleva a cabo como sigue:

- 1) Seleccionar la constante de celda estándar de acuerdo al rango de operación.
- 2) Coloque un resistor de TC de 1096Ω entre las terminales "Temp In" e "Iso gnd".
- 3) Calcular el resistor de simulación requerido que representa un valor dentro del rango de la celda seleccionada. Las resistencias empleadas se observan en la Figura B.3. La fórmula para determinar la conductividad eléctrica de simulación es:

$$\text{Conductividad eléctrica} = \frac{\text{Celda del Sensor}}{\text{Resistencia de simulación}} \quad B.1$$



Figura B.3 Resistencias de Simulación

- 4) Coloque la resistencia de simulación calculada entre las terminales “Temp In” e “Iso Gnd”. En la Figura B.4, se representa el diagrama de calibración.

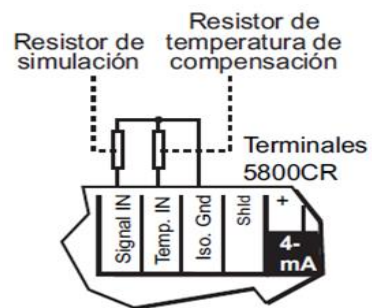


Figura B.4 Diagrama de Calibración

- 5) Realice el procedimiento de calibración, estableciendo la temperatura a 25.0 °C y la conductividad al valor obtenido en el paso tres.

Anexo 1**Producción científica****Artículos:**

Labra L. Juárez-Romero D., Siqueiros J., Coronas A. And Salavera D (2017). Measurement of Properties of a Lithium Bromide Aqueous Solution for a Prototype Absorption Machine. Applied Thermal Engineering Vol 114. Pp 1186-1192

Congresos:

Labra L., Juárez-Romero D., Siqueiros J. and Torres M. J. (2013). Estimación de Composición de LiBr para un Transformador Térmico por Absorción. XXVIII Congreso Nacional de Termodinámica y Tercer Simposio Nacional de Fisicoquímica. La Sociedad Mexicana de Termodinámica, A. C. y el Centro de Investigaciones y de Estudios Avanzados del IPN (Cinvestav).

Labra L. Juárez-Romero D., Siqueiros J., Coronas A. And Salavera D. (2015). MEASUREMENT OF PROPERTIES OF A LITHIUM BROMIDE AQUEOUS SOLUTION FOR THE DETERMINATION OF THE CONCENTRATION FOR A PROTOTYPE ABSORPTION MACHINE. Third International Symposium on Renewable Energy and Sustainability. Instituto de Energías Renovables (UNAM) en Temixco (Morelos).