



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Química

**ELABORACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO-ESTADÍSTICO QUE PERMITA PREDECIR  
EL COMPORTAMIENTO DEL EQUILIBRIO DE FASES DE UN SISTEMA BINARIO  
NAFTALENO-ÁCIDO BENZOICO, A NIVEL LABORATORIO Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE  
640 mmHg**

**Karla Anaitee Santa María Segura**

Asesorado por el Ing. William Eduardo Fagiani Cruz

Guatemala, enero de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ELABORACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO-ESTADÍSTICO QUE PERMITA PREDECIR  
EL COMPORTAMIENTO DEL EQUILIBRIO DE FASES DE UN SISTEMA BINARIO  
NAFTALENO-ÁCIDO BENZOICO, A NIVEL LABORATORIO Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE  
640 mmHg**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**KARLA ANAITEE SANTA MARÍA SEGURA**  
ASESORADO POR EL ING. WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERA QUÍMICA**

GUATEMALA, ENERO DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Orlando Posadas Valdez
EXAMINADOR	Ing. César Alfonso García Guerra
EXAMINADOR	Ing. Manuel Emilio Figueroa Solares
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

## HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ELABORACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO-ESTADÍSTICO QUE PERMITA PREDECIR  
EL COMPORTAMIENTO DEL EQUILIBRIO DE FASES DE UN SISTEMA BINARIO  
NAFTALENO-ÁCIDO BENZOICO, A NIVEL LABORATORIO Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE  
640 mmHg**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 25 de julio de 2017.



**Karla Anaitee Santa María Segura**

Guatemala, 5 de septiembre de 2018

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
Director Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería  
Universidad de San Carlos de Guatemala  
Presente

Estimado Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al informe final del Trabajo de Graduación **“ELABORACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO-ESTADÍSTICO QUE PERMITA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DEL EQUILIBRIO DE FASES DE UN SISTEMA BINARIO NAFTALENO-ÁCIDO BENZOICO, A NIVEL LABORATORIO Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE 640 mmHg”**, de la estudiante de Ingeniería Química Karla Anaitee Santa María Segura quien se identifica con el carné número 201314044 y CUI 2686 07354 0101.

Sin otro particular me suscribo de usted.

Atentamente,

  
INGENIERO QUÍMICO  
WILLIAM EDUARDO FAGIANI CRUZ  
COL. 1734  
Ing. William Eduardo Fagiani Cruz  
Colegiado No. 1734  
Asesor



Guatemala, 16 de octubre de 2018.  
Ref. EIQ.TG-IF.051.2018.

Ingeniero  
Carlos Salvador Wong Davi  
DIRECTOR  
Escuela de Ingeniería Química  
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **018-2017** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

**INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN  
-Modalidad Seminario de Investigación-**

Solicitado por la estudiante universitaria: **Karla Anaitee Santa María Segura**.  
Identificada con número de carné: **2686 07354 0101**.  
Identificada con registro académico: **2013-14044**.  
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

**ELABORACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO-ESTADÍSTICO QUE PERMITA  
PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DEL EQUILIBRIO DE FASES DE UN SISTEMA  
BINARIO NAFTALENO-ÁCIDO BENZOICO, A NIVEL LABORATORIO Y PRESIÓN  
ATMOSFÉRICA DE 640 mmHg**

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **William Eduardo Fagiani Cruz**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.



"ID Y ENSEÑADA A TODOS"

Ing. César Alfonso García Guerra  
COORDINADOR DE TERNA  
Tribunal de Revisión  
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo



Ref.EIQ.TG.002.2019

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **KARLA ANAITEE SANTA MARÍA SEGURA** titulado: **"ELABORACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO-ESTADÍSTICO QUE PERMITA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DEL EQUILIBRIO DE FASES DE UN SISTEMA BINARIO NAFTALENO-ÁCIDO BENZOICO, A NIVEL LABORATORIO Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE 640 mmHg"**.  
Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

*"Id y Enseñad a Todos"*

Ing. Carlos Salvador Wong Davi  
Director

Escuela de Ingeniería Química  
FACULTAD DE INGENIERÍA USAC  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
DIRECTOR

Guatemala, enero 2019

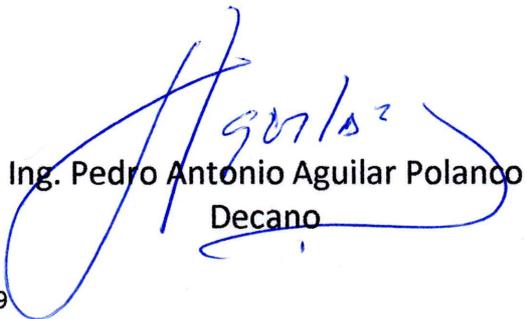
Cc: Archivo  
CSWD/ale



DTG. 016.2019

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **ELABORACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO-ESTADÍSTICO QUE PERMITA PREDECIR EL COMPORTAMIENTO DEL EQUILIBRIO DE FASES DE UN SISTEMA BINARIO NAFTALENO-ÁCIDO BENZOICO, A NIVEL LABORATORIO Y PRESIÓN ATMOSFÉRICA DE 640 mmHg,** presentado la estudiante universitaria: **Karla Anaitee Santa María Segura,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, enero de 2019



/gdech

## **ACTO QUE DEDICO A:**

- Dios** Por su eterna misericordia y amor hacia mí, por ser una parte esencial en mi vida, por nunca abandonarme y darme la capacidad de concluir esta etapa.
- Mi mamá** Claudia Segura, por su amor y apoyo durante mi carrera, por su dedicación y abnegación, y sus exigencias que siempre me hacen ser mejor.
- Mi papá** Hugo Santa María, por su amor y apoyo durante mi carrera, su constante e incansable motivación y ejemplo de perseverancia.
- Mi abuelita** Regina Segura, por su amor y apoyo durante mi carrera, su paciencia y atenciones que siempre estaban presentes en el momento indicado.
- Mis hermanos** Carlos Josué y Claudia Yohana Santa María, por su amor y apoyo durante mi carrera. Por inspirarme a ser cada día mejor.
- Daniel Fuentes** Por ser una persona importante en mi vida, por su amor y apoyo.

**Mi tía**

Karla Segura, que en paz descanse, por ser una fuente de inspiración.

**Mi bisabuela**

Amparo Velásquez, por su cariño y por ser una persona importante en mi vida.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Por la oportunidad de estudiar y empezar mi carrera profesional.
<b>Mi familia</b>	Santa María Segura, por su apoyo incondicional durante estos años, por estar en cada paso del camino e inspirarme a alcanzar todas mis metas.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Daniel Fuentes, Rony Vielman, Alejandro de León, Sofía García, Andrea Martínez, Yuri Maldonado, Michelle Izaguirre, Antonio Villalta, José Andrés Valenzuela, Lissa Quiroa, Natali Milian, Andrés Escobar, Emilio Galindo, Juan Carlos Rojas, Susi Ruiz, Raquel Saquec, Vallery Carrera, Jhonathan Butz, Pablo Fajardo y a mis demás amigos; sin ustedes la universidad no hubiera sido una experiencia tan grata e inolvidable.
<b>Mis amigos del colegio</b>	Allan Yates, Larissa Ferro, Luis Carlos García, María José Grajeda, Suzeth Rojas, Pablo Godoy y Juan Rodolfo García por su apoyo y cariño, que a pesar de los años no disminuye.

<b>Mis amigos</b>	Adriana Echeverría, Gaby Ramos, Melani Coyoy, Luis Mijangos, Cloe Muñoz, Edna Dardón, Juan José Pérez y Catalino Carrera, por su cariño y apoyo en los momentos difíciles.
<b>Mis padrinos</b>	Álvaro Longo y Paty de Longo, por su apoyo.
<b>Mi padrino</b>	Manuel Garzaro, por su apoyo a pesar de la distancia.
<b>Familia Mejía, Segura y Santa María</b>	En especial a mis tías Carolina, Alda, Sofía, Ana Sofía y Maritza, a mi tío Iván, y a mis primos Andrés, Karen y Andrea, por su apoyo durante estos años.
<b>Área de Físicoquímica</b>	Por permitirme realizar este trabajo de graduación, por todas las enseñanzas y ayuda.
<b>Ing. William Fagiani</b>	Por asesorarme en este trabajo de graduación, por su apoyo, enseñanzas, consejos y amistad.
<b>Inga. Ana Herrera</b>	Por sus enseñanzas, consejos y amistad.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	V
LISTA DE SÍMBOLOS .....	IX
GLOSARIO .....	XIII
RESUMEN .....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
HIPÓTESIS.....	XX
INTRODUCCIÓN .....	XXIII
1. ANTECEDENTES .....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Equilibrio.....	9
2.1.1. Equilibrio de fases .....	10
2.2. Equilibrio sólido-líquido.....	12
2.2.1. Miscibilidad en fase líquida e inmiscibilidad en fase sólida.....	12
2.2.2. Termodinámica del equilibrio sólido-líquido .....	13
2.2.2.1. Fundamentos.....	14
2.2.2.2. Fusión de la fase sólida .....	15
2.2.3. Propiedades molares parciales.....	18
2.2.3.1. Ecuación de Gibbs-Duhem.....	18
2.3. Análisis térmico .....	19
2.3.1. Ley del enfriamiento de Newton .....	20
2.3.2. Modelo de Fourier.....	21
2.4. Características de los compuestos.....	23

2.4.1.	Naftaleno .....	23
2.4.2.	Ácido Benzoico.....	24
3.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	25
3.1.	Variables .....	25
3.1.1.	Variables independientes .....	25
3.1.2.	Variables dependientes .....	25
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	26
3.3.	Recursos humanos disponibles .....	27
3.4.	Recursos materiales disponibles.....	27
3.4.1.	Equipos auxiliares .....	27
3.4.2.	Reactivos químicos .....	28
3.5.	Recolección y ordenamiento de la información.....	28
3.5.1.	Procedimiento experimental para la caracterización del equilibrio de fases sólido- líquido.....	29
3.6.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información.....	31
3.6.1.	Caracterización experimental del equilibrio de fases de un sistema binario naftaleno-ácido benzoico.....	31
3.6.2.	Obtención de un modelo que permitiera estimar las desviaciones del comportamiento ideal .....	36
3.7.	Análisis estadístico.....	37
3.7.1.	Hipótesis estadísticas.....	38
3.7.2.	Pruebas estadísticas .....	39
3.7.2.1.	Prueba de Anderson-Darling .....	40
3.7.2.2.	Análisis de residuos .....	41

	3.7.2.2.1.	Gráfica de residuos contra x.....	41
	3.7.2.2.2.	Gráfica de residuos contra y .....	44
	3.7.2.2.3.	Residuos estandarizados .....	44
	3.7.2.2.4.	Gráfica de probabilidad normal. ....	45
	3.7.2.3.	Intervalos de predicción .....	46
4.	RESULTADOS .....		49
4.1.	Caracterización experimental del sistema binario naftaleno- ácido benzoico.....		49
4.2.	Modelo matemático-estadístico del equilibrio de fases del sistema binario naftaleno-ácido benzoico.....		51
4.3.	Análisis estadístico del modelo propuesto.....		54
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....		63
5.1.	Caracterización experimental del equilibrio de fases.....		63
5.2.	Obtención de un modelo que permite estimar las desviaciones del comportamiento ideal .....		64
5.3.	Estimación estadística del nivel de correlación, independencia, variabilidad y predicción de tendencia del modelo propuesto .....		66
	CONCLUSIONES .....		69
	RECOMENDACIONES .....		71
	BIBLIOGRAFÍA.....		73
	APÉNDICES .....		77



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Mezcla de dos líquidos con T y P constantes.....	XXI
2.	Interacciones entre moléculas en una disolución ideal .....	XXI
3.	Moles de la sustancia j que fluyen de la fase $\beta$ a la fase $\delta$ .....	10
4.	Minimización de energía de Gibbs .....	11
5.	Diagrama de fases sólido-líquido cuando existe miscibilidad total en fase líquida e inmiscibilidad en fase sólida.....	12
6.	Relación entre parámetros termodinámicos .....	17
7.	Curvas de enfriamiento .....	20
8.	Comparación de conductividad térmica.....	22
9.	Estructura de naftaleno .....	23
10.	Estructura de ácido benzoico .....	24
11.	Unidad experimental .....	30
12.	Fraccionamiento de tubo de ensayo .....	32
13.	Gráfica de conductividad en función de temperatura .....	33
14.	Curva de enfriamiento de la segunda repetición de la composición 4....	35
15.	Gráfica de residuos contra la variable independiente x.....	42
16.	Gráficas de los residuos correspondientes a tres estudios de regresiones.....	43
17.	Gráfica de residuos contra el valor pronosticado y .....	44
18.	Gráfica de residuos estandarizados contra la variable independiente x.	45
19.	Gráfica de probabilidad normal .....	46
20.	Intervalos de confianza y de predicción .....	47
21.	Diagrama de equilibrio sólido-líquido .....	49

22.	Gráficas de caja de temperaturas de equilibrio sólido líquido .....	50
23.	Gráfica de línea ajustada de $G_m(E)/(RTx_Ax_B)$ en función de $\ln(x_A)$ .....	52
24.	Simulación del diagrama de equilibrio sólido líquido realizado con el modelo obtenido .....	53
25.	Correlograma .....	55
26.	Informe de residuos .....	56
27.	Gráfica de caja de residuos .....	57
28.	Gráfica de residuos en función de ajustes .....	58
29.	Gráfica de probabilidad normal de residuos.....	59
30.	Gráfica de valores individuales de residuos.....	60
31.	Prueba de igualdad de varianzas.....	61
32.	Residuos en función de orden de observación .....	62
33.	Comparación del modelo coligativo para una mezcla diluida ideal y los datos experimentales obtenidos .....	64
34.	Comparación del modelo coligativo para una mezcla diluida ideal, el modelo propuesto y los datos experimentales .....	65

## TABLAS

I.	Propiedades del naftaleno.....	23
II.	Propiedades del ácido benzoico.....	24
III.	Variables del proceso.....	26
IV.	Datos teóricos recopilados.....	28
V.	Composiciones del sistema binario naftaleno ( $x_b$ )-ácido benzoico ( $x_a$ ) ..	29
VI.	Aleatorización de las muestras.....	30
VII.	Conductividad de acero inoxidable AISI 316.....	32
VIII.	Resumen de análisis estadístico de diferentes modelos matemático- estadísticos.....	54
IX.	Resumen del modelo.....	54
X.	Análisis de varianza.....	55
XI.	Coefficientes del modelo propuesto.....	62



## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$a$	Actividad
$A$	Área
$Q$	Calor
$q_p$	Calor a presión constante
$\dot{Q}_{cond}$	Calor conductivo
$\dot{Q}_{conv}$	Calor convectivo
$\Delta_{fus}H_{m,B}$	Cambio de entalpía molar de fusión del componente B
$\Delta_{fus}H_{m,C}$	Cambio de entalpía molar de fusión del componente C
$\Delta T$	Cambio de temperatura
$C_p^L$	Capacidad calorífica del líquido
$C_p^S$	Capacidad calorífica del sólido
$C_p$	Capacidad calorífica isobárica
$\gamma_i$	Coefficiente de actividad
$\gamma_i^{(l)}$	Coefficiente de actividad de la fase líquida del componente i
$x_A$	Composición de ácido benzoico en la mezcla
$x_i^{(l)}$	Composición de la fase líquida del componente i
$x_i$	Composición de la mezcla
$x_B$	Composición de naftaleno en la mezcla
$x_B$	Composición del componente B

$x_c$	Composición del componente C
<b>k</b>	Conductividad térmica
<b>R</b>	Constante de los gases ideales
$D_e$	Diámetro externo
$D_i$	Diámetro interno
$\Delta G_{m,i}^{(s \rightarrow l)}$	Energía de Gibbs molar de fusión del componente i
$G_{m,i}^{(l)}$	Energía de Gibbs molar de la fase líquida del componente i
$G_{m,i}^{(s)}$	Energía de Gibbs molar de la fase sólida del componente i
$G_m^{(E)}$	Energía de Gibbs molar en exceso
$\Delta G^f$	Energía libre de fusión
<b>G</b>	Energía libre de Gibbs
<b>H</b>	Entalpía
$\Delta H^f$	Entalpía de fusión
$\Delta fH^\circ$	Entalpía de fusión
$H_{ref}^{150^\circ C}$	Entalpía de referencia a 150°C
$H^L$	Entalpía del líquido
$H^S$	Entalpía del sólido
<b>S</b>	Entropía
$\Delta S^f$	Entropía de fusión
$\Delta x$	Espesor
<b>x</b>	Espesor de tubo de ensayo
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>°F</b>	Grados Fahrenheit
<b>J</b>	Joule
<b>kJ</b>	Kilojoule
$L_e$	Longitud externa

$L_i$	Longitud interna
<b>m</b>	Metro
<b>n</b>	Moles
$n_i^\alpha$	Moles del componente i en la fase $\alpha$
<b>NRTL</b>	Non-random two-liquid model
<b>ft</b>	Pie
$\mu_i^{(l)}$	Potencial químico de la fase líquida del componente i
$\mu_i^\alpha$	Potencial químico del componente i en la fase $\alpha$
$\mu_j^\beta$	Potencial químico del componente j en la fase $\beta$
$\mu_j^\delta$	Potencial químico del componente j en la fase $\delta$
$\mu^L$	Potencial químico del líquido
$\mu^S$	Potencial químico del sólido
<b>P</b>	Presión
<b>M</b>	Propiedad
$\overline{M}_i$	Propiedad molar parcial del componente i
$r_0$	Radio interno
<b>T</b>	Temperatura
$T_m$	Temperatura de fusión
$T_B^*$	Temperatura de fusión del componente B
$T_C^*$	Temperatura de fusión del componente C
$T_s$	Temperatura de la superficie
$T_\infty$	Temperatura de los alrededores
<b>t</b>	Tiempo
<b>V</b>	Volumen
<b>W</b>	Watt



## GLOSARIO

<b>ASOG</b>	Activity Specific Operation Guideline
<b>Coefficiente de actividad</b>	Mide el grado de divergencia del comportamiento de una sustancia con respecto del comportamiento ideal.
<b>Conducción</b>	Transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes, menos energéticas, por la interacción entre ellas.
<b>Convección</b>	Modo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que están en movimiento.
<b>Correlación</b>	Indica la fuerza y dirección de una relación lineal y proporcionalidad entre dos variables estadísticas.
<b>Elucidación</b>	Aclaración o explicación.
<b>Ecuación estocástica</b>	Una ecuación diferencial estocástica es una ecuación diferencial en la cual uno o más de sus términos es un proceso estocástico y cuya solución es también un proceso estocástico.
<b>Estocástico</b>	(del latín <i>stochasticus</i> ) sistema cuyo comportamiento es intrínsecamente no determinista.

<b>Inmiscibilidad</b>	Incapacidad de algunos líquidos para mezclarse en cualquier proporción, formando una solución homogénea.
<b>Miscibilidad</b>	Propiedad de algunos líquidos para mezclarse en cualquier proporción, formando una disolución.
<b>Proceso estocástico</b>	En estadística, y específicamente en la teoría de la probabilidad, un proceso estocástico es un concepto matemático que sirve para usar magnitudes aleatorias que varían con el tiempo.
<b>Proceso isobárico</b>	Proceso termodinámico que ocurre a presión constante.
<b>Proceso isotérmico</b>	Proceso termodinámico que ocurre a temperatura constante.
<b>Propiedad coligativa</b>	Son todas aquellas propiedades de una disolución que depende únicamente de la concentración.
<b>Punto eutéctico</b>	Es el punto de temperatura más baja a la cual puede fundir una mezcla de dos compuestos con una composición fija.
<b>Reacción metatéctica</b>	Reacción que ocurre cuando al descender la temperatura de un sólido, se producen simultáneamente una fase líquida y una fase sólida diferente.

<b>Reacción peritética</b>	Reacción que ocurre cuando una fase líquida reacciona con otra fase sólida para producir otra fase sólida diferente.
<b>Superenfriado</b>	Líquido que se ha enfriado por debajo de su punto de congelación sin que se haga sólido.
<b>Termodinámica</b>	Ciencia macroscópica que estudia las interrelaciones de las diversas propiedades de equilibrio de un sistema y los cambios en las propiedades de equilibrio en procesos.



## RESUMEN

En este estudio se elaboró un modelo matemático-estadístico para predecir el comportamiento del equilibrio de fases de un sistema binario naftaleno-ácido benzoico, a escala laboratorio. Para esto, se utilizó un análisis térmico, calentando mezclas binarias, a 9 composiciones diferentes, posteriormente se dejaron enfriar, para monitorear la temperatura interna y externa del contenedor. Dichas temperaturas se utilizaron para estimar la velocidad de transferencia de calor, el calor y la entalpía. Con esta última se determinaron las temperaturas de fusión, con las cuales se realizó el diagrama de fases sólido-líquido.

Luego, se calcularon las desviaciones de la idealidad, y se relacionaron con diferentes regresiones en función de la composición para encontrar el modelo que permita la mejor predicción. Dicho modelo fue sometido a cuatro pruebas estadísticas para estimar su validez, obteniendo la siguiente ecuación estocástica de estimación: para la energía de Gibbs en exceso, parámetro que permite vislumbrar el comportamiento molecular de la mezcla.

$$\frac{G_m^{(E)}}{RT} = x_A(1 - x_A)[(1,44 \pm 0,183) + (-2,84 \pm 0,171) \ln x_A]$$

Se concluyó que la mezcla binaria de naftaleno y ácido benzoico no se comporta como una disolución ideal, que el modelo propuesto tiene un nivel de independencia, variabilidad y predicción de tendencia aceptables y que, con el análisis térmico, corregido con el modelo de Fourier, es posible construir de modelos matemáticos estocásticos para la simulación del equilibrio.

La investigación se realizó en la ciudad de Guatemala a una temperatura ambiental entre 15 y 25°C a una presión atmosférica de 0,84 atmósferas.

# OBJETIVOS

## General

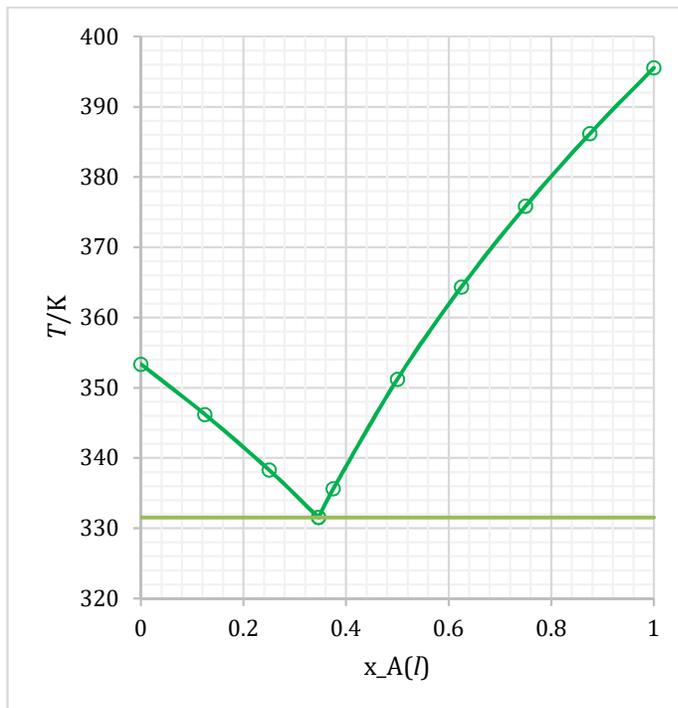
Elaborar un modelo matemático-estadístico que permita predecir el comportamiento del equilibrio de fases de un sistema binario naftaleno-ácido benzoico, a escala laboratorio.

## Específicos

1. Caracterizar experimentalmente el equilibrio de fases de un sistema binario naftaleno-ácido benzoico a diferentes composiciones mediante sus puntos de fusión.
2. Obtener un modelo matemático que permita estimar las desviaciones del comportamiento ideal para el equilibrio de fases del sistema binario naftaleno-ácido benzoico.
3. Estimar estadísticamente el nivel de correlación, independencia, variabilidad y predicción de tendencia del modelo propuesto.

## HIPÓTESIS

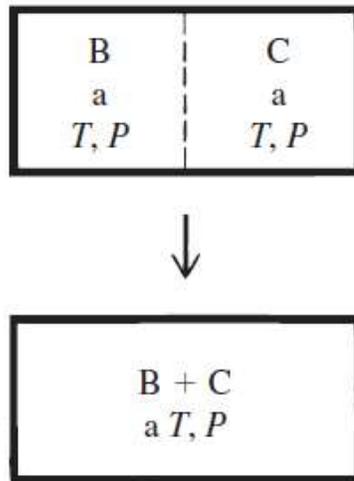
La mezcla de naftaleno y ácido benzoico cumple significativamente con el modelo coligativo para una disolución ideal.



El modelo coligativo para una mezcla diluida ideal se aplica en el límite en el que las moléculas de diferentes especies se parecen mucho entre sí por lo que no cambiaría la energía de interacción molecular en la disolución o la estructura parcial al reemplazar la molécula de una especie por otra. Además, no existe un cambio de energía o volumen en la formación de una disolución ideal, como se observa en la Figura 1, debido a que las moléculas presentan un efecto por interacción adicional debido a la similitud de sus estructuras. Esto puede ser descrito por la ecuación:

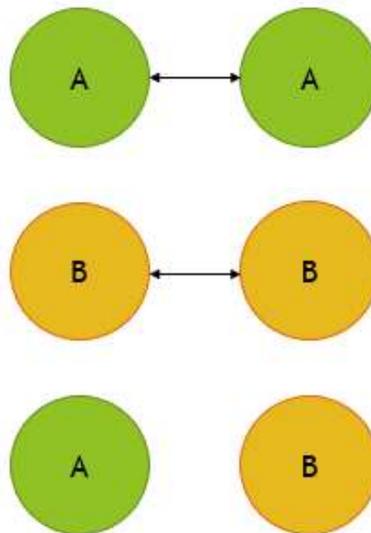
$$\mu_i = G_{m,i} + RT \ln x_i \quad (1)$$

Figura 1. Mezcla de dos líquidos con T y P constantes



Fuente: LEVINE, Ira. *Principios de fisicoquímica*. P. 256.

Figura 2. Interacciones entre moléculas en una disolución ideal



Fuente: elaboración propia.



## INTRODUCCIÓN

“El comportamiento de fase que incluye los estados sólido y líquido es la base para los procesos de separación (por ejemplo, cristalización) en Ingeniería Química y de materiales”<sup>1</sup>. Es por ello que se considera un tema de investigación importante para los estudiantes de Ingeniería Química. Sin embargo, no existen modelos realistas que permitan predecir el comportamiento de un equilibrio de fases de sistemas específicos. Esto constituye un problema para que el estudiante refuerce su conocimiento.

El presente estudio se enfoca en la construcción de un modelo para predecir el comportamiento de equilibrio de fases de un sistema binario de naftaleno y ácido benzoico, a escala laboratorio.

Se realizó un análisis térmico para estimar las condiciones para el equilibrio sólido líquido experimentalmente. En dicho análisis se prepararon 9 composiciones diferentes de la mezcla binaria. Primero se calentaron hasta la fusión de ambos sólidos y, posteriormente, se dejó que estas muestras se enfriaran, mientras se registraba su temperatura interna y externa en función del tiempo. Los datos recolectados se utilizaron para dibujar un diagrama de fases sólido-líquido.

Los datos del equilibrio se predijeron con un modelo ideal y se calcularon las desviaciones, estas se relacionaron con diferentes regresiones en función de

---

<sup>1</sup>SMITH, Joe., VAN NESS, H. C. *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. Pág. 597.

la composición para obtener el modelo que los relacione con mejores características de ajuste.

## 1. ANTECEDENTES

Se han realizado diversos estudios relacionados con el equilibrio de fases de diferentes sistemas alrededor del mundo. Entre ellos cabe mencionar:

El artículo científico publicado por Natalia D. D. Carareto, Adenilson O. dos Santos, Marlus P. Rolemberg, Lisandro P. Cardoso, Mariana C. Costa y Antonio J.A. Meirelles en la revista científica *Thermochimica Acta* en 2014, bajo el título: “En los diagramas de fase sólido-líquido de mezclas binarias de alcoholes grasos saturados pares: Sistemas que exhiben una reacción peritética”. En este estudio se obtuvieron los diagramas de fase sólido-líquido de los sistemas 1-octanol + 1-decanol, 1-decanol + 1-dodecano. 1-dodecanol + 1-hexanol y 1-tetradecanol + 1-octadecanol por Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC) usando una velocidad de calentamiento lineal de 1 K min<sup>-1</sup> y se investigó más a fondo mediante la aplicación de un método DSC stepscan. La difracción de rayos X (XRD) y la microscopía de luz polarizada también fueron utilizadas para complementar la caracterización de diagramas de fase que han mostrado un comportamiento complejo global, presentando, no solamente reacciones peritéticas y eutécticas, sino también reacciones metatéticas e inmiscibilidad parcial en estado sólido.

La tesis doctoral en Ingeniería en Alimentos de Natália Daniele Doringhelo Carareto de la Facultad de Ingeniería en Alimentos de la Universidad de Campinas, publicada en 2014, titulada: *Equilibrio de fases sólido-líquido y punto flash de mezclas grasas*, aborda el equilibrio de fases sólido-líquido de mezclas binarias consistentes de alcoholes grasos, esteres grasos y ácidos grasos y a la evaluación del punto flash de mezclas de esteres de etilo, los mayores

constituyentes del biodiesel, y etanol, también presente en biodiesel en niveles residuos. Los diagramas de fase sólido-líquido de mezclas binarias de alcohol graso + alcohol graso o de alcohol graso + ácido graso fueron determinadas experimentalmente por Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC), usando velocidad de calentamiento lineal, o por un método DSC de stepscan, con el objetivo de investigar la ocurrencia de reacciones eutécticas, peritéticas y metatéticas. La difracción de rayos X y microscopía óptica con técnicas de control de temperatura fueron aplicados para complementar el entendimiento de los diagramas de fase. El efecto de la presión en el equilibrio de fases sólido-líquido en las mezclas binarias también fue investigado. Los modelos termodinámicos de Margules de 2 y 3 sufijos y NRTL fueron usados para describir la línea líquida de los sistemas que presentan punto peritético, y un modelo termodinámico predictivo fue utilizado para modelar la función de la presión en el equilibrio de fases sólido-líquido, que, en ambos casos, dieron un ajuste satisfactorio comparado con los datos experimentales.

G. J. Máximo, M. C. Costa y A. J. A. Meirelles pertenecientes al Laboratorio de Extracción, Termodinámica Aplicada y Equilibrio, del Departamento de Ingeniería en Alimentos de la Escuela de Ingeniería en Alimentos de la Universidad de Campinas, en Limeira-SO, Brasil, en 2012, presentaron el artículo: "Equilibrio de fases sólido-líquido de trioleína con alcoholes grasos". En este estudio los diagramas de fase sólido-líquido de dos sistemas binarios compuestos de trioleína + 1-hexadecanol y trioleína + 1-octadecanol fueron evaluados utilizando Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC) y microscopía óptica. Los datos experimentados fueron comparados con los datos predichos al resolver ecuaciones de equilibrio de fase usando un algoritmo implementado en MATLAB. Los coeficientes de actividad de fase líquida fueron calculados utilizando la ecuación de Margules (de dos y tres sufijos) y el modelo UNIFAC (original y el Dortmund modificado). Los enfoques utilizados para calcular el

equilibrio del sistema permitieron una predicción precisa de la línea líquida con una desviación baja de los datos experimentales.

La tesis de postgrado de Harold Norbey Ibarra Taquez, *Equilibrio de fases para sistemas electrolíticos con mezclas de solventes e iones* correspondiente a la Maestría en Ingeniería Química de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, publicada en el 2011, se enfoca en el desarrollo de herramientas para el diseño de un proceso de cristalización reactiva para la producción simultánea de sulfato de potasio y ácido clorhídrico. Se desarrollaron herramientas de cálculo para la predicción para los diferentes equilibrios de fases que se presentan en condiciones que involucran mezclas de iones y/o solventes para este sistema, incluyendo el equilibrio de fases sólido-líquido. Se implementaron los modelos LIQUAC y UNIQUAC extendido, además de dos modelos propuestos: HIQUAC y LIQUAC modificado; estos nuevos modelos presentan menores porcentajes promedio de error en el cálculo.

El artículo científico “Modelado de equilibrio de fases sólido-líquido para triacilglicerol que exhiben fases sólidas múltiples” publicado por M. Teles Dos Santos, G. A. C. Le Roux y V. Gerbaud, pertenecientes al Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad de Toulouse en Toulouse, Francia y al Laboratorio de Simulación y Control de Procesos de la Universidad de Sao Paulo en Sao Paulo, Brasil, en 2009, presenta el desarrollo literario disponible del equilibrio de fases sólido-líquido en sistemas de triacilglicerol y destaca cómo se puede combinar con un marco de Mezcla Asistida por computadora y diseño Blend. El diseño de nuevas mezclas con propiedades mejoradas permite un mejor uso de recursos renovables como aceites vegetales. Implementaron pruebas de estabilidad ya que son un paso esencial para una poderosa resolución de equilibrio de fases sólido-líquido y algunos resultados fueron

presentados para una mezcla de cuatro componentes de triacilglicerol en diferentes composiciones y temperaturas.

En el artículo científico “Los diagramas de fase sólido-líquido de mezclas binarias de ácidos grasos saturados pares que difieren por seis átomos de carbono” publicado por Mariana C. Costa, Marlus P. Rolemberg, Antonio J.A. Meirelles, Joao A.P. Coutinho, M.A. Krahenbuhl en la revista científica *Thermochimica Acta* en 2009, presenta un estudio orientado a utilizar los diagramas de fase sólido-líquido para tres mezclas binarias de ácidos grasos saturados, especialmente las transiciones de fase debajo de la línea líquida. Estas mezclas están compuestas por ácido caprílico + ácido mirístico, ácido cáprico + ácido palmítico, ácido láurico + ácido esteárico, que difieren por seis átomos entre las cadenas de carbón. Los diagramas de fase se obtuvieron por Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC). La microscopía de luz polarizada complementó la caracterización para comprender mejor el diagrama de fases. Estos diagramas presentan reacciones peritéticos, eutécticos y metatéticos debido a las transiciones de fase sólida-sólida. Estos hallazgos han contribuido a la elucidación del comportamiento de fase de estas moléculas bioquímicas importantes con implicaciones en varias producciones industriales.

Mariana C. Costa, Marlus P. Rolemberg, Laslo A. D. Boros, Maria A. Krahenbuhl, Marcelo G. de Oliveira y Antonio J.A. Meirelles publicaron en la revista científica *Journal of Chemical Engineering Data*, en 2007, el artículo “Equilibrio de fases sólido-líquido de mezclas binarias de ácidos grasos”. En este estudio los diagramas de siete mezclas binarias de ácidos grasos fueron obtenidos por Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC). Estas mezclas fueron formadas por ácido cáprico con ácido láurico, ácido mirístico, ácido palmítico, o ácido esteárico y por ácido láurico con ácido mirístico, ácido palmítico o ácido esteárico. La técnica spline fue usada para comparar los resultados de este

trabajo con los resultados disponibles anteriormente en la literatura para algunos de los sistemas investigados. La ocurrencia del punto eutéctico en todos los sistemas y del punto peritético en algunos sistemas fue observada. La ocurrencia del punto peritético puede ser asociada con la diferencia en el número de átomos de carbono en las cadenas de ácidos grasos usados en las mezclas. El enfoque sugerido por Slaughter and Doherty fue utilizado para modelar la fase sólida y la fase líquida fue modelada utilizando los modelos de Margules de 2 y 3 sufijos, UNIFAC Dortmund y NRTL. Los mejores resultados de modelado fueron obtenidos utilizando Margules de 3 sufijos con una desviación media de 0.14 % entre los valores experimentales y calculados.

En la tesis doctoral *Equilibrio de fases sólido-líquido en sistemas multi soluto* de Izumi Kurosawa del Doctorado de Filosofía en Ingeniería Química del Instituto Tecnológico de Georgia, publicada en 2004, aborda el equilibrio de fases sólido-líquido de sistemas de aminoácidos isomorfos como un modelo para sistemas que forman soluciones sólidas. Las composiciones sólidas y líquidas de L-valina + L-leucina, L-valina + L-isoleucina y L-isoleucina+ L-valina en agua fueron medidas en el rango de composición sólida y se mostró que estos sistemas forman soluciones sólidas. Los coeficientes de actividad de la fase sólida fueron estimados usando datos de equilibrio binario y ternario y el modelo UNIFAC-Kuramochi para no idealidades de fase líquida. Una correlación empírica fue propuesta para la pureza de cristal como una función de la composición líquida; los parámetros de esta correlación pueden ser exhibidos como una simple relación de la razón de solubilidad binaria. Estos resultados facilitan la predicción de la pureza de cristal en una composición líquida arbitraria en otros sistemas que forman soluciones sólidas ya que solo se necesitan los datos de solubilidad binaria. Esta relación simple puede ser ventajosa cuando el equilibrio de fases sólido-líquido de solutos térmicamente inestables o componentes con propiedades físicas desconocidas son cristalizados.

En el artículo científico publicado por Joao A. P. Coutinho y Erling H. Stenby, perteneciente al Centro de Investigación de Ingeniería del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Técnica de Dinamarca, en la ciudad de Lyngby, Dinamarca, realizado en 1996, bajo el título: “Modelos predictivos de composición local para el equilibrio de fases sólido-líquido en sistemas de n-alcanos: Ecuación de Wilson para sistemas multicomponente”. Se aplicó el modelo predictivo de composición local a sistemas multicomponente de hidrocarburos con n-alcanos de cadena larga como solutos. Los resultados muestran que el modelo puede ser exitosamente extendido a sistemas de orden alto y predecir precisamente la temperatura de aparición de sólido, también conocida como punto de enturbiamiento, en soluciones de composición conocida usando solamente información binaria. El modelo puede describir la capacidad de alcanos pesados para actuar como depresores del punto de enturbiamiento y la explica en términos de no idealidad de las soluciones sólidas formadas. Hay buenas indicaciones de que no se introduce un error significativo al considerar múltiples fases ortorrómbicas como una sola fase. Se muestra que para concentraciones bajas en fracciones pesadas el parámetro de interacción  $\alpha_{is}$  puede ser descuidado y, por lo tanto, el modelo se vuelve puramente predictivo.

En el artículo científico publicado por Kenji Ochi, Shigeru Hiraba y Kazuo Kojima pertenecientes al Departamento de Química Industrial de la Universidad de Nihon, en la ciudad de Tokio, Japón, llevado a cabo en 1982, bajo el título: “Predicción del equilibrio de fases sólido-líquido utilizando ASOG”. Estudia la aplicabilidad de los parámetros de ASOG en el equilibrio de fases sólido-líquido para sistemas binarios eutécticos. Treinta y siete tipos de sistemas no-electrolíticos típicos, incluyendo trece grupos, han sido probados utilizando los parámetros del grupo. En la mayoría de los casos las predicciones utilizando ASOG concuerdan con el experimento dentro de 0,10 fracción molar y son mucho

mejores que las predicciones utilizando la aproximación de una solución ideal. La desviación general para los 37 sistemas es de 0,054 fracción molar. De estos resultados se concluye que los parámetros de grupo son aplicables a la predicción del equilibrio de fases sólido-líquido para sistemas eutécticos simples.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Equilibrio

Cuando las propiedades macroscópicas de un sistema no aislado permanecen constantes en el tiempo y no cambian si el sistema se retira de sus alrededores, se considera que este sistema está en equilibrio.

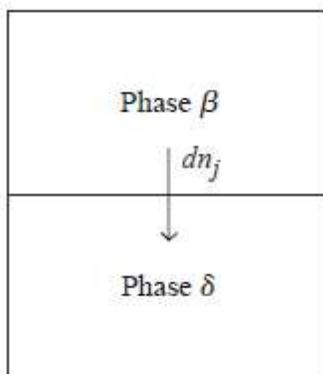
El concepto de equilibrio se divide en tres tipos: equilibrio mecánico, equilibrio material y equilibrio térmico. En el equilibrio mecánico el sistema no experimenta ninguna aceleración y no hay mucha turbulencia en su interior debido a que en él o actúa ninguna fuerza no balanceada dentro del sistema. En el equilibrio material las concentraciones de las especies químicas en las diversas partes del sistema son constantes en el tiempo ya que no ocurre ninguna reacción química neta en el sistema, ni hay ninguna transferencia neta de materia en ninguna parte del sistema a otra, o entre el sistema y sus alrededores. En el equilibrio térmico entre el sistema y sus alrededores, cuando estos se separen mediante una pared térmicamente conductora, no debe haber cambio en las propiedades del sistema o sus alrededores. En el equilibrio termodinámico deben estar presentes los tres tipos de equilibrio.

En el equilibrio material, el número de moles de cada sustancia presente permanece constante en el tiempo, en cada fase del sistema cerrado. El equilibrio material puede subdividirse en equilibrio de fase, que es el equilibrio respecto del transporte de materia entre fases del sistema sin la conversión de una especie en otra y equilibrio de reacción, que se da respecto de la conversión de un conjunto de especies químicas en otro conjunto.

### 2.1.1. Equilibrio de fases

Un equilibrio de fase implica las mismas especies químicas presentes en diferentes estados de agregación.

Figura 3. Moles de la sustancia  $j$  que fluyen de la fase  $\beta$  a la fase  $\delta$



Fuente: LEVINE, Ira. *Principios de fisicoquímica*. P. 119.

La condición para que exista el equilibrio material en un sistema cerrado solo con trabajo P-V se da en la ecuación  $\sum_{\beta} \sum_i \mu_i^{\beta} dn_i^{\beta} = 0$ , la cual se cumple para cualquier cambio infinitesimal posible en el número de moles  $n_i^{\beta}$ . A partir de lo descrito anteriormente se obtiene que  $\mu_j^{\delta} = \mu_j^{\beta}$ . En un sistema cerrado solo con trabajo P-V en equilibrio térmico y mecánico, la condición de equilibrio de fase sea que el potencial químico de una sustancia dada sea el mismo en cada fase del sistema. Esto se da en la minimización de la energía libre de Gibbs, de la siguiente forma:

$$dG = -SdT + VdP + \sum_i \mu_i^{\beta} dn_i^{\beta} + \sum_i \mu_i^{\delta} dn_i^{\delta} \quad (2)$$

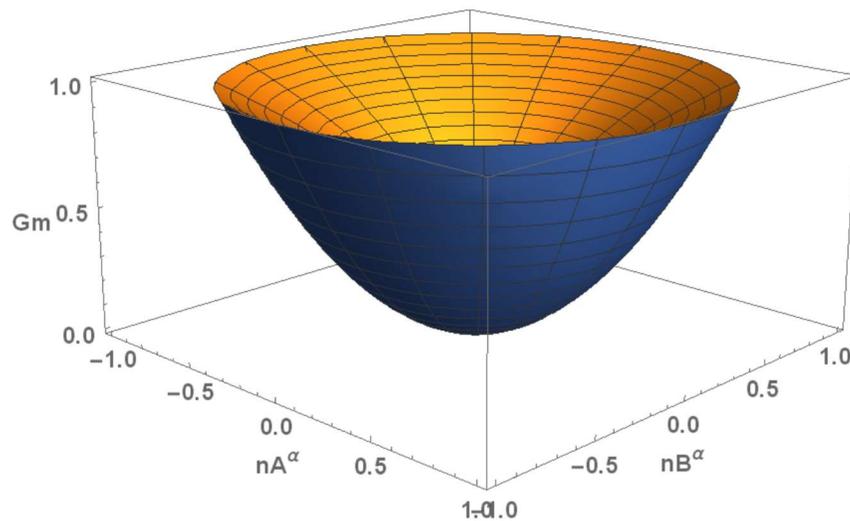
$$dG = -SdT + VdP + \sum_i (\mu_i^\beta - \mu_i^\delta) dn_i^\beta \quad (3)$$

$$\sum_i (\mu_i^\beta - \mu_i^\delta) = \sum_i \left( \frac{\partial G}{\partial n_i^\beta} \right)_{T,P,\{n_j\}; j \neq i} \quad (4)$$

$$\left\{ \mu_i^\beta - \mu_i^\delta = \left( \frac{\partial G}{\partial n_i^\beta} \right)_{T,P,\{n_j\}; j \neq i} = 0 \right\} \text{Minimización} \quad (5)$$

$$\{\mu_i^\beta = \mu_i^\delta\} \quad (6)$$

Figura 4. **Minimización de energía de Gibbs**



Fuente: elaboración propia, Wolfram Mathematica 10.4, con datos obtenidos en la herramienta RevolutionPlot3D.

“La sustancia  $j$  fluye de manera espontánea de una fase con potencial químico mayor  $\mu_j$  a una fase con potencial químico inferior  $\mu_j$ ”<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> LEVINE, Ira. *Principios de fisicoquímica*. Pág. 120.

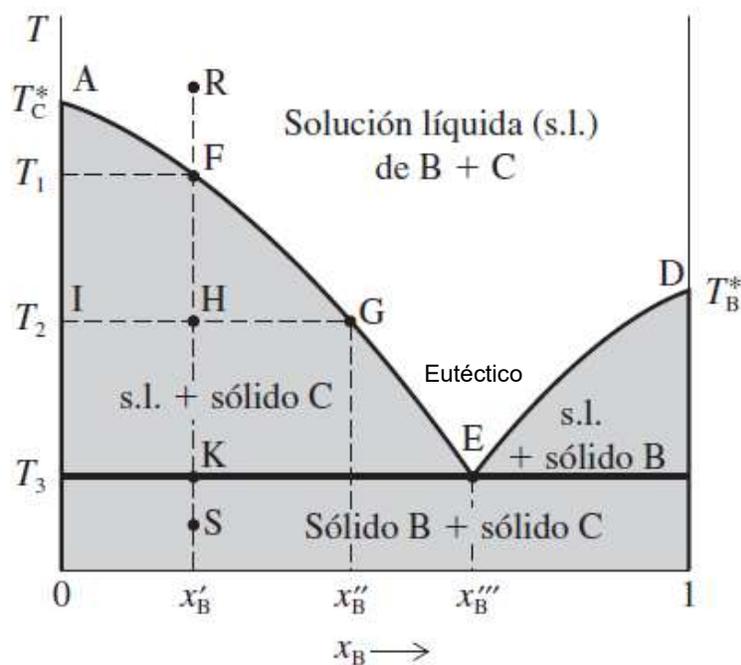
## 2.2. Equilibrio sólido-líquido

Un equilibrio sólido-líquido implica las mismas especies químicas presentes en estado sólido y estado líquido.

### 2.2.1. Miscibilidad en fase líquida e inmiscibilidad en fase sólida

Sean C y B dos sustancias miscibles en todas las proporciones en la fase líquida y completamente inmiscibles en la fase sólida.

Figura 5. Diagrama de fases sólido-líquido cuando existe miscibilidad total en fase líquida e inmiscibilidad en fase sólida



Fuente: LEVINE, Ira. *Principios de fisicoquímica*. P. 347.

Donde  $T_B^*$  y  $T_C^*$  son los puntos (temperaturas) de congelación de B puro y C puro. E es el punto eutéctico, que es el punto de temperatura más baja a la cual puede fundir una mezcla de B y C con una composición fija. El examen microscópico muestra que el sólido eutéctico es una mezcla íntima de cristales de B y cristales de C, por lo tanto, se sabe que una mezcla eutéctica no es un compuesto. El gráfico representa un diagrama de fases de sistemas eutécticos simples.

La curva DE muestra el descenso del punto de congelación de C a causa del soluto B. La función aproximada de esta curva se relaciona con la siguiente expresión:

$$R \ln x_B = \Delta_{fus} H_{m,B} \left( \frac{1}{T_B^*} - \frac{1}{T} \right) \quad (7)$$

A su vez, la curva AE muestra el descenso del punto de congelación de B a causa del soluto C. Para la curva AE se emplea la misma ecuación que para la curva DE solo que con los siguientes cambios:

$$R \ln x_C = \Delta_{fus} H_{m,C} \left( \frac{1}{T_C^*} - \frac{1}{T} \right) \quad (8)$$

### 2.2.2. Termodinámica del equilibrio sólido-líquido

A continuación, se explica el comportamiento de algunas variables termodinámicas en el equilibrio sólido-líquido, dichas variables son magnitudes que se emplean para describir el estado de un sistema termodinámico.

### 2.2.2.1. Fundamentos

La energía libre (G) a una temperatura (T), es una función de la entalpía (H) y entropía (S):

$$G = H - T * S \quad (9)$$

El cambio de la energía libre es descrito por la ecuación fundamental de la termodinámica química.

$$dG = VdP - SdT + \sum_j \mu_j dn_j \quad (10)$$

En un sistema cerrado donde no se agrega trabajo y la presión permanece constante el cambio en la energía libre con temperatura es:

$$\left(\frac{\partial G}{\partial T}\right)_{P,n} = -S \quad (11)$$

Y de la ecuación (9) deriva la relación Gibbs-Helmholtz:

$$\left(\frac{\partial}{\partial T}\left(\frac{G}{T}\right)\right)_{P,n} = -\frac{H}{T^2} \quad (12)$$

El cambio en la entalpía y entropía correspondiente a presión constante están dadas por la capacidad calorífica isobárica ( $C_p$ ):

$$\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_p = C_p \quad (13)$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial T}\right)_p = \frac{C_p}{T} \quad (14)$$

### 2.2.2.2. Fusión de la fase sólida

Usando líquido superenfriado como referencia, el potencial químico del sólido  $\mu^S$ , es dado como:

$$\mu^S = \mu^L + RT \ln a \quad (15)$$

Donde  $\mu^L$  es el potencial químico del líquido super enfriado, y  $a$  es la actividad del sólido. La energía libre de fusión a una temperatura T,  $\Delta G^f$  es:

$$\Delta G^f = \mu^L - \mu^S \quad (16)$$

Lo superíndices S y L representan las fases sólida y líquida (superenfriado), respectivamente, y el superíndice f denota un proceso de fusión. Así, utilizando las ecuaciones (15) y (16), la actividad de la fase sólida puede ser expresada como:

$$\ln a = \frac{\mu^L - \mu^S}{RT} = -\frac{\Delta G^f}{RT} \quad (17)$$

La energía libre de fusión a temperatura T,  $\Delta G^f$ , utilizando la ecuación (9) está dada por:

$$\Delta G^f = \Delta H^f - T * \Delta S^f \quad (18)$$

Por lo tanto:

$$\ln a = \frac{\Delta S^f}{R} - \frac{\Delta H^f}{RT} \quad (19)$$

Donde  $\Delta S^f$  y  $\Delta H^f$  representan la entropía y entalpía de fusión, respectivamente. La entalpía de fusión es igual a:

$$\Delta H^f = H^L - H^S \quad (20)$$

Que por integración de la ecuación (13) desde la temperatura de fusión,  $T_m$ , hasta la temperatura  $T$  a presión constante, se obtiene:

$$\Delta H^f = \Delta H^f + \int_{T_m}^T C_P^L dT - \int_{T_m}^T C_P^S dT \quad (21)$$

Donde  $C_P^L$  y  $C_P^S$  denotan la capacidad calorífica del líquido superenfriado y sólido, respectivamente. Introduciendo:

$$\Delta C_P = C_P^L - C_P^S \quad (22)$$

Se obtiene:

$$\Delta H^f = \Delta H^f + \int_{T_m}^T \Delta C_P dT \quad (23)$$

La ecuación correspondiente de la entropía de fusión,  $\Delta S^f(T)$  a una presión constante se obtiene por integración de la ecuación (14):

$$\Delta S^f = \Delta S^f + \int_{T_m}^T \frac{\Delta C_P}{T} dT \quad (24)$$

Por definición, a la temperatura de fusión el potencial químico del sólido,  $\mu^S$ , es igual al potencial químico del líquido,  $\mu^L$ . Por lo tanto, a  $T_m$  la actividad del sólido es la unidad y  $\Delta G^f(T_m)$  es cero, y por la ecuación (19) podemos escribir:

$$\Delta S^f = \frac{\Delta H^f}{T_m} \quad (25)$$

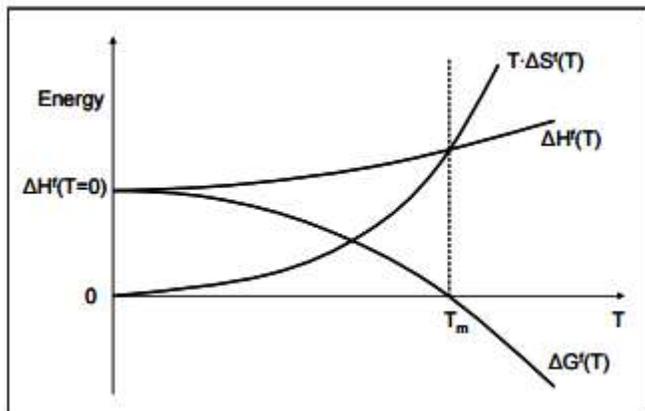
Así, las ecuaciones (18), (23), (24) y (25) dan la energía libre de fusión a presión constante:

$$\Delta G^f = \Delta H^f \left[ 1 - \frac{T}{T_m} \right] - \frac{1}{RT} \int_{T_m}^T \Delta C_p dT - \int_{T_m}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT \quad (26)$$

Y la actividad de la fase sólida a presión constante es obtenida de la ecuación (17) y (26):

$$\ln a = \frac{\Delta H^f(T_m)}{R} \left[ \frac{1}{T_m} - \frac{1}{T} \right] - \frac{1}{RT} \int_{T_m}^T \Delta C_p dT - \frac{1}{R} \int_{T_m}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT \quad (27)$$

Figura 6. **Relación entre parámetros termodinámicos**



Fuente: NORDSTROM, Fredrik. *Solid-Liquid Phase Equilibria and Crystallization of Disubstituted Benzene Derivatives*. P. 9.

La relación entre los parámetros termodinámicos  $\Delta G^f$ ,  $\Delta H^f$ ,  $T^* \Delta S^f$  y temperatura se ilustran en la figura No. 6.

### 2.2.3. Propiedades molares parciales

“La propiedad molar parcial  $Y_m$  correspondiente a la especie  $i$  de la solución se define como:

$$Y_m \equiv \left[ \frac{\partial(Y)}{\partial n_i} \right]_{P,T,n_j} \quad (28)$$

Esta es una función de respuesta, es decir, es una medida de la respuesta de la propiedad total  $Y$  ante la adición, bajo  $T$  y  $P$  constantes, de una cantidad diferencial de la especie  $i$  a una cantidad finita de solución”<sup>3</sup>.

#### 2.2.3.1. Ecuación de Gibbs-Duhem

La ecuación de Gibbs-Duhem describe el cambio del potencial químico de los componentes de un sistema termodinámico. Según Levine (2014) se deriva a partir del cambio infinitesimal de la ecuación  $G = \sum_i n_i \mu_i$  de la siguiente forma:

$$dG = d \sum_i n_i \mu_i = \sum_i d(n_i \mu_i) = \sum_i (n_i d\mu_i + \mu_i dn_i) = \sum_i n_i d\mu_i + \sum_i \mu_i dn_i$$

El uso de  $dG = -SdT + VdP + \sum_i \mu_i dn_i$  da:

$$-SdT + VdP + \sum_i \mu_i dn_i = \sum_i n_i d\mu_i + \sum_i \mu_i dn_i$$

---

<sup>3</sup>SMITH, Joe., VAN NESS, H. C. *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. Pág. 381.

$$\sum_i n_i d\mu_i + S dT - V dP = 0 \quad (29)$$

Que en un proceso isotérmico e isobárico ( $dP=0=dT$ ) se convierte en:

$$\sum_i n_i d\mu_i = \sum_i n_i d\bar{G}_i = 0 \quad (30)$$

### 2.3. Análisis térmico

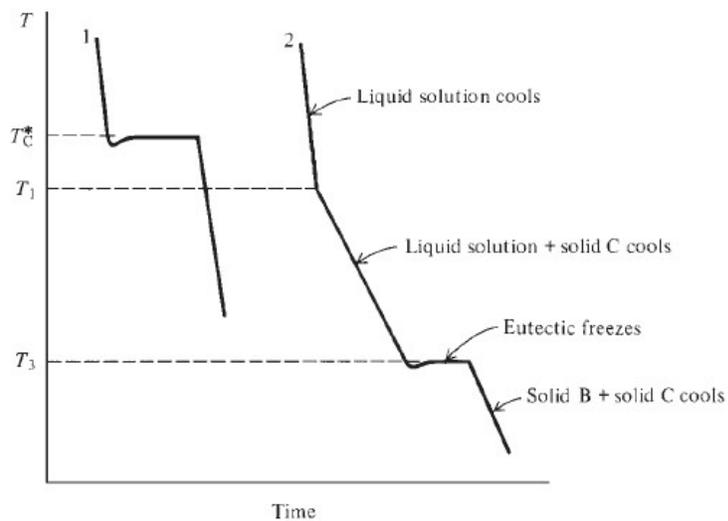
Es una manera de determinar un diagrama de fase sólido-líquido de manera experimental. En este análisis se deja enfriar una solución líquida (fundido) de los dos componentes y se mide la temperatura del sistema como función del tiempo; este proceso se realiza a diferentes composiciones de líquido, de manera que se forma un conjunto de curvas de enfriamiento. El tiempo es proporcional a la cantidad de calor  $Q$  perdido por el sistema, aproximadamente, de manera que la pendiente  $dT/dt$  de la curva de enfriamiento es proporcional al recíproco de la capacidad calorífica del sistema  $C_p = dq_p/dT$ .

La figura No. 7 muestra la curva de enfriamiento para el sistema eutéctico simple de la figura No.5.

En la curva 1, puede observarse que, cuando se enfría C puro, la temperatura permanece constante en el punto de congelación  $T_c^*$  mientras se congela la muestra completa. La capacidad calorífica del sistema  $C(s) + C(l)$  a  $T_c^*$  es infinita. El ligero descenso por debajo del punto de congelación se debe al superenfriamiento. Después de que se congela la muestra, la temperatura desciende cuando el sólido C se enfría. La curva 2 corresponde a una mezcla líquida. Aquí, cuando el sólido C empieza a congelarse en  $T_1$ , ocurre un cambio

de pendiente que se conoce con el nombre de ruptura. Esta ruptura ocurre a causa de que la capacidad calorífica del sistema C(s) + soln. líquida es mayor que la del sistema consistente solo en la solución líquida. Cuando el sistema alcanza la temperatura eutéctica  $T_3$ , todo el líquido restante se congela a una temperatura constante y la curva de enfriamiento se vuelve horizontal, y exhibe una parada eutéctica. Al graficar las temperaturas observadas de la curva de enfriamiento en función de  $x_B$ , se generan las curvas de descenso del punto de congelación AE y DE de la figura 5.

Figura 7. **Curvas de enfriamiento**



Fuente: LEVINE, Ira. *Principios de Fisicoquímica*. P. 353.

### 2.3.1. Ley del enfriamiento de Newton

La ley del enfriamiento de Newton expresa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de la:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (31)$$

Donde  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor por convección, en  $W/m^2 \cdot ^\circ C$  o  $Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$ ,  $A_s$  es el área superficial a través de la cual tiene lugar la transferencia de calor por convección,  $T_s$  es la temperatura de la superficie y  $T_\infty$  es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie. La temperatura del fluido en la superficie será igual a la del sólido. Es importante recalcar que el coeficiente de transferencia de calor por convección  $h$  no es una propiedad del fluido, sino un parámetro que depende de todas las variables que influyen en la convección, como las propiedades del fluido, la naturaleza del movimiento de este, su velocidad y la configuración geométrica de la superficie; este coeficiente se determina de forma experimental.

### 2.3.2. Modelo de Fourier

La razón de la conducción de calor a través de una capa plana es inversamente proporcional al espesor de la capa de transferencia de calor, pero es proporcional al área de esta y a la diferencia de temperatura a través de esta, es decir,

$$\text{Razón de conducción del calor} \propto \frac{(\text{Área})(\text{Diferencia de } T)}{\text{Espesor}}$$

o bien,

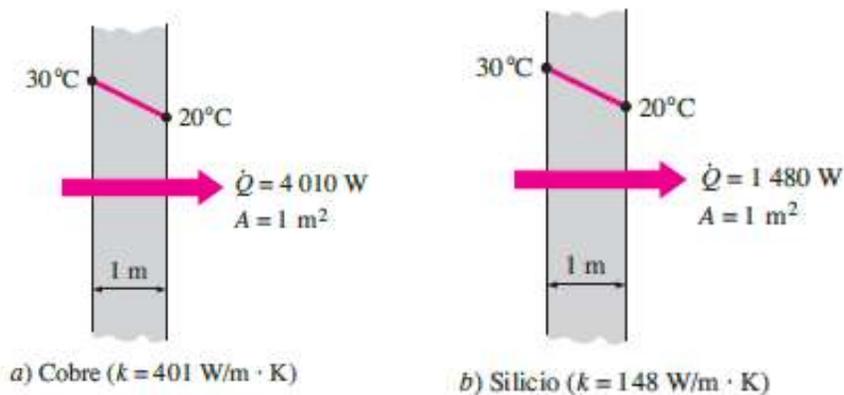
$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (32)$$

Donde la constante de proporcionalidad  $k$  es una medida de la capacidad de un material para conducir calor, y se conoce como conductividad térmica del material (figura 8). En el caso límite de  $\Delta x \rightarrow 0$ , la ecuación que acaba de darse se reduce a la forma diferencial

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{dT}{dx} \quad (33)$$

Esta ecuación recibe el nombre de Ley de Fourier de la conducción del calor. En una curva de temperatura en un diagrama T-x se puede observar que el gradiente de temperatura ( $dT/dx$ ) es la pendiente. Por lo tanto, la razón de conducción del calor en una dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección. El signo negativo de la Ley de Fourier garantiza que la transferencia de calor en la dirección x positiva sea una cantidad positiva, ya que la temperatura decreciente proporciona dirección a la conducción del calor. Este decrecimiento de la temperatura al crecer x también resulta en un gradiente de temperatura negativo.

Figura 8. **Comparación de conductividad térmica**



Fuente: CENGEL, Yunus. *Transferencia de Calor y Masa*. P. 18.

El área A de transferencia de calor es perpendicular a la dirección de esa transferencia.

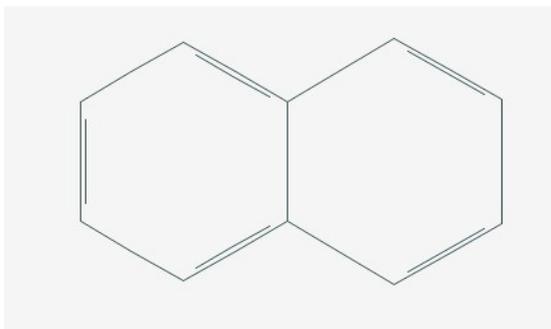
## 2.4. Características de los compuestos

A continuación, se describen las características de los compuestos utilizados en el experimento.

### 2.4.1. Naftaleno

Es un hidrocarburo policíclico sólido blanco y volátil con fórmula  $C_{10}H_8$ . El sólido es más denso que el agua e insoluble en la misma. El naftaleno es un hidrocarburo aromático policíclico compuesto por la fusión de dos anillos bencénicos.

Figura 9. Estructura de naftaleno



Fuente: National Center for Biotechnology Information. Pub Chem Structure. [en línea].  
<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/image/fl.html?cid=931>>. [Consulta: 12 de agosto de 2018].

Tabla I. Propiedades del naftaleno

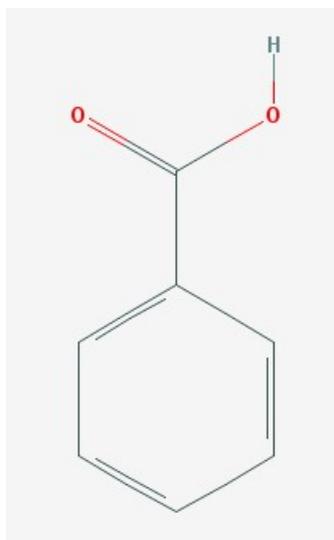
Peso molecular (g/mol)	128.174
Punto de ebullición (°C)	218
Punto de fusión (°C)	80.3
Densidad (g/ml)	1.15

Fuente: National Center for Biotechnology Information. Pub Chem Structure. [en línea].  
<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/naphthalene#section=Top>>. [Consulta: 12 de agosto de 2018].

### 2.4.2. Ácido benzoico

El ácido benzoico es un ácido carboxílico aromático que tiene un grupo carboxilo unido a un anillo fenílico. En condiciones normales se trata de un sólido incoloro con un ligero olor característico. Es poco soluble en agua fría, pero tiene buena solubilidad en agua caliente o disolventes orgánicos.

Figura 10. Estructura de ácido benzoico



Fuente: National Center for Biotechnology Information. Pub Chem Structure. [en línea].  
<<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/image/fl.html?cid=243>>. [Consulta: 12 de agosto de 2018].

Tabla II. Propiedades del Ácido benzoico

Peso molecular (g/mol)	122.123
Punto de ebullición (°C)	249
Punto de fusión (°C)	122
Densidad (g/ml)	1.3

Fuente: National Center for Biotechnology Information. Pub Chem Structure. [en línea].  
<[https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/benzoic\\_acid#section=Solubility](https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/benzoic_acid#section=Solubility)>. [Consulta: 12 de agosto de 2018].

### **3. DISEÑO METODOLÓGICO**

#### **3.1. Variables**

Propiedad, característica o atributo que es susceptible a asumir diferentes valores, es decir, puede variar. Entre ellas se encuentran las variables independientes, consideradas como las causas y las variables dependientes; consideradas como el factor que es observado y medido para determinar el efecto de la variable independiente.

##### **3.1.1. Variables independientes**

Las variables independientes durante el procedimiento son aquellas que se modifican durante el análisis respectivo. Son las siguientes:

- Composición de la mezcla (fracción molar)
- Coeficiente de actividad (factor de corrección que representa la desviación logarítmica de la idealidad)
- Tiempo de enfriamiento (s)

##### **3.1.2. Variables dependientes**

Las variables dependientes son las que se verán afectadas durante el análisis.

- Temperatura interna del tubo (°C)
- Temperatura externa del tubo (°C)

Tabla III. **Variables del proceso**

Variable	Unidade	Constan	Variable	Controlable (C) / No Controlable (NC)	Dependiente (D) / Independiente (I)
Composición de la mezcla ( $x_i$ )		x		C	I
Coefficiente de actividad ( $\gamma_i$ )			x	NC	I
Tiempo de enfriamiento	s		x	NC	I
Temperatura interna del tubo	°C		x	NC	D
Temperatura externa del tubo	°C		x	NC	D

Fuente: elaboración propia.

### 3.2. Delimitación del campo de estudio

La investigación se enmarca en el campo de la inducción cuantitativa de carácter correlacional. El campo de estudio se delimitó a un sistema binario de naftaleno y ácido benzoico, estos compuestos se escogieron ya que cumplieran con las siguientes características:

- No reaccionan entre sí.
- La temperatura de fusión y el punto eutéctico teórico están dentro de un rango manejable en el Laboratorio de Físicoquímica.

### **3.3. Recursos humanos disponibles**

Investigadora: Karla Anaitee Santa María Segura  
Asesor: Ing. Qco. William Eduardo Fagiani Cruz

### **3.4. Recursos materiales disponibles**

Los recursos materiales utilizados fueron los siguientes:

#### **3.4.1. Equipos auxiliares**

- Cristalería
  - Tubos de ensayo: Acero inoxidable 308, 15,15 cm de altura, 3,845 cm de diámetro externo y 3,525 cm de diámetro interno.
  - Beacker: 500 mL, Premiere, Boro 3,3.
  
- Equipo auxiliar
  - Estufa: IKA, C-MAG H 5-7.
  
- Instrumentos de medición
  - Termómetro infrarrojo digital: Steren, HER-425, -20°C a 350°C.
  - Termómetro de alcohol: Interlabs, rango [-10~150]°C, ±0.5°C.
  - Cronómetro: Procalc, precisión de centésimas de segundo, PG-611.

- Otros materiales
  - Tapones: de hule, número 8.

### 3.4.2. Reactivos químicos

Se utilizaron los reactivos químicos que se mencionan a continuación:

- Naftaleno: grado industrial, marca Merck.
- Ácido benzoico: grado industrial, marca Merck.

### 3.5. Recolección y ordenamiento de la información

La recolección de la información y datos necesarios para caracterizar el equilibrio de fases sólido-líquido del sistema Naftaleno-Ácido Benzoico se llevó a cabo mediante un procedimiento experimental planteado para la generación de datos experimentales y una recopilación de datos teóricos necesarios que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla IV. **Datos teóricos recopilados**

	Ácido Benzoico	Naftaleno
$\Delta_f H^\circ$ (kJ/mol)	18,06	18,98
T (sat)	122,4	80,2

Fuente: DEAN, John. *Lange's Handbook of Chemistry*. P. 1.74.

### 3.5.1. Procedimiento experimental para la caracterización del equilibrio de fases sólido-líquido

El experimento se realizó con nueve composiciones diferentes, las cuales se describen en la siguiente tabla.

Tabla V. **Composiciones del sistema binario Naftaleno ( $x_B$ )-Ácido Benzoico ( $x_A$ )**

Mezcla	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_A$	0	0,125	0,25	0,375	0,5	0,625	0,75	0,875	1
$x_B$	1	0,875	0,75	0,625	0,5	0,375	0,25	0,125	0

Fuente: elaboración propia.

Se realizaron cinco repeticiones por cada composición, en total 45 muestras. Dichas muestras se aleatorizaron para reducir el efecto de las variables aleatorias no controladas. La aleatorización de las muestras se presenta en la tabla VI.

Se pesaron 20 g de cada muestra los cuales se colocaron en el tubo de ensayo de acero inoxidable. A dicho tubo se le colocó un tapón de hule con un agujero que permitía introducir un termómetro de alcohol. Este sistema se colocó sobre una estufa y se calentó hasta llegar a 150°C. Después de alcanzar esta temperatura, se retiró la muestra de la estufa y se anotó la temperatura interna, la cual fue tomada con un termómetro de alcohol, y externa, tomada con el termómetro infrarrojo digital, cada 10 segundos hasta llegar a 68 °C. El sistema utilizado se presenta en la siguiente imagen.

Tabla VI. **Aleatorización de las muestras**

Composición/ Repetición	1	2	3	4	5
1	34	41	42	31	40
2	5	6	11	12	7
3	26	27	17	24	25
4	44	38	45	39	35
5	9	14	10	3	1
6	23	22	21	29	18
7	2	13	15	4	8
8	36	37	32	33	43
9	16	30	28	20	19

Fuente: elaboración propia.

Figura 11. **Unidad experimental**



Fuente: Laboratorio de Físicoquímica, Facultad de Ingeniería.

### **3.6. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información**

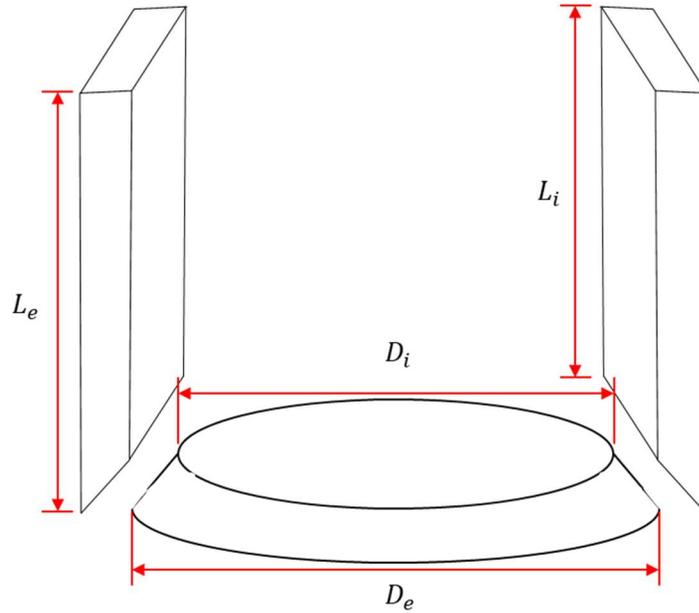
La tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información se realizó en dos etapas, las cuales se describirán a continuación.

#### **3.6.1. Caracterización experimental del equilibrio de fases de un sistema binario naftaleno-ácido benzoico**

La caracterización del equilibrio de fases inició con la tabulación de la temperatura interna, externa y tiempos, datos que fueron recopilados en la experimentación. Con dichos datos se estimó la velocidad de transferencia de calor a través del modelo de Fourier (Ecuación 33). Para utilizar correctamente dicho modelo, se determinó una ecuación que describiera el área de transferencia de calor del tubo de ensayo utilizado en función del espesor de dicho tubo, dicha ecuación se determinó a partir de la siguiente figura, que describe cómo se analiza geoméricamente.

$$A = \pi(r_i + x)^2 + 2\pi x(L_i + x) \quad (34)$$

Figura 12. **Fraccionamiento de tubo de ensayo**



Fuente: elaboración propia.

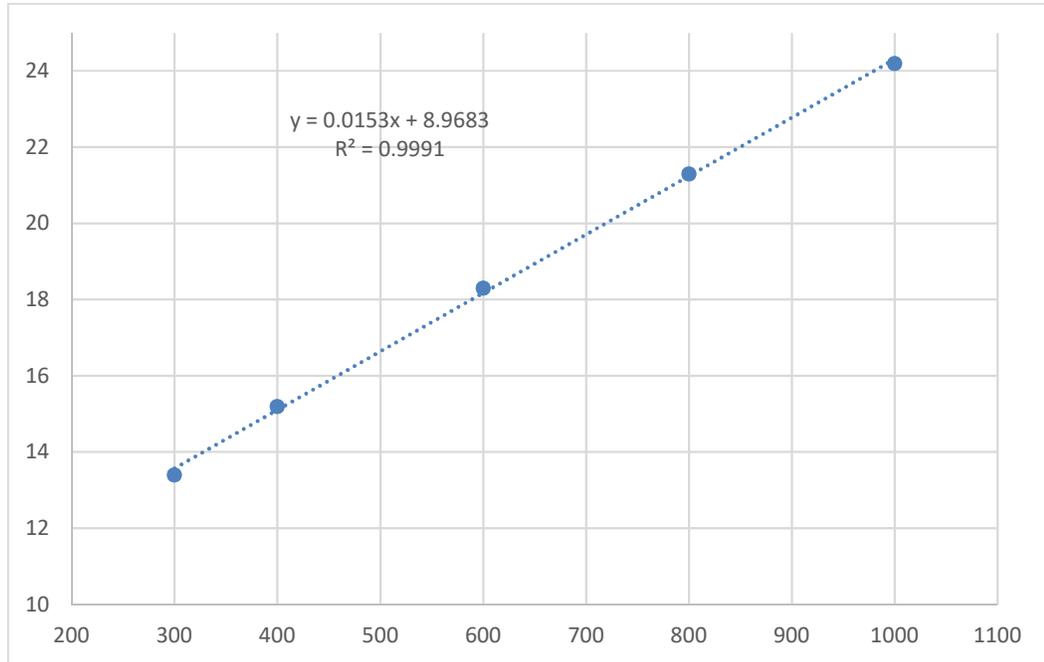
Además, se determinó una ecuación que describe la conductividad en función de la temperatura, utilizando los datos que se muestran a continuación.

Tabla VII. **Conductividad de acero inoxidable AISI 316**

T (K)	k (W/m*K)
300	13,4
400	15,2
600	18,3
800	21,3
1000	24,2

Fuente: CENGEL, Yunus. *Transferencia de calor y masa*. P. 868.

Figura 13. Gráfica de conductividad en función de temperatura



Fuente: elaboración propia.

$$\frac{k}{W/m \cdot K} = 0,0153 \cdot x + 8,9683 \quad (35)$$

Sustituyendo las ecuaciones del área (34) y de la conductividad térmica (35) descritas anteriormente en el modelo de Fourier se obtiene:

$$\dot{Q} \int_0^x \frac{dx}{A} = - \int_{T_{int}}^{T_{ext}} k dT \quad (36)$$

$$\dot{Q} \int_0^x \frac{dx}{\pi(r_i + x)^2 + 2\pi x(L_i + x)} = - \int_{T_{int}}^{T_{ext}} 0,0153x + 8,9683 dT \quad (37)$$

Se estimó la velocidad de transferencia de calor inferior y superior, la inferior utilizando el menor radio interior, longitud y espesor del tubo y la superior utilizando el mayor radio interior, longitud y espesor del tubo. Mediante la aplicación de ambas velocidades, se calculó la velocidad de transferencia de

calor promedio. Con los promedios se realizó una regresión en función del tiempo, la cual permitió obtener un modelo que permitió calcular el calor neto transmitido, este se calculó de la siguiente forma.

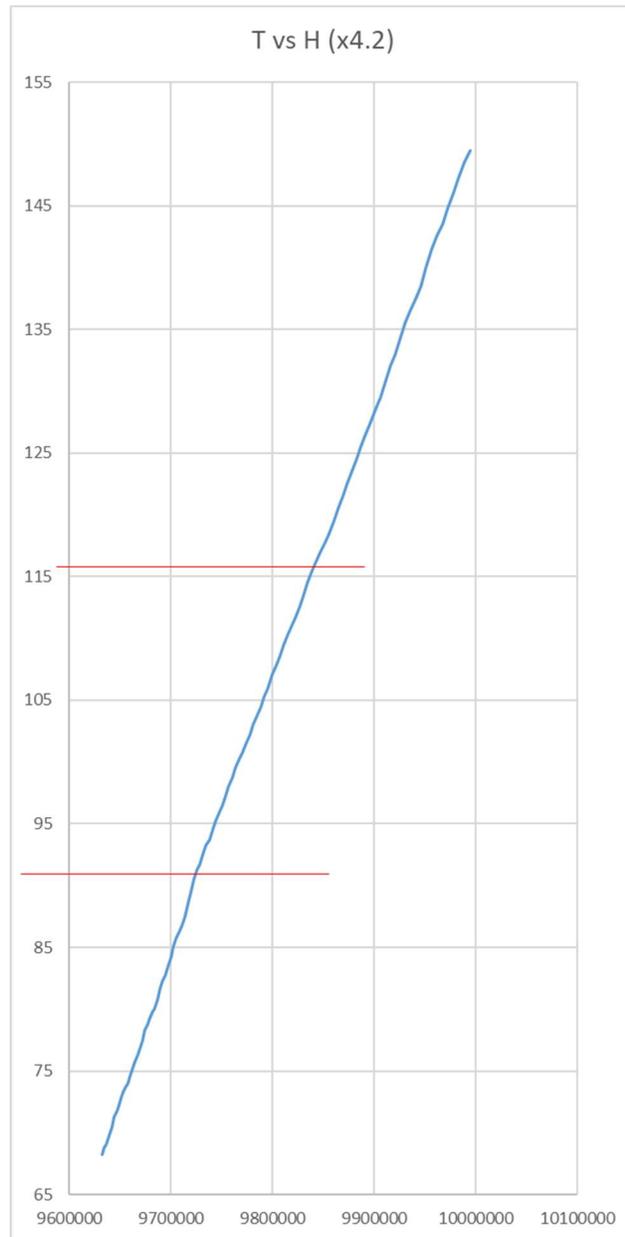
$$Q = f(t_{n-1}) - f(t_n) \quad (38)$$

Con el calor obtenido, se calculó la entalpía, cuya referencia es una entalpía de 10 000 000 J a una temperatura de 150°C.

$$H = H_{ref}^{150^{\circ}C} - |Q| \quad (39)$$

Al obtener las entalpías se realizaron curvas de enfriamiento, graficando la temperatura en función de la entalpía. Estas curvas de enfriamiento se analizaron para encontrar los puntos de fusión para cada composición y repetición realizada, con ellos se realizó un diagrama de temperatura en función de la composición para caracterizar el equilibrio de fases sólido-líquido del sistema binario naftaleno-ácido benzoico.

Figura 14. **Curva de enfriamiento de la segunda repetición de la composición 4**



Fuente: elaboración propia.

### 3.6.2. Obtención de un modelo que permitiera estimar las desviaciones del comportamiento ideal

El modelo para estimar las desviaciones del comportamiento ideal se obtuvo del cálculo de los coeficientes de actividad de cada una de las repeticiones. Esto se hizo a partir de la siguiente deducción, considerando un modelo con inmiscibilidad total en una fase, que supone que las sustancias en dicha fase se comportan como sustancias puras, ya que la interacción es insignificante.

$$\mu_i^{(l)} = G_{m,i}^{(s)} \quad (40)$$

Debido a que se consideran fases incompresibles, es irrelevante tomar en cuenta el efecto de la presión, por lo que el equilibrio se expresaría como:

$$G_{m,i}^{(s)} = G_{m,i}^{(l)} + RT \ln \gamma_i^{(l)} x_i^{(l)} \quad (41)$$

Dicha expresión se deriva respecto a la temperatura para generar una relación de valores límite:

$$\frac{d \ln \gamma_i^{(l)} x_i^{(l)}}{dT} = -\frac{1}{RT} \cdot \frac{d\Delta G_{m,i}^{(s \rightarrow l)}}{dT} + \frac{\Delta G_{m,i}^{(s \rightarrow l)}}{RT^2} \quad (42)$$

Tomando en cuenta que:

$$dG = -SdT + VdP \quad (43)$$

$$H = G + TS \quad (44)$$

Obtenemos la siguiente ecuación diferencial simple.

$$d \ln \gamma_i^{(l)} x_i^{(l)} = - \frac{\Delta H_{m,i}^{(s \rightarrow l)}}{RT^2} dT \quad (45)$$

Al integrar desde una temperatura T hasta la temperatura de saturación del componente i y despejar  $\ln \gamma_i^{(l)}$  se obtiene:

$$\ln \gamma_i^{(l)} = - \frac{\Delta H_{m,i}^{(s \rightarrow l)}}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_i^{sat}} \right) - \ln x_i^{(l)} \quad (46)$$

La ecuación (46) permitió calcular los coeficientes de actividad de naftaleno y ácido benzoico para cada una de las repeticiones. Al obtener los coeficientes de actividad se calculó  $\frac{G_m^{(E)}}{RT}$  a partir de la ecuación:

$$\frac{G_m^{(E)}}{RT} = x_A \ln \gamma_A + x_B \ln \gamma_B \quad (47)$$

Se realizaron regresiones de  $\frac{G_m^{(E)}}{RT x_A x_B}$  en función de  $x_A$  en el software Minitab 18 para obtener distintos modelos, los cuales se evaluaron según criterios estadísticos.

### 3.7. Análisis estadístico

Para estimar estadísticamente el nivel de correlación, independencia, variabilidad y predicción de tendencia de los modelos propuestos se realizaron distintas pruebas estadísticas. Dichas pruebas permitieron escoger el modelo más adecuado.

### 3.7.1. Hipótesis estadísticas

Hipótesis nula (Ho): la temperatura de fusión experimental es significativamente igual a la temperatura de fusión idealizada.

$$\mu T_F = \mu T_F^{id}$$

Hipótesis alterna (H1): la temperatura de fusión experimental no es significativamente igual a la temperatura de fusión idealizada.

$$\mu T_F \neq \mu T_F^{id}$$

Hipótesis nula (Ho): las desviaciones experimentales cumplen con la distribución normal.

$$x = N(\bar{x}, \sigma^2)$$

Hipótesis alterna (H1): las desviaciones experimentales no cumplen con la distribución normal.

$$x \neq N(\bar{x}, \sigma^2)$$

Cada modelo probado implica una transformación de las variables, a la que se le evaluará su grado de correlación.

Hipótesis nula (Ho): la correlación de las desviaciones no es significativa para el modelo propuesto.

$$\rho = 0$$

Hipótesis alterna (H1): la correlación de las desviaciones es significativamente aceptable para el modelo propuesto.

$$\rho \neq 0$$

Tomando en cuenta que el modelo encontrado puede tener la siguiente forma:  $\bar{y} = \beta_1 x + \beta_0$ , cada coeficiente será evaluado para estimar la significancia de su forma.

Hipótesis nula (Ho): el coeficiente angular ( $\beta_1$ ) es igual a cero

$$\beta_1 = 0$$

Hipótesis alterna (H1): el coeficiente angular ( $\beta_1$ ) es diferente de cero

$$\beta_1 \neq 0$$

Esto permite la evaluación de las interacciones de las variables y su efecto sobre el valor predicho.

### **3.7.2. Pruebas estadísticas**

Las pruebas estadísticas realizadas en el experimento son las descritas a continuación.

entre dos variables será más elevada; al contrario, cuando el coeficiente se acerque a 0, la asociación será menor. El coeficiente de correlación se calcula con la siguiente expresión:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)S_x S_y} \quad (48)$$

### 3.7.2.1. Prueba de Anderson-Darling

La prueba de Anderson-Darling es una prueba estadística no paramétrica con la cual se determina si los datos de una muestra provienen de una distribución específica. La fórmula para el estadístico A determina si los datos  $\{Y_1 < \dots < Y_N\}$  (observar que los datos se deben ordenar) vienen de una distribución con función acumulativa F

$$A^2 = -N - S \quad (49)$$

Donde

$$S = \sum_{k=1}^N \frac{2k-1}{N} [\ln F(Y_k) + \ln(1 - F(Y_{N+1-k}))] \quad (50)$$

El estadístico de la prueba se puede entonces comparar contra las distribuciones del estadístico de prueba (dependiendo que F se utiliza) para determinar el P-valor.

La prueba estadística de Anderson-Darling se utiliza para determinar si una muestra de datos se extrae de una distribución de probabilidad. En su forma básica, la prueba asume que no existen parámetros a estimar en la distribución que se está probando, en cuyo caso la prueba y su conjunto de valores críticos siguen una distribución libre. Sin embargo, la prueba se utiliza con mayor frecuencia en contextos donde se está probando una familia de distribuciones, en cuyo caso deben ser estimados los parámetros de esa familia y debe tenerse estos en cuenta a la hora de ajustar la prueba estadística y sus valores críticos.

Cuando se aplica para probar si una distribución normal describe adecuadamente un conjunto de datos, es una de las herramientas estadísticas más potentes para la detección de la mayoría de las desviaciones de la normalidad.

### **3.7.2.2. Análisis de residuos**

El análisis de residuos es la herramienta principal para determinar si el modelo de regresión empleado es apropiado.

El residuo de la observación  $i$  es la diferencia entre el valor observado de la variable dependiente ( $y_i$ ) y el valor estimado de la variable dependiente ( $\hat{y}_i$ ).

$$y_i - \hat{y}_i \quad (51)$$

El residuo  $i$  es el error que resulta de usar la ecuación de regresión estimada para predecir el valor de la variable dependiente.

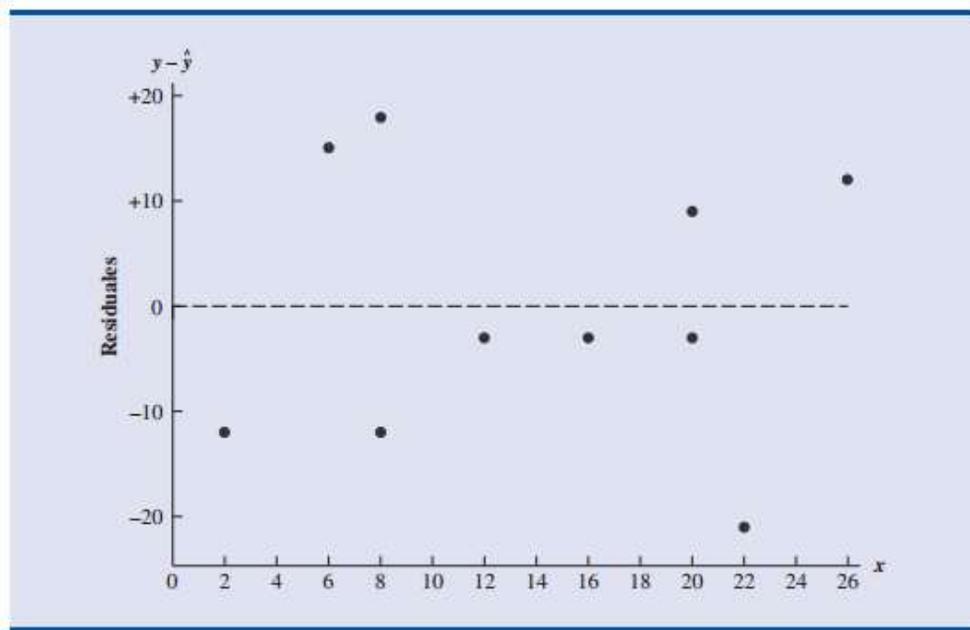
Los residuos proporcionan la mejor información acerca de  $\epsilon$ ; por lo tanto, el análisis de los residuos es muy importante para determinar si las suposiciones hechas acerca de  $\epsilon$  son apropiadas. Gran parte del análisis de residuos se basa en evaluación de gráficas

#### **3.7.2.2.1. Gráfica de residuos contra $x$**

La gráfica de residuos contra la variable independiente  $x$  es una gráfica en la que los valores de la variable independiente se representan en el eje horizontal y los valores de los residuos correspondientes se representan en el eje vertical.

Para cada residuo se grafica un punto. La primera coordenada de cada punto está dada por el valor  $x_i$  y la segunda está dada por el correspondiente valor del residuo  $y_i - \hat{y}_i$ .

Figura 15. **Gráfica de residuos contra la variable independiente x**

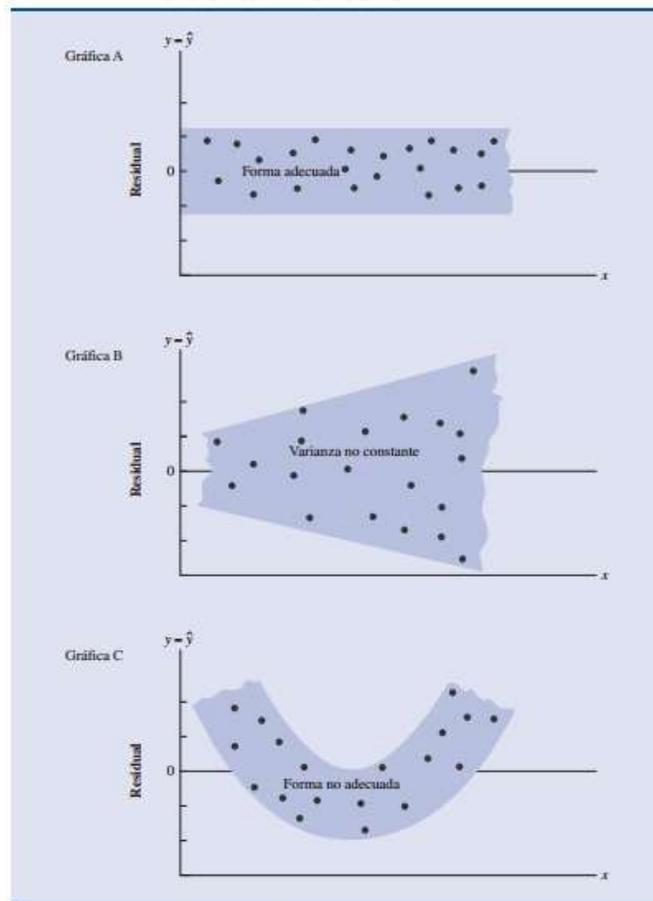


Fuente: ANDERSON, David. *Estadística para administración y economía*. P. 590.

Se consideran algunas de las formas generales que pueden tener las gráficas de residuos. En la figura No. 16 se muestran tres ejemplos. Si la suposición de que la varianza de  $\epsilon$  es la misma para todos los valores de  $x$  y si el modelo de regresión empleado representa adecuadamente la relación entre las variables, el aspecto general de la gráfica de residuos será el de una banda horizontal de puntos, como en la gráfica A. Pero si la varianza  $\epsilon$  no es la misma para todos los valores  $x$  el aspecto de la gráfica puede ser como el de la gráfica B. En este caso se viola la suposición de que  $\epsilon$  tiene una varianza constante. En la gráfica C se muestra otra forma que puede tomar la gráfica de residuos. Se puede concluir que el modelo de regresión empleado no representa

adecuadamente la relación entre las variables, y deberá considerarse un modelo de regresión curvilíneo o múltiple.

Figura 16. **Gráficas de los residuos correspondientes a tres estudios de regresiones**

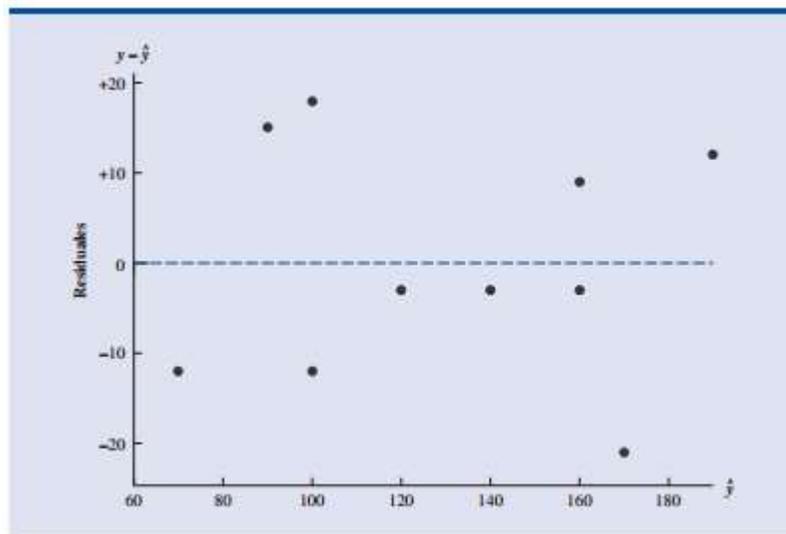


Fuente: ANDERSON, David. *Estadística para administración y economía*. P. 591.

### 3.7.2.2. Gráfica de residuos contra $\hat{y}$

En otra gráfica de residuos los valores pronosticados para la variable dependiente  $\hat{y}$  se representan en el eje horizontal y los valores de los residuos en el eje vertical. A cada residuo corresponde un punto en la gráfica.

Figura 17. Gráfica de residuos contra el valor pronosticado  $\hat{y}$



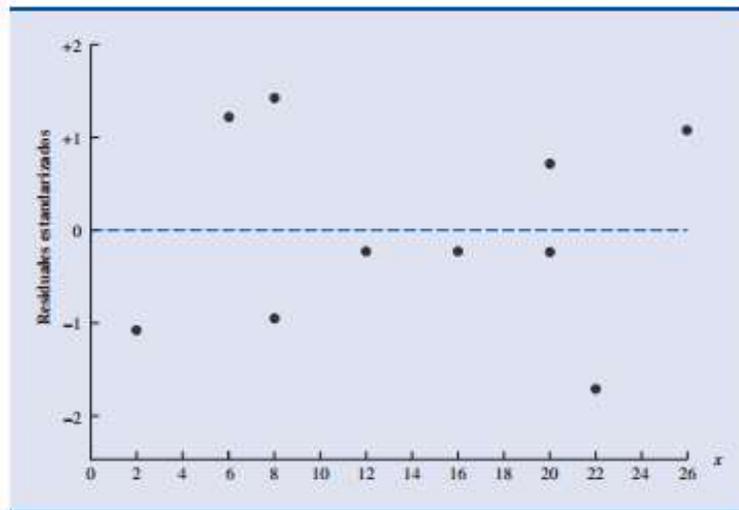
Fuente: ANDERSON, David. *Estadística para administración y economía*. P. 592.

### 3.7.2.3. Residuos estandarizados

Cuando se emplea el método de mínimos cuadrados, la media de los residuos es cero. Por lo tanto, para obtener el residuo estandarizado solo es necesario dividir cada residuo entre su desviación estándar.

Se puede demostrar que la desviación estándar del residuo  $i$  depende del error estándar de estimación  $s$  y del valor correspondiente de la variable independiente  $x_i$ .

Figura 18. **Gráfica de residuos estandarizados contra la variable independiente x**

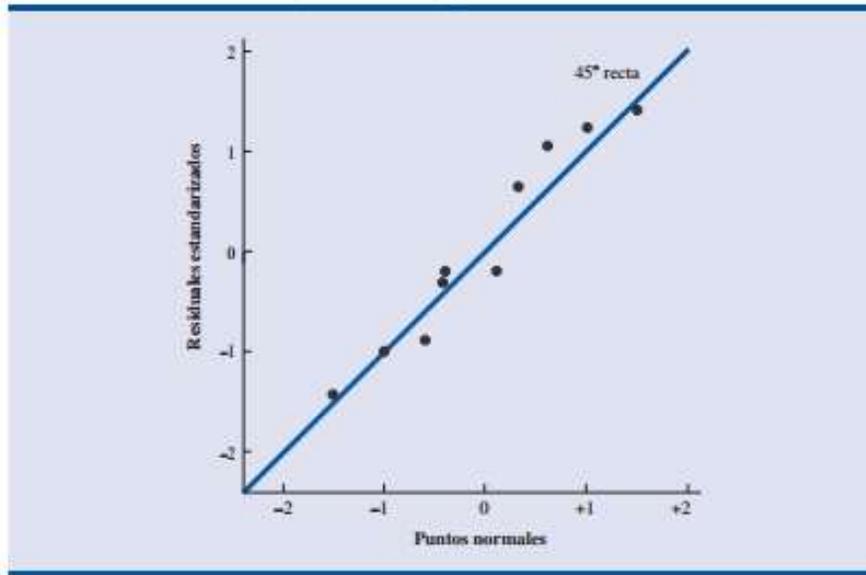


Fuente: ANDERSON, David. *Estadística para administración y economía*. P. 594.

#### 3.7.2.2.4. Gráfica de probabilidad normal.

En la ciencia de la estadística se ha demostrado que en muestras de tamaño 10 tomadas de una distribución de probabilidad normal estándar, el valor esperado del estadístico de primer orden es -1,55. A este valor esperado se le conoce como punto normal. En el caso de una muestra de tamaño  $n=10$ , hay 10 estadísticos de orden y 10 puntos normales. En general, un conjunto de datos que conste de  $n$  observaciones tendrá  $n$  estadísticos de orden y por lo tanto  $n$  puntos normales.

Figura 19. **Gráfica de probabilidad normal**



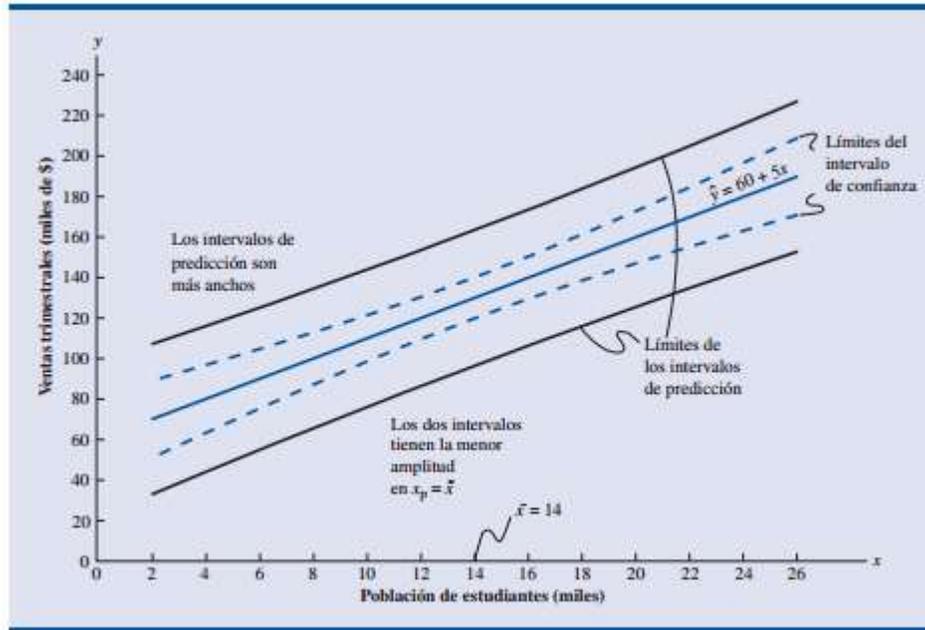
Fuente: ANDERSON, David. Estadística para administración y economía. P. 595.

### 3.7.2.3. Intervalos de predicción

Para obtener un intervalo de predicción, es necesario determinar primero la varianza correspondiente al uso de  $\hat{y}$  como estimación de un valor de  $y$  cuando  $x=x_p$ . Esta varianza está formada por la suma de los dos componentes siguientes:

- La varianza de los valores individuales de  $y$  respecto a la media  $E(y_p)$ , para la cual una estimación está dada por  $s^2$ .
- La varianza correspondiente al uso de  $\hat{y}_p$  para estimar  $E(y_p)$ , para la cual una estimación está dada por  $s^2 y_p$ .

Figura 20. Intervalos de confianza y de predicción



Fuente: ANDERSON, David. Estadística para administración y economía. P. 581.

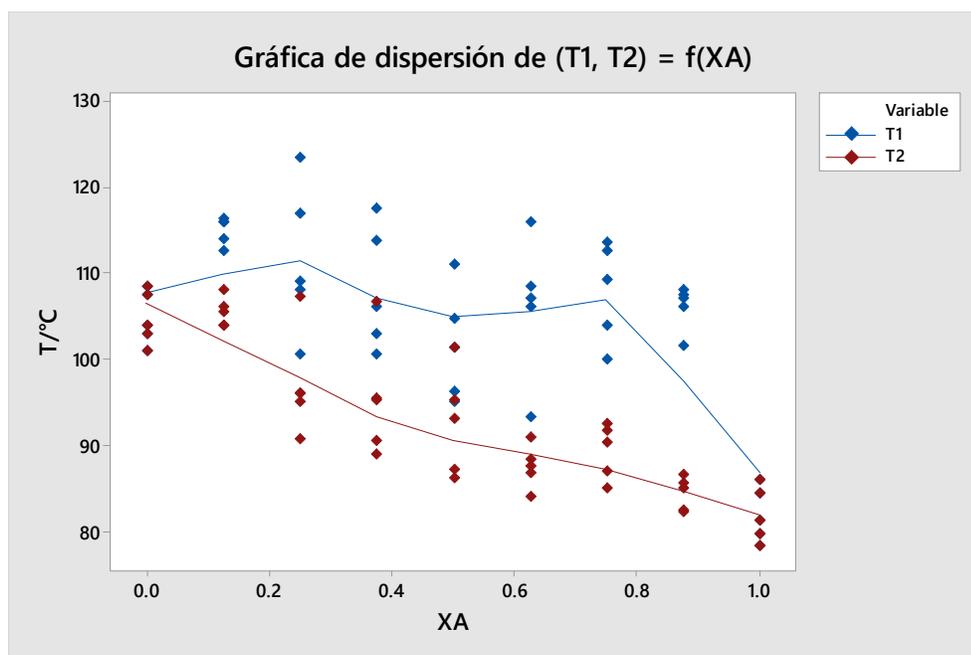


## 4. RESULTADOS

### 4.1. Caracterización experimental del sistema binario naftaleno-ácido benzoico

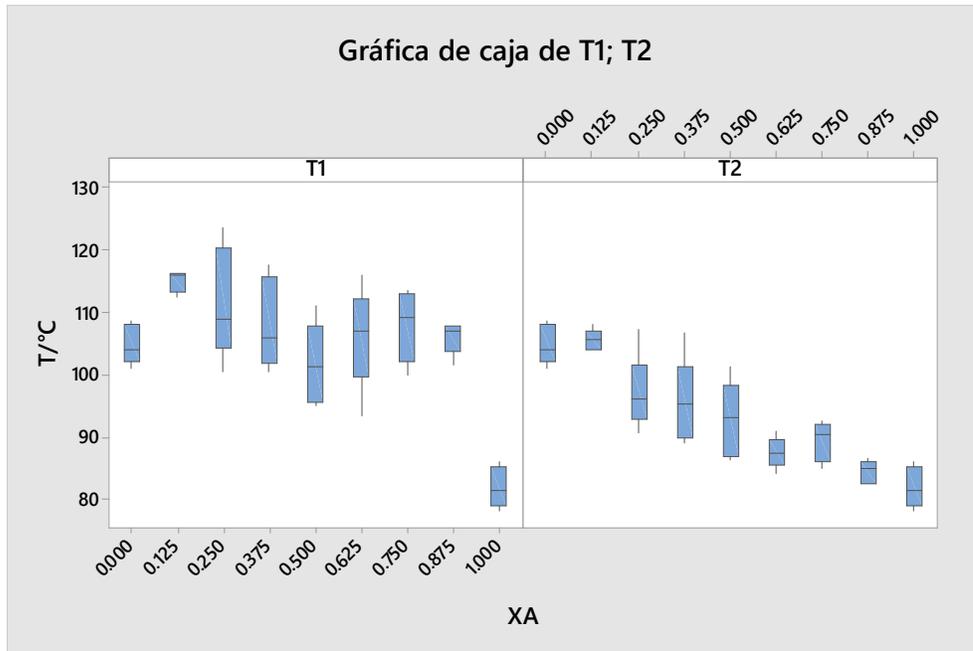
A partir del experimento se realizaron las siguientes gráficas de equilibrio sólido-líquido.

Figura 21. Diagrama de equilibrio sólido-líquido



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

Figura 22. Gráficas de caja de temperaturas de equilibrio sólido líquido



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

#### 4.2. Modelo matemático-estadístico del equilibrio de fases del sistema binario naftaleno-ácido benzoico

A continuación, se expone el modelo matemático-estadístico obtenido, el cual permite estimar las desviaciones del comportamiento ideal.

$$\frac{G_m^{(E)}}{RT} = x_A(1 - x_A)[(1,44 \pm 0,183) + (-2,84 \pm 0,171) \ln x_A] \quad (52)$$

$$P\left(1,257 - 3,011 \ln x_A \leq \frac{G_m^{(E)}}{RTx_Ax_B} \leq 1,623 - 2,669 \ln x_A\right) = 0,95 \quad (53)$$

Aplicando la definición de propiedad molar parcial se obtiene.

$$\ln \gamma_A = -2,84 \cdot x_A^2 \ln x_A + 5,68 \cdot x_A \ln x_A - 2,84 \cdot \ln x_A - 1,4 \cdot x_A^2 + 2,8 \cdot x_A - 1,4 \quad (54)$$

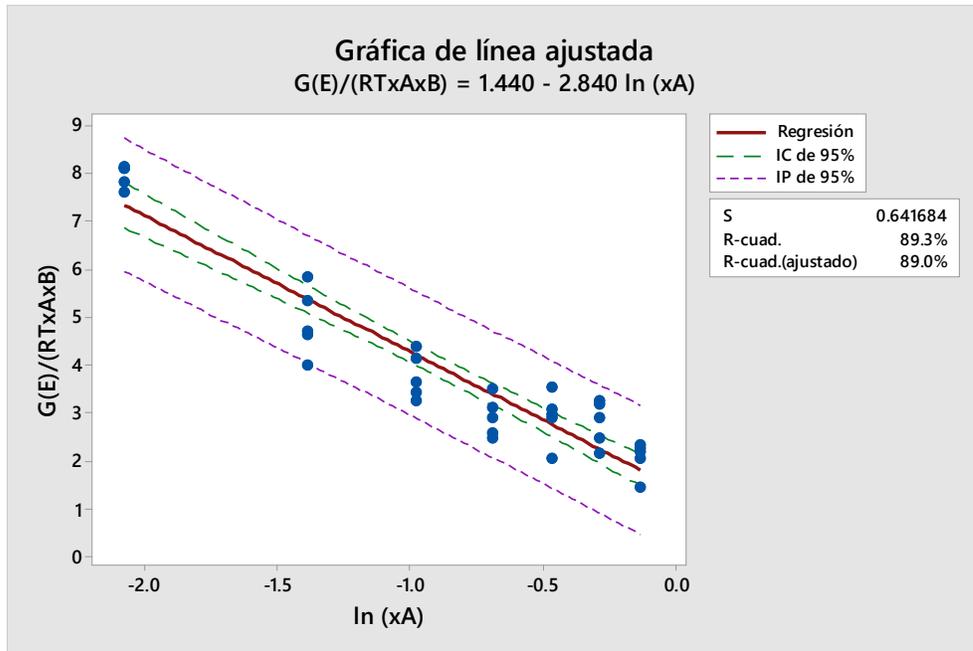
$$\begin{aligned} P(-3,011 \cdot x_A^2 \ln x_A + 6,022 \cdot x_A \ln x_A - 3,011 \cdot \ln x_A - 1,754 \cdot x_A^2 \\ + 3,508 \cdot x_A - 1,754 \leq \ln \gamma_A \\ \leq -2,669 \cdot x_A^2 \ln x_A + 5,338 \cdot x_A \ln x_A - 2,669 \cdot \ln x_A \\ - 1,046 \cdot x_A^2 + 2,092 \cdot x_A - 1,046) = 0,95 \end{aligned} \quad (55)$$

$$\ln \gamma_B = -2,84 \cdot x_A^2 \ln x_A - 1,4 \cdot x_A^2 + 2,84 \cdot x_A \quad (56)$$

$$\begin{aligned} P(-3,011 \cdot x_A^2 \ln x_A - 1,754 \cdot x_A^2 + 3,011 \cdot x_A \leq \ln \gamma_B \\ \leq -2,669 \cdot x_A^2 \ln x_A - 1,046 \cdot x_A^2 + 2,669 \cdot x_A) = 0,95 \end{aligned} \quad (57)$$

Las ecuaciones 49, 51 y 53, muestran el intervalo de confianza al 95 %.

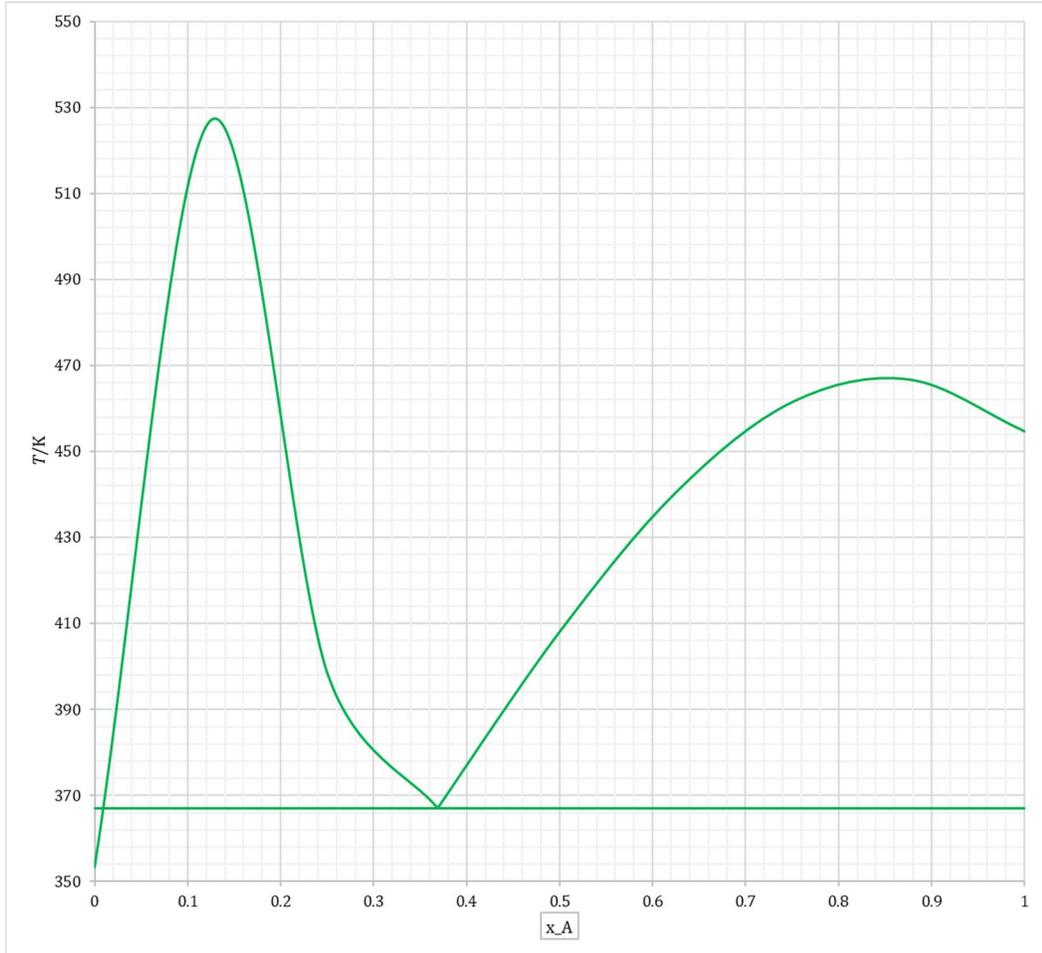
Figura 23. Gráfica de línea ajustada de  $G_m(E)/(RTx_AxB)$  en función de  $\ln(x_A)$



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

Se observa que tanto la banda de predicción como la banda de confianza son más angostas cuando  $\ln x_A = -1,0$

Figura 24. Simulación del diagrama de equilibrio sólido líquido realizado con el modelo obtenido



Fuente: elaboración propia, Excel 2013.

Donde

$$T(x_A) \left\{ \begin{array}{l} \left[ \frac{1}{395,55} - \frac{8,31451}{18060} (\ln x_A + (-2,84 \cdot x_A^2 \ln x_A + 5,68 \cdot x_A \ln x_A - 2,84 \cdot \ln x_A - 1,4 \cdot x_A^2 + 2,8 \cdot x_A - 1,4)) \right]^{-1} \\ \quad \text{si } 0 \leq x_A \leq 0,250 \\ \left[ \frac{1}{395,55} - \frac{8,31451}{18060} (\ln x_A + (-2,84 \cdot x_A^2 \ln x_A - 1,4 \cdot x_A^2 + 2,84 \cdot x_A)) \right]^{-1} \\ \quad \text{si } 0,250 \leq x_A \leq 1 \end{array} \right\}$$

### 4.3. Análisis estadístico del modelo propuesto

A continuación, se presenta una tabla, que resume los análisis estadísticos de los modelos matemático-estadísticos y el resultado de los análisis estadísticos del modelo propuesto en la sección anterior.

Tabla VIII. **Resumen de análisis estadístico de diferentes modelos matemático-estadísticos**

Modelo	Valor p Anderson-Darling	Valor p Levene	R <sup>2</sup> (ajustado)	Aleatoriedad	% correlograma
G <sup>(E)</sup> /RT- XA lineal	0,371	0,716	72,2	aceptable	93,75
G <sup>(E)</sup> /RT- XA cuadrático	0,612	0,716	88,3	aceptable	93,75
<b>G<sup>(E)</sup>/RT- ln XA lineal</b>	<b>0,107</b>	<b>0,716</b>	<b>88,98</b>	<b>aceptable</b>	<b>87,5</b>
G <sup>(E)</sup> /RT- ln XA cúbico	0,92	0,716	93,5	aceptable	93,75
G <sup>(E)</sup> /RT- ln XA cúbico	0,952	0,716	93,5	aceptable	93,75

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Resumen del modelo**

S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajustado)
0,641684	89,31 %	88,98 %

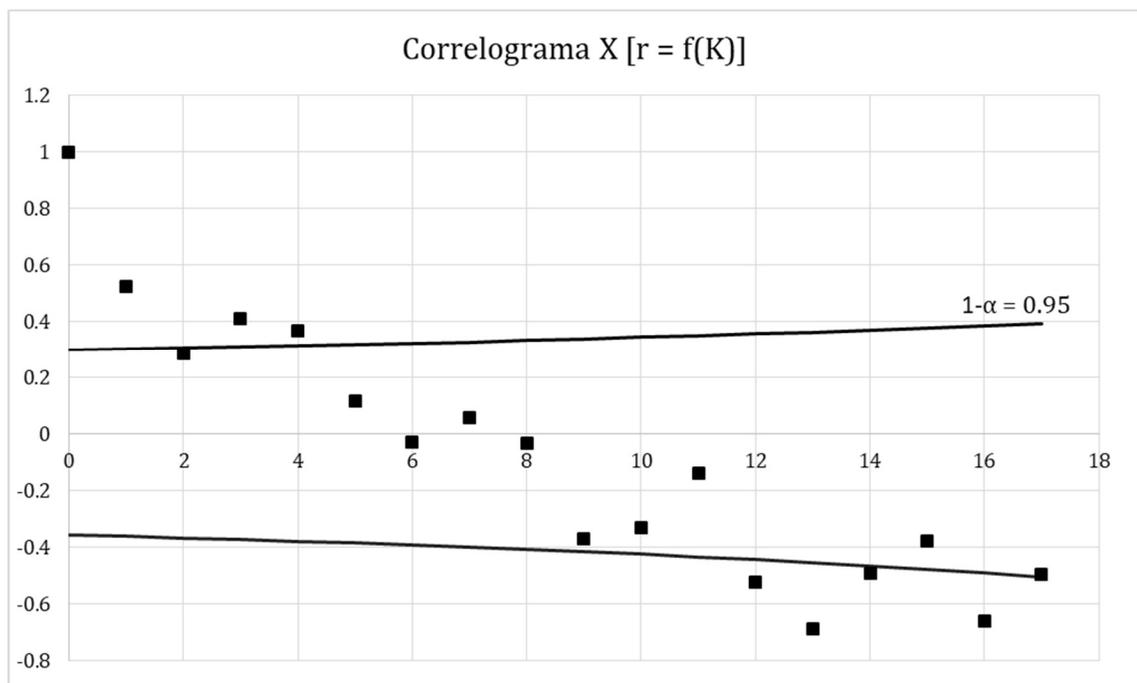
Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

Tabla X. **Análisis de varianza**

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	1	113,48	113,48	275,6	0
LN XA	1	113,48	113,48	275,6	0
Error	33	13,588	0,412		
Falta de ajuste	5	7,146	1,429	6,21	0,001
Error puro	28	6,442	0,23		
Total	34	127,068			

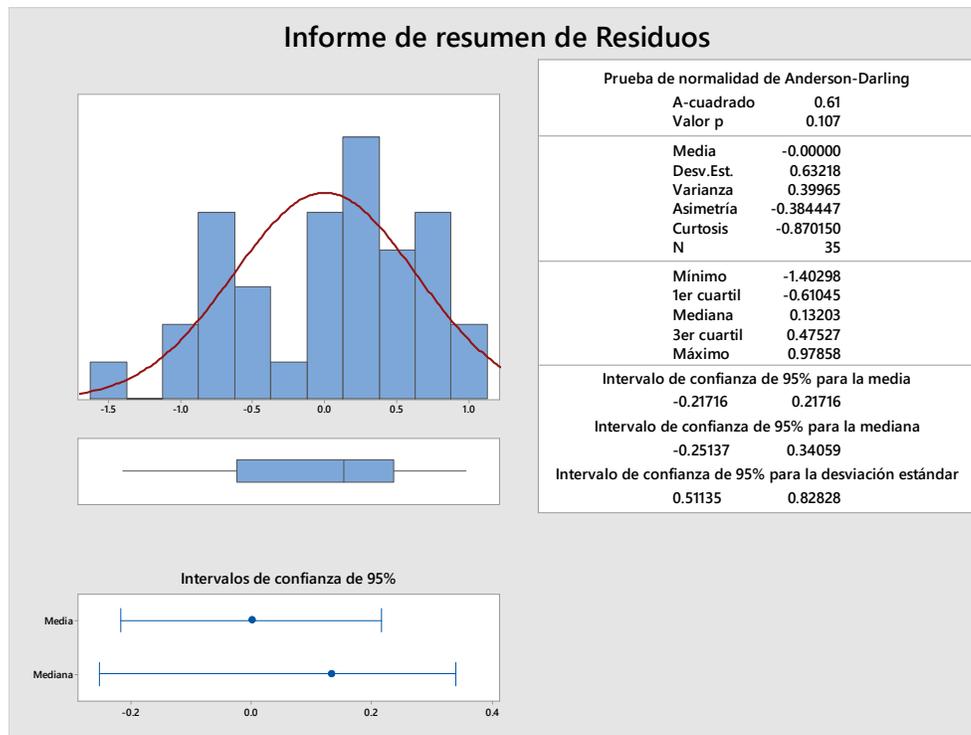
Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

Figura 25. **Correlograma**



Fuente: elaboración propia, Excel 2013.

Figura 26. Informe de residuos



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

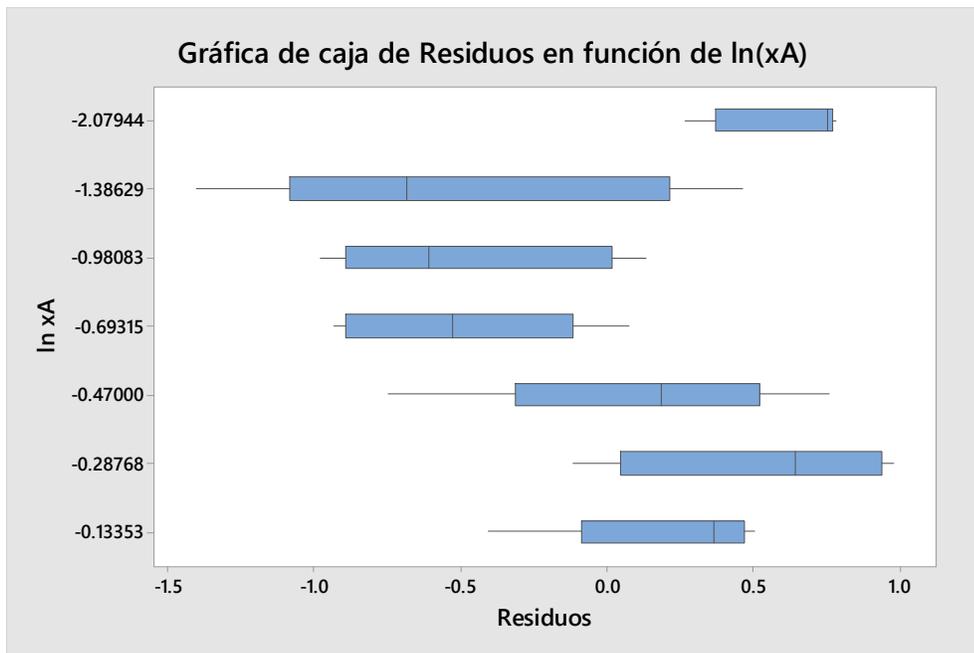
Al obtener un valor p de Anderson-Darling cercano a 0,1 se considera que la distribución se ajusta bien a los datos.

A continuación, se encuentran distintas gráficas en función de los residuos, los cuales se encuentran a partir de:

$$\varepsilon = \text{valor experimental} - \text{valor predicho} = y_{ij} - \widehat{y}_{ij} \quad (58)$$

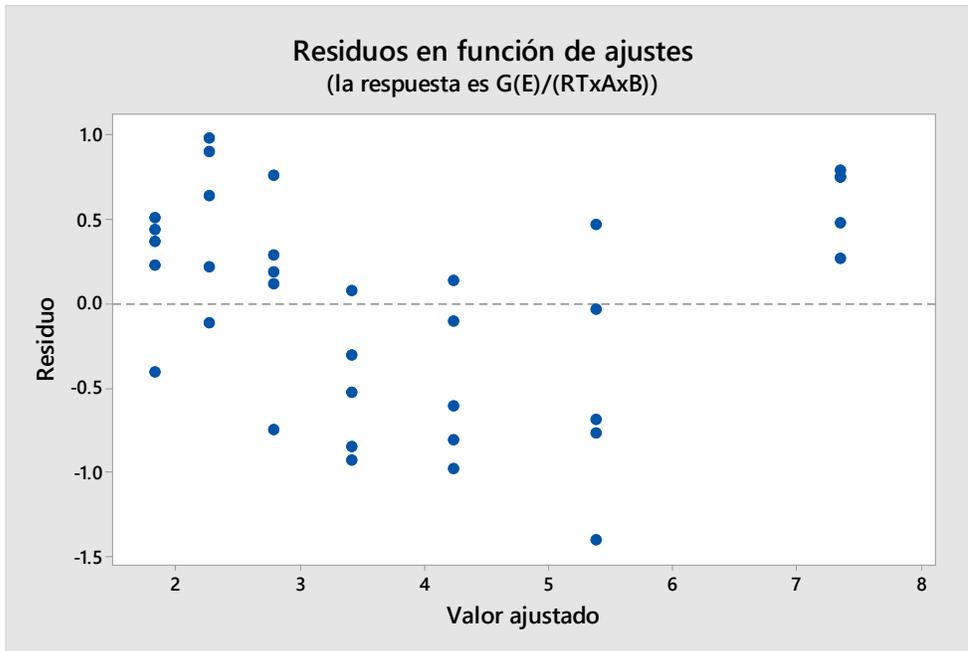
$$\therefore y \rightarrow \frac{G_m^{(E)}}{RTxAxB}$$

Figura 27. **Gráfica de caja de residuos**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

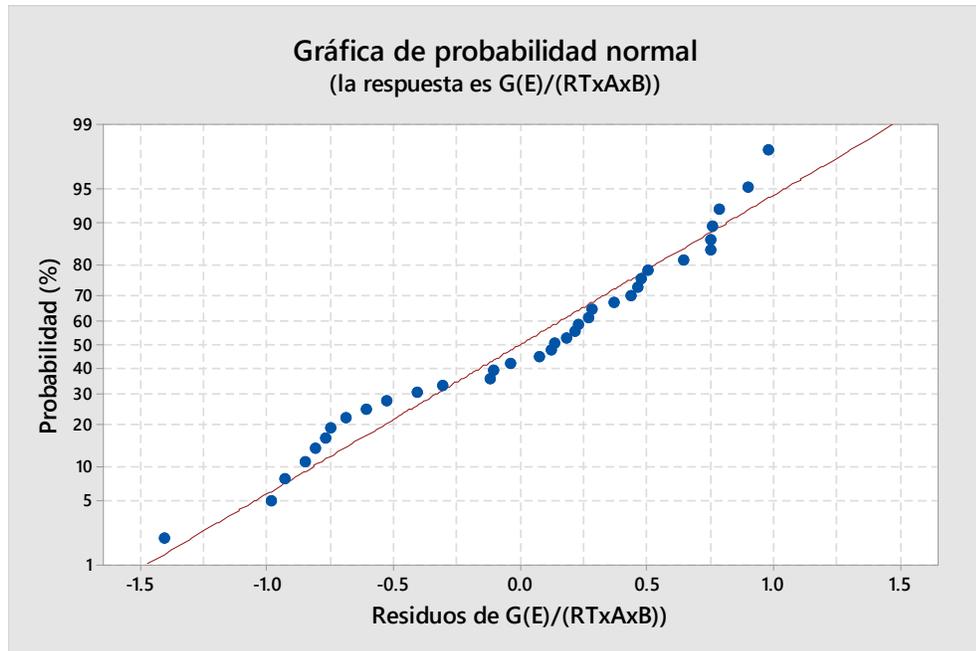
Figura 28. **Gráfica de residuos en función de ajustes**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

No se observa ningún patrón importante en la gráfica de residuos en función de los ajustes.

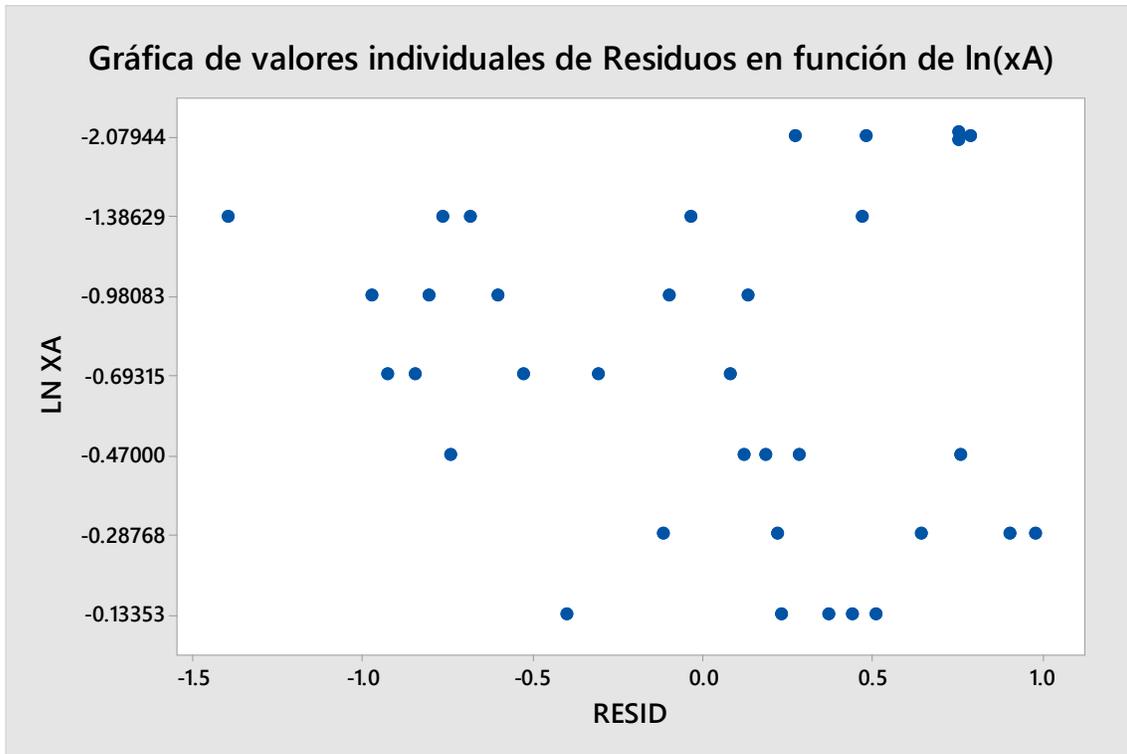
Figura 29. **Gráfica de probabilidad normal de residuos**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

Se observa que los residuos se acercan significativamente a la línea recta, por lo que los residuos están casi normalmente distribuidos.

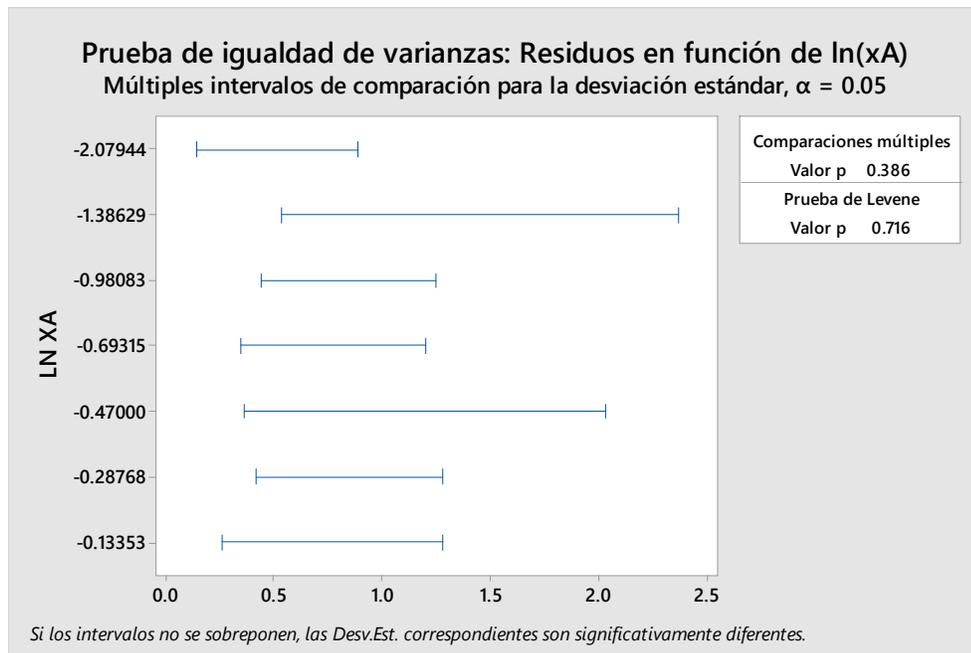
Figura 30. **Gráfica de valores individuales de residuos**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

Como puede observarse, no se encuentra ningún patrón en la Figura 30.

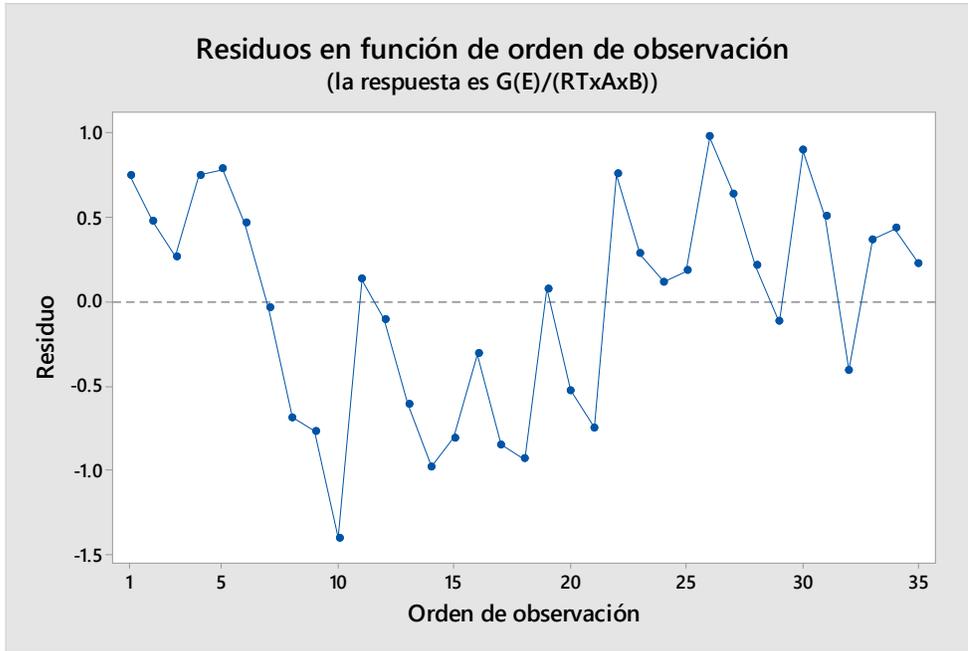
Figura 31. Prueba de igualdad de varianzas



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

Tanto el valor p de comparaciones múltiples como el valor p de la prueba de Levene son mayores al nivel de significancia.

Figura 32. **Residuos en función de orden de observación**



Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

No se observan tendencias ni patrones en los residuos.

Tabla XI. **Coefficientes del modelo propuesto**

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	1,44	0,183	7,87	0	
LN XA	-2,84	0,171	-16,6	0	1

Fuente: elaboración propia, empleando Minitab 18.

- Intervalo de predicción

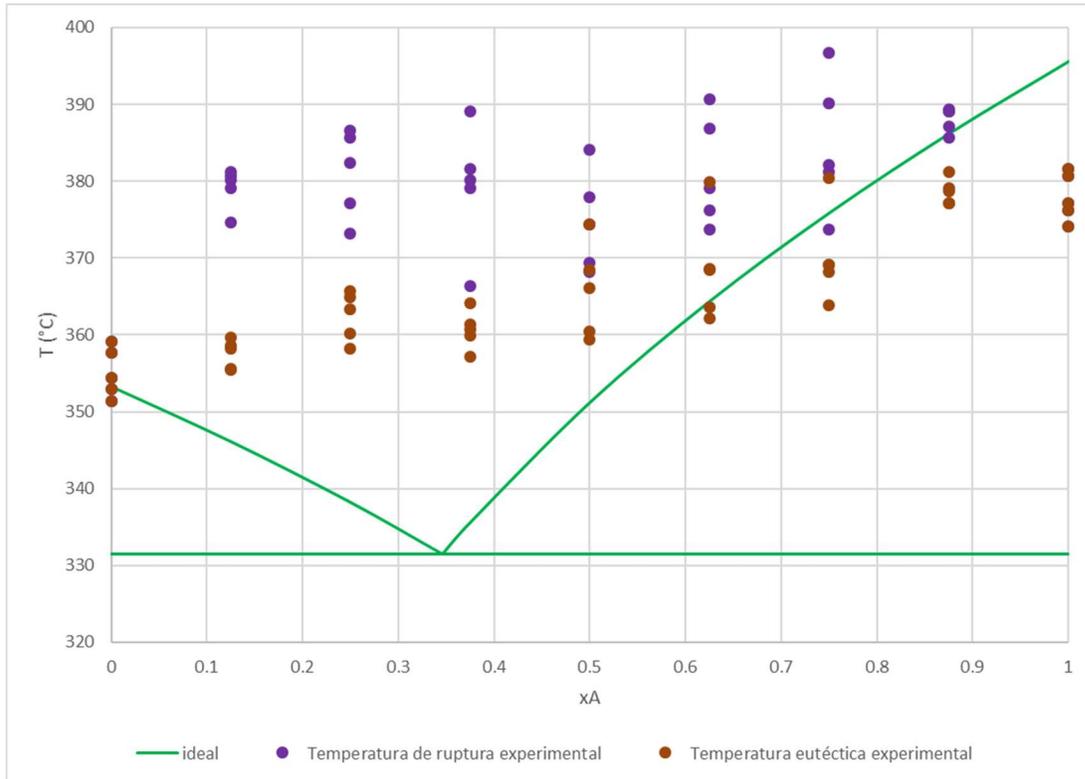
$$P\left(1,067 - 3,188 \ln x_A \leq \frac{G_m^{(E)}}{RT x_A x_B} \leq 1,812 - 2,492 \ln x_A\right) = 0,95$$

## 5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

### 5.1. Caracterización experimental del equilibrio de fases

Al comparar los datos experimentales obtenidos con el modelo coligativo para una mezcla diluida ideal, este no se ajusta significativamente al comportamiento real. Esto indica que el comportamiento real del sistema binario naftaleno-ácido benzoico se aleja significativamente del comportamiento de una mezcla diluida ideal; lo cual se debe posiblemente a la existencia de interacciones de las moléculas de la especie A y la especie B (A-B), al contrario de la suposición realizada en el modelo coligativo para una disolución ideal, donde solamente se toman en cuenta las interacciones A-A y B-B. La interacción de naftaleno y ácido benzoico puede ser a causa de las fuerzas de Van der Waals al ser no covalentes ambos compuestos. El alejamiento significativo con respecto a una mezcla diluida ideal también podría ser a causa de la posible sublimación del naftaleno, la cual no puede comprobarse debido a que se utilizó un sistema cerrado y no se realizó un análisis de conservación de masa posterior al experimento.

Figura 33. **Comparación del modelo coligativo para una mezcla diluida ideal y los datos experimentales obtenidos**



Fuente: elaboración propia.

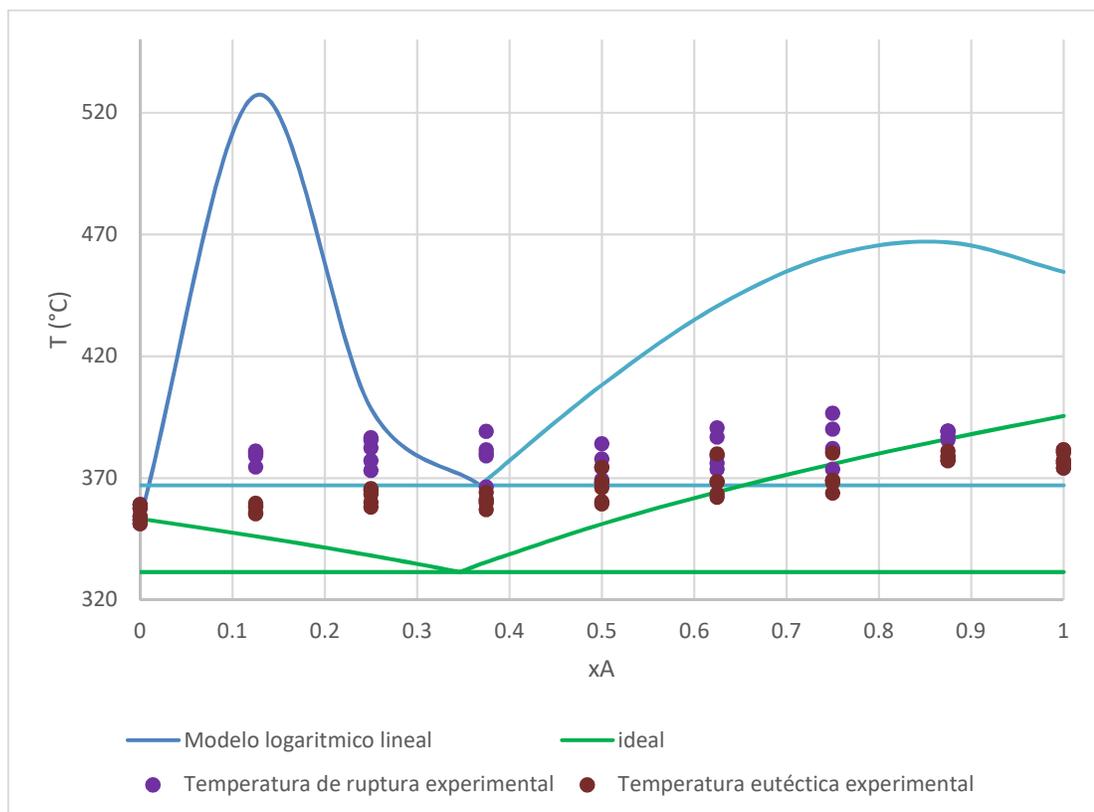
## 5.2. Obtención de un modelo que permite estimar las desviaciones del comportamiento ideal

Es posible que el modelo sea más preciso en los valores cercanos a  $\ln x_A = -1,0$ , debido a que tanto la banda de predicción como la banda de confianza son más angostas cuando  $\ln x_A \approx -1,0$ . Esto también puede observarse al comparar el modelo propuesto con los datos experimentales obtenidos (Figura 33), ya que  $\ln x_A = -1,0$  cuando  $x_A \cong 0,3679$ , y cuando  $x_A$  se acerca a este valor, los predichos se acercan más a los valores experimentales. Sin embargo, el modelo propuesto no describe totalmente el comportamiento real del equilibrio de fases

del sistema binario naftaleno-ácido benzoico, según los datos experimentales recopilados.

Al observar un diagrama de comparación del modelo coligativo para una mezcla diluida ideal y el modelo logarítmico lineal determinado a través de la presente investigación se observa que el último no cumple significativamente con el primero. Asimismo, se observa que la temperatura eutéctica predicha por el modelo propuesto es 35,57°C mayor a la temperatura eutéctica predicha por el modelo coligativo para una mezcla diluida ideal.

Figura 34. **Comparación del modelo coligativo para una mezcla diluida ideal, el modelo propuesto y los datos experimentales**



Fuente: elaboración propia.

### 5.3. Estimación estadística del nivel de correlación, independencia, variabilidad y predicción de tendencia del modelo propuesto

El modelo lineal de  $\frac{G_m^{(E)}}{RT}$  en función de  $\ln x_A$  fue seleccionado principalmente por tener un menor valor p Anderson-Darling, ya que mientras mejor se ajusta la distribución normal a los datos, menor es el estadístico Anderson-Darling. Y todos los demás estadísticos se consideran aceptables.

La desviación estándar tiene un valor de 0,6417, esta representa la distancia que separa los valores de los datos de los valores ajustados, ya que la desviación es baja, se considera que el modelo proporciona un ajuste aceptable.

El coeficiente de determinación de 0,8931 indica que el 89,31 % de la variación de la energía de Gibbs en exceso es explicada por el modelo, esto indica una correlación aceptable.

Tomando en cuenta un valor de significancia de 0,05, se puede inferir que el modelo explica la variación en la respuesta.

El análisis de residuos muestra que estos están distribuidos normalmente. Además, ya que la gráfica de valores individuales de residuos no presenta ningún patrón sistemático, es probable que los supuestos del modelo lineal obtenido sean válidos. También se plantea que ninguna de las diferencias entre los grupos es estadísticamente significativa para las variaciones concomitantes realizadas y todos los intervalos de comparación se superponen, debido a que el valor p de comparaciones múltiples ( $p = 0,386$ ) y el valor p de la prueba de Levene ( $p = 0,716$ ) son mayores al nivel de significancia ( $\alpha = 0,05$ ). Finalmente, se demuestra que los residuos son independientes entre sí, al no encontrarse tendencias ni

patrones al graficarlos en el orden de observación y la mayoría se ubica aleatoriamente alrededor de la línea central.





4. Se considera que el modelo propuesto tiene un nivel de correlación significativa (88,98 %), independencia de residuos, variabilidad y nivel de predicción de tendencias aceptables, según las pruebas realizadas.

## RECOMENDACIONES

1. Caracterizar el equilibrio de fases sólido-líquido sistema binario naftaleno-ácido benzoico utilizando curvas de enfriamiento de temperatura en función del tiempo para evaluar si de esta manera se puede obtener un modelo que describa mejor el comportamiento real de dicho equilibrio.
2. Modelar el equilibrio de fases sólido-líquido de otros sistemas binarios para comprobar el método utilizado en el presente trabajo de investigación.



## BIBLIOGRAFÍA

1. ANDERSON, David R., SWEENEY, Dennis J., WILLIAMS, Thomas A. *Estadística para administración y economía*. 10ª edición. México D.F.: Cengage Learning, 2008. 1191 p.
2. CENGEL, Yunus A., GHAJAR, Afshin J. *Transferencia de calor y masa*. 4ª edición. México D.F.: McGraw-Hill, 2011. 945 p.
3. COSTA, Mariana C. *Solid-Liquid Equilibrium of Binary Fatty Acid Mixtures*. 2007, Journal of Chemical & Engineering data. 30-36 p.
4. COSTA, Mariana. *The solid-liquid phase diagrams of binary mixtures of even saturated fatty acids differing by six carbon atoms*. 2009, Thermochemica Acta. 30-37 p.
5. COUTINHO, Joao A. P., STENBY, Erling H. *Predictive local composition Models for Solid/Liquid equilibrium in n-alkane systems: Wilson equation for multicomponent systems*. Denmark: s.n., 1996, Industrial & Engineering Chemistry Research. 918-925 p.
6. DORINGHELLO CARARETO, Natália Daniele. *Equilíbrio sólido-líquido e ponto de fulgor de misturas graxas*. Campinas: University of Pay and the Adour Regions, 2014. 254 p.
7. DOS SANTOS, M. Teles, LE ROUX, G. A. C., GERBAUD, V. *Solid-liquid equilibrium modelling for triacylglycerols exhibiting multiple solid*

*phases*. 2009, 2<sup>nd</sup> International Congress on Green Process Engineering, 2<sup>nd</sup> European Process Intensification Conference. 14-17 p.

8. IBARRA TAQUEZ, Harold Norbey. *Equilibrio de fases para sistemas electrolíticos con mezclas de solventes e iones*. Manizales: Trabajo de graduación, Universidad Nacional de Colombia, 2011. 99 p.
9. JUEZ MARTEL, Pedro, DÍEZ VEGAS, Francisco Javier. *Probabilidad y estadística matemática: aplicaciones en la práctica clínica y en la gestión sanitaria*. Madrid, España: Ediciones Díaz de Santos, 1996. 384 p.
10. KUROSAWA, Izumi. *Solid-liquid equilibrium in multi solute systems*. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2004. 232 p.
11. LEVINE, Ira N. *Principios de fisicoquímica*. 6a edición. México D.F.: McGraw-Hill, 2014. 1013 p.
12. MAXIMO, Guilherme, COSTA, Mariana, MEIRELLES, Antonio. *Solid-liquid equilibrium of triolein with fatty alcohols*. 2013, Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 30. 33-43 p.
13. NORDSTROM, Fredrik. *Solid-liquid phase equilibria and crystallization of disubstituted benzene derivatives*. Suecia: Instituto Real de Tecnología, 2006. 275 p.

14. OCHE, Kenji, HIRABA, Shigeru, KOJIMA, Kazuo. *Prediction of solid-liquid equilibria using ASOG*. Tokio: s.n., 1982, Journal of Chemical Engineering of Japan. 59-61 p.
15. SMITH, Joseph, VAN NESS, Hendrick. *Introducción a la termodinámica en ingeniería química*. México D.F.: Mc Graw-Hill, 2007. 840 p.



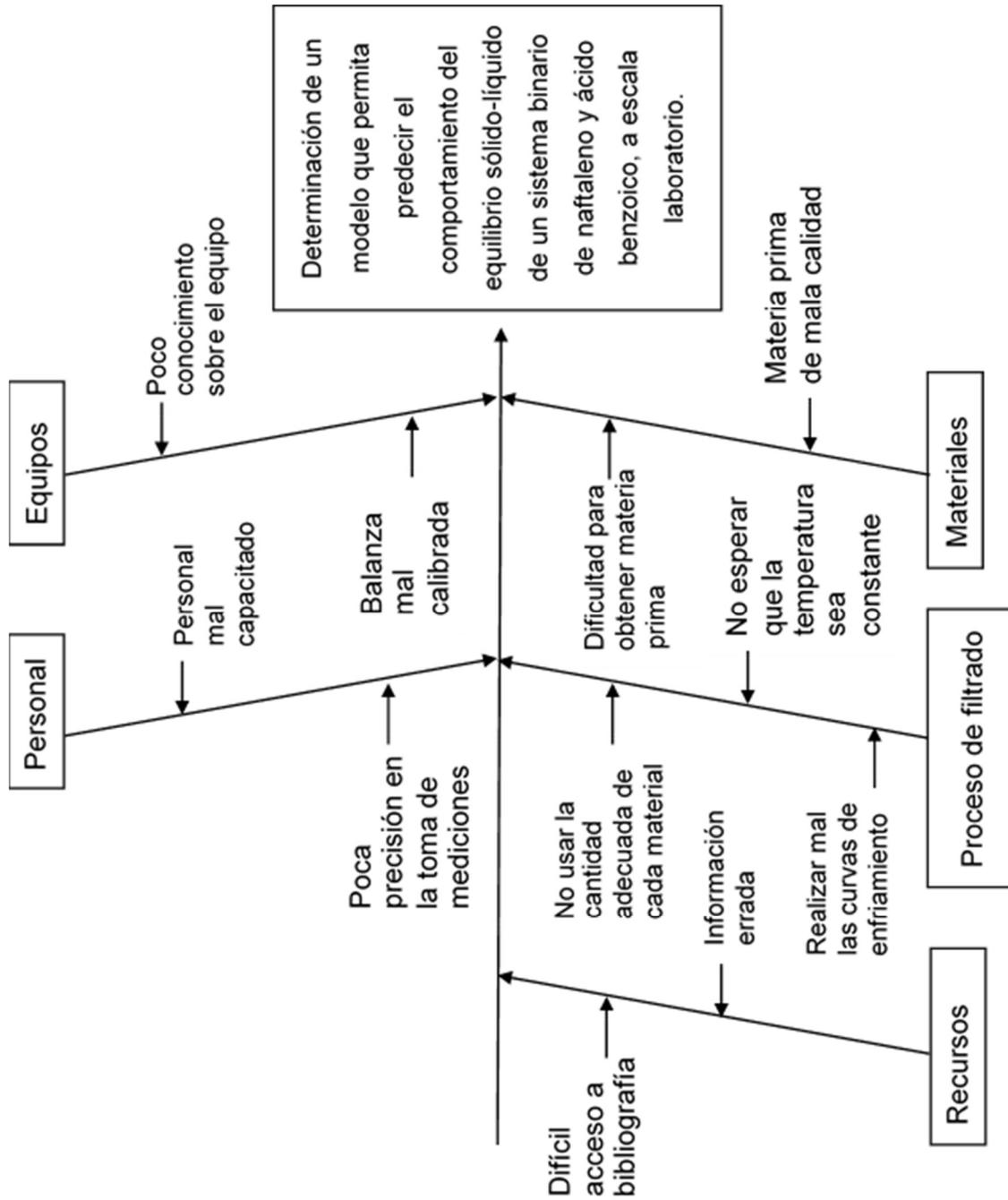
## APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

Car rera	Área	Curso	Temática
Ingeniería Química	Área de Química	Química 4	Expresión de concentraciones. Equilibrio químico.
		Química orgánica 1	Morfología de los compuestos
	Área de Físicoquímica	Físicoquímica 1	Equilibrio de fases
		Laboratorio de Físicoquímica 1	Diseño experimental de una investigación
		Laboratorio de Físicoquímica 2	Equilibrio de fases sólido- líquido en sistemas binarios
	Área de Ciencias Básicas y Complementarias	Estadística 1	Estadística descriptiva
		Estadística 2	Pruebas de hipótesis y análisis de varianza

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

### Apéndice 3. Matriz de coherencia

PROBLEMA GENERAL	DELIMITACIÓN	PREGUNTAS	OBJETIVOS	CONCLUSIONES
Falta de modelos empíricos realistas que predigan el comportamiento del equilibrio sólido-líquido de un sistema binario de naftaleno y ácido benzoico.	En el experimento se utilizaron naftaleno y ácido benzoico de grado industrial. Se realizó a presión atmosférica, y las muestras se enfriaron a temperatura ambiente. El experimento se realizó a escala laboratorio.	¿Cuáles son las condiciones a las cuales el sistema binario de naftaleno y ácido benzoico encuentra el equilibrio?  ¿Es posible generar un modelo matemático que permita predecir los datos obtenidos experimentalmente del equilibrio sólido-líquido?	Elaborar un modelo estadístico que permita predecir el comportamiento del equilibrio de fases de un sistema binario naftaleno-ácido benzoico, a escala laboratorio.  Caracterizar experimentalmente el equilibrio de fases de un sistema binario naftaleno-ácido benzoico a diferentes composiciones mediante sus puntos de fusión.  Obtener un modelo que permita estimar las desviaciones del comportamiento ideal para el equilibrio de fases del sistema binario naftaleno-ácido benzoico.	El análisis térmico, corregido con el modelo de Fourier, permite la construcción de modelos matemáticos estocásticos para la simulación del equilibrio de fases del sistema, con resultados estadísticamente considerables en su nivel de predicción. El modelo encontrado es el siguiente $\left( \begin{matrix} \ln \left( \frac{1-x_A}{1-x_A^*} \right) = -\frac{V_A}{RT} \left( \frac{1-x_A}{1-x_A^*} \right) \left( \frac{1-x_A}{1-x_A^*} \right) \left( \frac{1-x_A}{1-x_A^*} \right) \\ \ln \left( \frac{1-x_A}{1-x_A^*} \right) = -\frac{V_A}{RT} \left( \frac{1-x_A}{1-x_A^*} \right) \left( \frac{1-x_A}{1-x_A^*} \right) \left( \frac{1-x_A}{1-x_A^*} \right) \end{matrix} \right)$
		¿El modelo propuesto predice correctamente el comportamiento del equilibrio sólido-líquido del sistema binario de naftaleno y ácido benzoico?	Estimar estadísticamente el nivel de correlación, independencia, variabilidad y predicción de tendencia del modelo propuesto.	La mezcla binaria de naftaleno y ácido benzoico no se comporta como una disolución ideal, lo que indica que existen interacciones entre las moléculas de naftaleno y ácido benzoico. Significativamente al equilibrio predicho por el modelo coligativo para una mezcla diluida ideal.  El modelo obtenido para las desviaciones del comportamiento ideal, $G(E)/RT=x_A(1-x_A)[(-1,44 \pm 0,183) + (-2,84 \pm 0,171) \ln(x_A)]$ , se ajusta mejor a los datos experimentales cuando $x_A \approx 0,3679$ , sin embargo, se considera que no describe totalmente el comportamiento real del equilibrio de fases del sistema binario naftaleno-ácido benzoico, dejando un 10,69% de variación sin explicar.  Se considera que el modelo propuesto tiene un nivel de correlación significativa (88,98%), independencia de residuos, variabilidad y nivel de predicción de tendencias aceptables, según las pruebas realizadas.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Datos experimentales**

xAB	0	Datos de composición No. 1											
1-xAB	1												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	24,4	22		22		20,82		20,82					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
0	150	47,2	150	45	150	45,6	150	40	150	40,2	150	43,6	
10	148	45,3	149	42,6	149	45,5	149	40	149	40,2	149	42,7	
20	147	45	148	42,4	148	45,2	147	39	148	38,5	148	42	
30	145	44,5	147	40,9	146	44,8	146	38	146	38,8	146	41,4	
40	144	44,6	146	40,9	145	44,5	144	38,5	145	36,8	145	41,1	
50	142	43,7	144	40,9	144	43,4	143	37	143	36,9	143	40,4	
60	141	43,4	143	40,9	142	43,4	141	36	142	37	142	40,1	
70	140	43,2	142	40	141	43,4	140	35,1	140	37,1	141	39,8	
80	138	41,8	141	39,9	139	42,6	139	37	139	36,2	139	39,5	
90	137	42,5	139	39,8	138	42,3	138	37,5	138	36,6	138	39,7	
100	135	42,5	138	38,8	137	42,3	136	36	136	35,8	136	39,1	
110	134	41,6	137	38,6	136	41,5	135	35	135	35,4	135	38,4	
120	133	41,7	136	38,6	134	41,1	133	35,3	133	35	134	38,3	
130	131	41,4	134	38,6	133	40,7	132	35,3	132	34,1	132	38	
140	130	40,6	134	38	132	40,2	131	34,4	131	34	131	37,4	
150	129	40,5	132	37,2	131	38,4	129	34	129	35	130	37	
160	128	40,9	131	37,2	129	37,6	128	33	128	33,6	129	36,5	
170	126	39,9	130	37,2	128	39	127	33,5	127	34,2	127	36,8	
180	125	39,5	128	37,2	127	39	126	32,6	125	33,2	126	36,3	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0	Datos de composición No. 1											
1-xAB	1												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	24,4	22		22		20,82		20,82					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
190	124	39,2		127	37,3	126	39,3	124	32,6	124	33,2	125	36,3
200	122	39,2		126	38	125	39,3	123	33,3	123	33	124	36,6
210	121	39,2		125	38	124	39,5	122	32,2	121	33	122	36,4
220	120	38		124	38	122	38	121	33,7	120	33	121	36,1
230	119	39,2		123	38	121	38,2	119	33,7	119	31,3	120	36,1
240	118	37,9	121	38	120	38	119	34	118	32,3	119	36	
250	116	37,4	120	38	119	38	118	34	116	31,8	118	35,8	
260	115	37,4	119	38	118	37,1	117	34	115	31,9	117	35,7	
270	114	37,1	118	34,7	117	37	115	32	114	31,9	115	34,5	
280	113	36,8	117	35	116	37	114	31,5	113	30,1	114	34,1	
290	111	36,8	116	33,5	115	36,7	112	30,8	112	29,7	113	33,5	
300	110	37,2	115	33,5	114	36,7	111	30,5	111	29,7	112	33,5	
310	109	37,2	114	33,2	113	36,5	110	30,2	109	28,9	111	33,2	
320	108	36,8	113	33,2	112	36,5	109	30,2	108	29,3	110	33,2	
330	107	36,6	112	32,7	111	36,5	108	29,5	107	29	109	32,9	
340	106	36,6	111	32,6	110	35,6	107	30	106	29,5	108	32,9	
350	105	35,1	109	32,6	108	35,4	106	29,8	105	29,2	106	32,4	
360	103	35	108	32,4	108	35	105	30	104	29,2	105	32,3	
370	103	34,2	107	32,5	107	35	104	29,3	103	28,8	104	32	
380	101	35	106	32	106	34,8	102	29	101	28,7	103	31,9	
390	100	34,4	105	32	104	34,2	101	28,3	100	28	102	31,4	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0	Datos de composición No. 1										
1-xAB	1											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	24,4	22		22		20,82		20,82				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
400	99	34,6	104	32,4	103	34,2	100	28,7	99	29	101	31,8
410	98	35	103	31,4	103	33,7	99	28,7	97,5	27,8	99,9	31,3
420	97	35,1	102	31,4	102	33,2	97,5	27,6	96,5	28,4	98,9	31,1
430	96	33,7	101	31,4	101	32,9	96,5	28	95	27,6	97,7	30,7
440	95	33,6	99,5	31,4	99	32,9	95,5	27,5	94	27,3	96,6	30,5
450	94	33,5	98,5	30,5	98,5	32,9	94,5	27	93	27,8	95,7	30,3
460	93	33,1	97,5	30,5	97,5	33,7	93,5	27	92	27,3	94,7	30,3
470	92	33,1	96,5	30,7	96,5	33,5	92,5	27,4	91	27	93,7	30,3
480	91	33,4	95,5	30,6	95,5	32,9	91,5	27,4	90	26,4	92,7	30,1
490	90,5	32,9	94,5	30,6	95	33,7	90,5	27,2	88,5	27,1	91,8	30,3
500	90	32,6	94	30,2	94	33,7	89,5	27,2	87,5	26	91	29,9
510	89	31,8	93	29,7	93	32,7	88,5	27,1	86,5	26,3	90	29,5
520	88	32,4	92	30	92	32,7	87	26,6	85,5	26,3	88,9	29,6
530	87	32,4	91	29,7	91	31,8	86,5	26,7	85	26,4	88,1	29,4
540	86,5	31,9	90	29,3	90,5	31,9	85,5	26,5	84	25,9	87,3	29,1
550	86	32	89	29,3	89	31,4	84,5	27	83	26	86,3	29,1
560	85	31,6	88,5	29,1	88,5	31,6	83,5	27	82	25,5	85,5	29
570	84	31,7	87,5	29,2	87,5	32,7	82,5	26,2	81	25,4	84,5	29
580	83,5	30,7	87	29,2	86,5	31,7	82	26,3	80,5	24,7	83,9	28,5
590	83	31,3	86	29	86	31,7	81	26,3	79,5	25	83,1	28,7
600	82	30,8	85	29	85	31,2	80	25,3	78,5	25,4	82,1	28,3

Continuación Apéndice 4.

xAB	0	Datos de composición No. 1										
1-xAB	1											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	24,4	22		22		20,82		20,82				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
610	81,5	30,5	84,5	28,3	84,5	31,8	79,5	25,6	78	25,5	81,6	28,3
620	81	30,5	83,5	28,3	83,5	30,9	78,5	26,5	77	25,5	80,7	28,3
630	80	30,3	83	27,9	83	30,9	77,5	26,5	76,5	24,7	80	28,1
640	79	30,7	82	27,6	82	30,9	77	26	75,5	24,9	79,1	28
650	78,5	30,7	81,5	28	81,5	30,9	76	25,1	75	24,9	78,5	27,9
660	78	30,5	80,5	27,6	80,5	30,2	75,5	25,2	74,5	24,9	77,8	27,7
670	77	30,3	80	27,4	80	30,2	75	25,8	73,5	25	77,1	27,7
680	76,5	30,3	79	27,7	79,5	30,8	74	25,6	73	25,1	76,4	27,9
690	76	30,3	78,5	27,7	78,5	30,8	73,5	25,4	72,5	25,1	75,8	27,9
700	75,5	30	78	27,9	78	30,8	73	25,8	72	24,9	75,3	27,9
710	75	30,5	77	28,2	77,5	30,9	72	25,6	71	24,9	74,5	28
720	74	30,5	76,5	28	77	30,9	71,5	25,3	70,5	25	73,9	27,9
730	74	30,5	76	27,7	76,5	30,9	71	24,9	70	24,8	73,5	27,8
740	73,5	30,2	75,5	27,8	76	30,9	70,5	25,6	69,5	24,8	73	27,9
750	73	30,2	75	27,8	75,5	30,6	70	25,4	69	25	72,5	27,8
760	72,5	30,2	74,5	27,4	75	31,2	69	25,3	68,5	24	71,9	27,6
770	72	30,2	74	27,2	74,5	31,2	69	25	68	24	71,5	27,5
780	72	30	73,5	27,2	74	31	68,5	24,5			72	28,2
790	71,5	30	73	27,2	73,5	30,5	68	25,1			71,5	28,2
800	71	29,9	72,5	27	73	30,1					72,2	29
810	71	30	72	27	72,5	30,1					71,8	29

Continuación Apéndice 4.

xAB	0	Datos de composición No. 1											
1-xAB	1												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	24,4	22		22		20,82		20,82					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
820	70	30,1	71,5	26,7	72	30,7					71,2	29,2	
830	70	30,1	71	26,7	72	30,4					71	29,1	
840	69,5	29,8	70,5	26,8	71,5	30,6					70,5	29,1	
850	69	29,6	70	27,2	71	30,3					70	29	
860	69	29,7	69,5	26,9	71	30,4					69,8	29	
870	68,5	29,5	69	26,6	70	30,2					69,2	28,8	
880	68	29,7	69	26,6	70	30,3					69	28,9	
890			68,5	26,8	69,5	30,1					69	28,5	
900			68	27,1	69	30					68,5	28,6	
910					69	30,1					69	30,1	
920					68,5	29,8					68,5	29,8	
930					68	29,7					68	29,7	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,125	Datos de composición No. 2											
1-xAB	0,875												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	21,1	21,1		21,1		20,9		20,9					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
0	150	46	150	43	150	41	150	49	150	45	150	45	
10	149,5	43	150	43	149	41	149	44	149	44	149	43	
20	149	42	149	40	148	41	148	44	147	44	148	42	
30	148	39	148	40	146	38	147	44	145	42	147	41	
40	147	41	146	40	145	38	146	42	144	43	145	41	
50	146	39	145	38	144	38	144	41	142	43	144	40	
60	144,5	37	144	40	142	38	143	42	140	42	143	40	
70	143	42	142	38	141	38	141	42	139	41	141	40	
80	141,5	42	141	38	140	38	140	41	137	42	140	40	
90	140	39	137	37	138	36	138	42	135	42	138	39	
100	138,5	41	138	37	136	36	137	42	134	40	137	39	
110	137,5	39	137	37	135	35	135	40	132	40	135	38	
120	136	38	136	36	134	35	134	41	131	40	134	38	
130	134,5	38	134	36	132	34	133	41	130	41	133	38	
140	133	37	133	37	131	34	131	41	128	41	131	38	
150	131,5	37	132	35	130	33	130	41	127	38	130	37	
160	130	36	131	35	129	33	128	38	125	39	128	36	
170	129	36	129	35	127	33	127	38	124	39	127	36	
180	127	35	128	35	126	32	126	38	122	37	126	35	
190	125	36	127	33	125	32	125	38	121	38	125	35	
200	124	35	125	33	124	33	123	38	120	37	123	35	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,125	Datos de composición No. 2											
1-xAB	0,875												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	21,1	21,1		21,1		20,9		20,9					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
210	123,5	34	124	32	122	33	122	38	119	37	122	34	
220	122,5	34	123	33	121	33	121	38	118	37	121	35	
230	121	34	122	32	120	30	120	36	116	37	120	34	
240	120	33	121	32	119	32	119	36	115	37	119	34	
250	119	34	120	31	118	31	117	36	114	36	117	34	
260	118	33	118	31	117	31	116	35	113	36	116	33	
270	117	33	117	32	116	30	115	35	111	36	115	33	
280	116	33	116	31	114	30	114	36	110	36	114	33	
290	115	32	116	31	113	30	112	38	109	36	113	33	
300	113,5	32	114	31	112	30	111	36	108	35	112	33	
310	112,5	31	113	30	111	30	110	36	107	34	111	32	
320	111,5	32	112	30	110	30	109	36	106	34	110	32	
330	110	32	111	30	109	29	108	34	105	34	109	32	
340	109	31	110	30	108	30	107	34	103	34	107	32	
350	108	31	109	29	107	29	106	33	102	33	106	31	
360	107	30	108	29	106	28	105	33	101	33	105	31	
370	105,5	30	107	29	105	27	104	33	100	33	104	30	
380	105	30	106	29	104	28	103	35	99	32	103	31	
390	104	29	105	29	103	28	101	33	98	32	102	30	
400	103	29	104	28	102	28	101	33	97	32	101	30	
410	102	30	103	28	101	27	100	32	96	31	100	30	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,125	Datos de composición No. 2										
1-xAB	0,875											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,1	21,1		21,1		20,9		20,9				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
420	101	30	102	28	100	27	99	32	95	33	99	30
430	100	29	101	27	99	28	98	32	94	32	98	30
440	98,5	28	100	27	98	27	97	32	94	33	97	30
450	97,5	29	99	27	97	25	95	32	93	31	96	29
460	97	29	98	27	96	26	95	32	92	32	96	29
470	96	28	97	27	95	27	94	31	91	31	95	29
480	95	28	96	26	95	26	92	31	90	31	94	28
490	94	28	95	26	94	26	92	31	89	30	93	28
500	93	28	95	26	93	26	91	31	88	31	92	28
510	92	27	94	26	92	26	90	32	87	30	91	28
520	91,5	27	93	27	91	25	89	32	86	30	90	28
530	91	28	92	27	90	25	88	32	86	31	89	28
540	90	27	91	26	89	25	87	30	85	30	88	28
550	89	27	90	26	88	25	86	31	84	30	87	27
560	88	27	89	26	87	25	85	31	83	30	86	27
570	87	27	88	26	86	25	85	31	82	30	86	27
580	87	26	87	26	86	24	84	31	82	28	85	27
590	86	26	86	25	85	24	83	30	81	28	84	27
600	85	26	85	24	84	24	82	30	80	29	83	27
610	84	25	85	25	83	24	82	30	79	30	83	27
620	83,5	25	84	25	82	24	80	30	79	30	82	27

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,125	Datos de composición No. 2											
1-xAB	0,875												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	21,1	21,1		21,1		20,9		20,9					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
630	83	25	83	24	81	24	80	31	78	29	81	27	
640	82	25	82	24	81	24	79	30	77	28	80	26	
650	81	25	82	24	80	23	79	30	77	28	79	26	
660	80,5	25	81	25	79	24	78	30	77	30	79	27	
670	80	24	80	24	78	24	77	29	75	30	78	26	
680	79,5	24	80	24	78	23	76	29	75	30	77	26	
690	79	24	79	24	77	23	75	29	74	29	77	26	
700	78	25	78	24	76	23	75	29	74	28	76	26	
710	77	25	77	24	75	23	74	30	73	27	75	26	
720	76	25	77	24	75	23	74	30	73	28	75	26	
730	76	25	76	24	74	23	73	30	72	28	74	26	
740	75	24	75	23	74	23	73	30	72	27	74	25	
750	75	24	75	24	73	23	72	29	72	27	73	26	
760	74	24	74	24	72	23	72	29	71	28	73	26	
770	74	24	73	24	72	23	71	29	71	28	72	25	
780	73	24	73	24	71	22	71	28	71	27	72	25	
790	72,5	24	72	23	71	23	71	29	71	28	71	25	
800	72	24	72	23	70	22	70	29	71	28	71	25	
810	71,5	23	71	22	70	23	70	28	71	28	71	25	
820	71	23	71	22	70	23	70	29	70	28	70	25	
830	70,5	23	71	22	69	23	70	29	70	27	70	25	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,125	Datos de composición No. 2										
1-xAB	0,875											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,1	21,1		21,1		20,9		20,9				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
840	70,5	23	70	23	69	22	69	29	70	28	70	25
850	70	23	70	23	69	22	69	29	70	28	70	25
860	70	23	70	23	68	22	69	28	70	28	69	25
870	69,5	23	69	23			69	28	70	28	69	25
880	69	23	69	22			69	28	70	28	69	25
890	69	23	69	23			69	28	70	27	69	25
900	68,5	23	68	23			68	28	69	27	68	25
910	68,5	23							69	27	69	25
920	68	23							69	27	69	25
930									69	28	69	28
940									69	28	69	28
950									69	28	69	28
960									69	28	69	28
970									69	27	69	27
980									69	27	69	27
990									69	27	69	27
1000									68	28	68	28

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,25	Datos de composición No. 3											
1-xAB	0,75												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	21,7	17,1		19,1		19,1		19,1					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
0	150	45	150	45	150	44	150	45	150	44	150	45	
10	149	44	148	46	148	44	148	42	149	44	148	44	
20	148	44	146	46	147	42	147	44	148	44	147	44	
30	146	44	145	46	145	41	145	44	146	43	145	43	
40	145	43	143	44	144	41	145	42	145	42	144	42	
50	144	43	142	45	143	41	143	42	143	42	143	42	
60	143	42	140	42	141	41	142	40	142	43	141	41	
70	141	41	139	42	140	39	141	40	141	41	140	41	
80	140	40	137	43	138	39	139	39	140	40	139	40	
90	138	41	136	42	137	39	138	39	138	41	137	40	
100	137	41	134	41	135	39	137	38	137	41	136	40	
110	135	39	133	41	134	37	135	39	136	40	134	39	
120	134	39	131	41	133	37	134	38	134	39	133	39	
130	133	39	130	39	131	37	133	37	133	39	132	38	
140	131	39	129	38	130	36	132	38	132	39	131	38	
150	130	37	127	38	129	36	130	37	130	38	129	37	
160	129	37	126	38	127	35	129	37	129	39	128	37	
170	128	37	125	38	126	36	128	37	128	38	127	37	
180	126	37	123	37	125	36	127	37	127	37	125	37	
190	125	35	122	37	123	36	125	37	125	37	124	36	
200	124	36	121	37	122	35	124	35	124	37	123	36	
210	123	35	120	37	121	35	123	35	123	37	122	36	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,25	Datos de composición No. 3										
1-xAB	0,75											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,7	17,1		19,1		19,1		19,1				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
220	122	36	118	37	120	35	122	35	122	36	121	36
230	120	35	117	37	118	34	121	35	121	36	119	35
240	119	34	116	34	117	34	119	35	120	36	118	35
250	118	34	115	34	116	34	118	33	118	36	117	34
260	117	34	113	35	115	33	117	34	117	35	116	34
270	115	33	112	35	114	33	116	33	116	35	115	34
280	114	33	111	34	113	32	115	33	115	34	113	33
290	113	33	110	34	111	32	113	33	114	34	112	33
300	112	32	109	32	110	32	112	33	113	34	111	33
310	111	32	107	33	109	32	111	33	112	33	110	33
320	110	32	106	32	108	31	110	33	110	34	109	32
330	108	32	105	33	107	31	109	32	109	34	108	32
340	107	33	104	32	106	31	108	31	109	34	107	32
350	106	32	103	32	105	31	107	31	107	34	106	32
360	105	31	102	32	104	29	106	31	107	33	105	31
370	103	31	101	31	103	30	105	30	105	32	103	31
380	102	31	100	32	102	29	104	31	104	31	102	31
390	101	30	99	30	101	29	103	30	104	31	101	30
400	100	30	98	31	100	30	101	30	103	32	100	30
410	99	30	97	31	99	30	101	30	101	31	99	30
420	99	30	96	30	98	29	100	30	101	31	99	30
430	98	30	95	30	97	29	99	29	100	31	98	30

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,25	Datos de composición No. 3											
1-xAB	0,75												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	21,7	17,1		19,1		19,1		19,1					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
440	97	30	94	29	96	27	98	29	99	31	97	29	
450	96	30	93	29	95	28	96	29	98	30	95	29	
460	95	30	92	29	93	27	95	29	97	30	94	29	
470	94	29	91	29	92	27	94	29	96	30	93	29	
480	93	29	90	28	92	27	93	29	95	30	93	29	
490	92	29	89	28	91	27	93	28	94	30	92	28	
500	91	29	88	28	90	27	91	28	93	30	91	28	
510	90	29	87	28	89	27	90	28	92	30	90	28	
520	91	29	86	27	88	27	89	28	91	29	89	28	
530	89	29	86	28	87	27	88	27	90	29	88	28	
540	88	28	85	28	86	27	87	27	89	29	87	28	
550	87	27	84	27	85	26	86	27	88	29	86	27	
560	87	27	83	29	85	26	85	26	87	28	85	27	
570	86	27	82	29	84	26	84	26	86	28	84	27	
580	85	27	81	27	83	26	83	26	86	28	84	27	
590	85	27	81	27	82	26	83	26	85	28	83	27	
600	84	27	80	26	82	26	82	26	84	28	82	27	
610	83	27	79	26	81	25	81	27	83	28	81	27	
620	82	26	78	26	80	26	80	27	82	28	80	26	
630	81	26	78	26	79	25	79	27	81	27	80	26	
640	81	26	72	25	79	25	79	27	81	27	78	26	
650	80	26	71	25	78	25	78	27	80	27	77	26	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,25	Datos de composición No. 3										
1-xAB	0,75											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,7	17,1		19,1		19,1		19,1				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
660	80	26	75	25	77	25	77	26	79	26	78	26
670	79	26	74	25	76	24	76	26	78	27	77	26
680	78	26	74	24	75	25	75	26	77	27	76	26
690	78	26	73	25	75	24	75	26	76	27	75	26
700	77	25	72	25	74	24	74	25	76	25	75	25
710	76	25	72	25	73	24	73	25	75	26	74	25
720	76	25	71	26	73	24	73	25	75	25	73	25
730	75	25	70	24	72	24	72	24	74	25	73	25
740	75	25	70	24	71	24	71	24	73	25	72	24
750	74	25	69	24	71	24	71	24	73	25	71	24
760	73	25	68	24	70	24	70	24	72	25	71	24
770	73	25			69	24	69	24	71	25	70	24
780	72	25			69	24	69	23	71	25	70	24
790	72	25			68	23	68	24	70	25	69	24
800	71	25							70	25	70	25
810	70	24							69	25	70	24
820	70	24							68	24	69	24
830	69	24									69	24
840	69	24									69	24
850	68	24									68	24

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,375	Datos de composición No. 4											
1-xAB	0,625												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	22	22		22		20,82		20,82					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
0	150	41	150	45	150	45	150	47	150	46	150	45	
10	149	42	149	45	149	44	149	47	149	46	149	45	
20	147	41	148	45	148	43	147	45	148	46	148	44	
30	146	41	147	43	147	43	146	45	146	46	146	43	
40	145	42	146	43	146	43	145	43	145	46	145	43	
50	143,5	41	144	43	144	42	143	43	144	46	144	43	
60	142	40	143	43	143	43	142	43	143	44	143	43	
70	141	40	142	42	142	42	141	42	141	44	141	42	
80	140	39	141	43	141	42	140	42	140	44	140	42	
90	138,5	39	139	42	139	42	138	41	139	44	139	42	
100	137	39	138	42	138	40	137	41	138	43	137	41	
110	136	39	137	41	137	41	135	41	136	43	136	41	
120	134,5	39	136	41	136	41	134	41	135	42	135	41	
130	133	38	135	41	135	41	133	41	134	41	134	40	
140	132	37	134	40	134	40	132	41	133	42	133	40	
150	131	38	133	40	133	40	131	41	132	42	132	40	
160	130	36	132	40	131	39	129	40	131	42	130	39	
170	128,5	38	130	40	131	39	128	40	129	41	129	39	
180	127,5	37	129	38	130	39	127	40	128	41	128	39	
190	126	36	128	39	129	39	126	40	127	41	127	39	
200	125	36	127	38	127	39	125	39	126	38	126	38	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,375	Datos de composición No. 4										
1-xAB	0,625											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	22	22		22		20,82		20,82				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
210	124	36	126	38	126	39	123	38	125	39	125	38
220	123	36	125	38	125	39	122	39	124	40	124	38
230	122	35	124	39	124	39	121	39	123	40	123	38
240	121	36	123	39	123	37	120	39	121	38	122	38
250	120	36	122	38	122	38	119	38	121	38	121	38
260	119	35	121	39	121	38	118	37	120	39	120	38
270	118	35	120	39	120	37	117	37	118	39	119	37
280	117	35	119	38	119	37	116	37	118	38	118	37
290	116	34	118	38	118	37	115	37	116	39	117	37
300	115	34	118	37	117	37	114	37	115	39	116	37
310	114	34	117	38	116	36	113	36	114	39	115	37
320	113	33	116	38	115	36	112	36	113	37	114	36
330	112	33	115	37	114	36	111	36	113	38	113	36
340	111	33	114	37	113	36	110	36	112	37	112	36
350	110	33	113	37	112	36	108	35	111	37	111	35
360	109	33	112	37	111	36	107	35	110	36	110	35
370	108,5	33	112	37	110	36	106	35	109	36	109	35
380	107,4	33	111	36	109	35	105	35	108	36	108	35
390	106,5	32	110	36	108	35	104	34	107	36	107	35
400	105,5	32	109	36	108	35	103	34	106	36	106	35
410	104,5	32	108	36	107	35	102	35	105	36	105	35

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,375	Datos de composición No. 4											
1-xAB	0,625												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	22	22		22		20,82		20,82					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
420	104	32	108	36	106	36	101	34	104	36	104	35	
430	103	31	107	36	105	36	100	35	103	35	104	34	
440	102	32	106	35	104	34	99	34	103	35	103	34	
450	101	32	105	35	104	34	98	34	102	35	102	34	
460	100	31	104	35	103	34	97	34	101	35	101	34	
470	99	30	104	34	102	34	96	34	100	34	100	33	
480	98,5	31	103	34	101	34	95	34	99	34	99	33	
490	97,5	31	102	35	101	34	95	32	98	34	99	33	
500	96,5	30	101	34	100	33	94	34	98	35	98	33	
510	95,5	31	101	35	99	33	93	33	97	34	97	33	
520	95	30	100	35	98	33	92	33	96	34	96	33	
530	94	30	99	34	97	33	91	33	95	34	95	33	
540	93	30	99	34	97	33	91	33	94	33	95	33	
550	92	30	98	34	96	34	90	33	94	33	94	33	
560	94,5	30	97	33	95	33	89	33	93	33	94	33	
570	91	29	96	33	95	33	88	34	92	34	92	33	
580	90	30	96	34	94	33	88	33	91	33	92	32	
590	89	30	95	32	93	33	87	34	90	33	91	32	
600	88,5	29	94	33	92	32	86	33	89	33	90	32	
610	88	29	94	31	91	31	85	33	88	33	89	31	
620	87	29	93	32	90	31	85	33	87	33	88	32	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,375	Datos de composición No. 4										
1-xAB	0,625											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	22	22		22		20,82		20,82				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
630	86,5	29	92	32	89	31	84	33	87	33	88	32
640	85,5	29	92	32	88	32	83	32	86	33	87	31
650	85	28	91	33	87	32	82	32	85	33	86	31
660	84	29	90	33	87	32	82	32	84	32	85	32
670	83,5	29	89	32	86	32	81	32	83	32	85	31
680	83	29	88	32	85	32	80	32	83	32	84	31
690	82	28	87	32	85	32	79	32	82	32	83	31
700	81,5	29	87	32	84	31	79	32	82	32	82	31
710	81	29	86	32	83	32	78	31	81	32	82	31
720	80	28	86	32	83	32	77	32	80	31	81	31
730	79,5	28	85	32	82	32	77	32	79	32	80	31
740	79	28	84	32	81	31	76	32	79	32	80	31
750	78,5	28	83	32	81	31	76	31	78	31	79	30
760	78	28	83	31	80	31	75	31	78	31	79	30
770	77	28	82	31	79	31	74	31	77	31	78	30
780	77	28	82	31	79	31	74	31	76	31	77	30
790	76	28	80	31	78	31	73	31	76	31	77	30
800	75,5	28	80	31	78	31	73	31	75	31	76	30
810	75	28	80	31	77	31	72	31	75	31	76	30
820	74,5	27	79	31	77	30	71	31	74	31	75	30
830	74	27	79	31	76	30	71	31	74	31	75	30

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,375	Datos de composición No. 4											
1-xAB	0,625												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	22	22		22		20,82		20,82					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
840	73,5	27	78	31	75	30	70	31	73	30	74	30	
850	73	27	77	31	75	31	70	31	72	30	73	30	
860	72,5	27	77	30	74	30	69	30	72	31	73	30	
870	72	27	76	30	74	30	69	30	71	30	72	30	
880	71,5	27	76	31	73	30	68	30	71	30	72	29	
890	71	27	75	31	73	30			70	30	72	29	
900	70,5	27	74	30	72	30			70	30	72	29	
910	70	27	74	30	72	30			69	29	71	29	
920	69,5	27	74	30	71	30			69	30	71	29	
930	69	27	73	29	71	29			68	30	70	29	
940	68,5	26	73	29	70	29					70	28	
950	68	27	72	29	70	30					70	28	
960			72	29	69	30					70	29	
970			71	29	69	29					70	29	
980			70	29	69	29					69	29	
990			70	29	68	29					69	29	
1000			69	29							69	29	
1010			69	29							69	29	
1020			68	29							68	29	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,5	Datos de composición No. 5											
1-xAB	0,5												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	20,3	20,3		20,9		20,9		20,9					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
0	150	53,5	150	43,6	150	43,8	150	38	150	42,2	150	44,2	
10	149	52,7	148	42,3	149	42,2	148	40,4	149	41,2	149	43,8	
20	147	52	147	41,7	148	42,2	146	39	147	40,3	147	43	
30	146	51,3	146	41	146	39,4	145	39,3	146	40,8	146	42,4	
40	145	50,9	145	41,9	145	42	144	38,8	145	40,8	145	42,9	
50	144	50,6	144	41,2	143	39,8	143	38,2	143	39,6	143	41,9	
60	142	50	142	40,5	142	40,3	142	39	142	40,8	142	42,1	
70	141	49,3	141	40,3	141	38,2	141	38	141	40	141	41,2	
80	140	49,3	140	39,5	140	38,3	140	37,5	140	39,1	140	40,7	
90	138	48,8	138	39,8	139	38,4	139	37,8	139	38,6	138	40,7	
100	137	47,6	137	39,2	138	38,4	137	38,2	137	39,1	137	40,5	
110	135	47,1	136	37,4	137	37,2	136	37,2	136	39,1	136	39,6	
120	134	47,2	136	38,7	136	36,8	136	38,2	135	39	135	40	
130	133	46,1	134	38,6	134	36,6	134	35,5	134	38,6	134	39,1	
140	132	46	132	37,7	133	36,3	133	38	133	37,3	133	39,1	
150	131	46	131	37,3	132	36,2	131	36,6	132	37,6	131	38,7	
160	130	45,3	130	36,9	131	36,3	130	36,2	131	36,8	130	38,3	
170	129	44,9	129	37,6	130	36,6	129	34,8	129	37,7	129	38,3	
180	127	44,1	128	36,2	129	35,7	128	35,7	128	36,9	128	37,7	
190	126	44	127	35,3	128	35,2	127	33,9	127	38,4	127	37,4	
200	125	42,8	126	35,3	127	34,7	126	35,3	126	36,2	126	36,9	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,5	Datos de composición No. 5											
1-xAB	0,5												
Repetición	1		2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	20,3		20,3		20,9		20,9		20,9				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
210	124	43,6	125	34,8	126	34,7	125	34,6	125	36	125	36,7	
220	123	42,7	124	35,7	125	34,7	123	33,9	124	36,2	124	36,6	
230	122	42,4	123	35,5	124	34,4	123	33,7	123	36,6	123	36,5	
240	121	42,2	122	34,8	123	34	121	34,2	122	36	122	36,2	
250	120	41,8	121	35,9	122	34,5	120	33,5	121	35,6	121	36,3	
260	119	41,4	120	34,5	121	34,3	119	33,2	120	35,8	120	35,8	
270	118	41,2	119	34,5	120	34	118	33,2	119	35,1	119	35,6	
280	117	41	118	34,7	119	33	117	32,6	118	33,3	118	34,9	
290	116	40,9	117	34,1	117	33,2	116	33,1	117	34,1	117	35,1	
300	115	40,9	116	34,1	116	33,7	115	32,8	116	35,3	116	35,4	
310	114	40,4	115	33,9	115	33,4	114	31,5	115	34,2	115	34,7	
320	114	40,1	113	33,9	115	33,4	113	32,1	114	33,4	114	34,6	
330	112	38,3	113	33,9	114	33,2	112	31,3	113	33,9	113	34,1	
340	111	39,7	111	33,6	112	33	111	31,3	112	34	111	34,3	
350	110	39,2	110	33,6	112	31,7	111	32	111	33,6	111	34	
360	109	39,1	109	33,3	111	33	110	31,7	110	33	110	34	
370	108	39,1	108	32,7	110	31,6	109	31,3	110	33	109	33,5	
380	108	38,4	107	32,2	109	31,6	108	31,5	109	34,8	108	33,7	
390	105	37,7	106	32,3	108	31,7	107	31,8	108	32,9	107	33,3	
400	105	37,6	105	31,9	107	31,7	106	32,7	107	33,6	106	33,5	
410	104	37,4	104	32	106	31,7	105	30,7	106	33,2	105	33	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,5	Datos de composición No. 5											
1-xAB	0,5												
Repetición	1		2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	20,3		20,3		20,9		20,9		20,9				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
420	103	37,4	103	31,7	105	31,9	104	30,7	105	34	104	33,1	
430	102	36,8	102	32,1	104	31,7	103	31	105	32,1	103	32,7	
440	101	36,8	101	31,3	103	31,2	102	30,5	104	32,8	102	32,5	
450	100	36,4	100	31,7	102	30,7	102	29,7	103	31,5	101	32	
460	99	36,1	99,5	31,2	101	31,3	101	30	102	32	101	32,1	
470	98	36,1	98	30,7	100	29,7	100	29,5	101	31,9	99,4	31,6	
480	97	35,8	97	31	99	30,4	99	29,2	100	30,5	98,4	31,4	
490	96	35,8	96,5	29,8	98	30	98	30,2	99	30,9	97,5	31,3	
500	95,5	35,4	96	30,8	97	29,6	97	29,5	98	30,5	96,7	31,2	
510	95	35	95	29,9	96	29,7	96	29,5	97,5	31,6	95,9	31,1	
520	94	34,7	94	29,6	95,5	29	95	29,5	96,5	30,7	95	30,7	
530	93,5	34,3	93	29,8	94,5	29,4	94	28,3	96	30,3	94,2	30,4	
540	92,5	34,2	92,5	29,9	94	28,6	93	28	95	29,3	93,4	30	
550	92	34,2	91,5	30	93	29	92	28,8	94	30	92,5	30,4	
560	91	33,8	91	29,6	92	30	91	28,6	93	29,7	91,6	30,3	
570	90	33,8	90	29,6	91,5	28,4	90,5	29	92,5	29,4	90,9	30	
580	89,5	33,8	89	29,1	90,5	28,7	90	29	91,5	28,8	90,1	29,9	
590	89	33,2	88	28,8	90	29	89	29	91	29,5	89,4	29,9	
600	88	33	87,5	29,2	89	28,5	88	28	90	28,9	88,5	29,5	
610	87,5	32,6	87	28,7	88,5	28,4	87	28	89	28,2	87,8	29,2	
620	87	32,5	86	28,9	87,5	28,5	86,5	27,8	88,5	28,5	87,1	29,2	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,5	Datos de composición No. 5										
1-xAB	0,5											
Repetición	1		2		3		4		5		Promedio	
T amb (°C)	20,3		20,3		20,9		20,9		20,9			
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
630	86	32,6	85,5	28,7	87	28,4	85,5	27,4	88	28,3	86,4	29,1
640	85	32,6	85	28,5	86,5	27,8	85	27,9	87	27,9	85,7	28,9
650	84	32,2	84	28,5	86	28	84	28	86	27,6	84,8	28,9
660	84	32,2	83	28,7	85	27,8	83	26,8	85,5	27,6	84,1	28,6
670	83	31,8	82,5	28,2	84,5	28	82,5	27,9	85	28,5	83,5	28,9
680	82,5	31,5	82	28,3	84	27,1	82	27,6	84	28	82,9	28,5
690	82	31,4	81	28	83	27	81	26,4	83,5	28,7	82,1	28,3
700	81,5	31,5	80,5	28	82,5	26,5	80,5	26,3	83	27,5	81,6	28
710	80,5	31,5	80	28	82	26,9	80	26,4	82	28,5	80,9	28,3
720	80	31,5	79	28	81	26,2	79	26	81,5	27,7	80,1	27,9
730	79	31	78,5	28	80,5	26,9	78,5	26,5	81	26,8	79,5	27,8
740	78,5	31,1	78	28	80	26,3	78	26,2	80	27,3	78,9	27,8
750	78	30,9	77	27,8	79	26,6	77	25,2	79,5	26,6	78,1	27,4
760	77	30,7	76,5	27,8	79	26,2	76,5	26	79	27,3	77,6	27,6
770	76,5	30,7	76	27	78	26,2	76	25,6	78,5	27,9	77	27,5
780	76	30,3	75,5	27	77,5	26,7	75,5	26	78	26,9	76,5	27,4
790	75,5	30	75	26,8	77	25,9	75	26	77	26,6	75,9	27,1
800	75	30	74	26,7	76	26	74	25,8	77	27,1	75,2	27,1
810	74,5	30,1	73,5	26,7	76	26,8	73,5	26,2	76	26,6	74,7	27,3
820	74	30	73	27,1	75	26	73	25,6	76	27,6	74,2	27,3
830	73,5	30	72,5	27,1	75	25,9	72,5	25,6	75	26,7	73,7	27,1

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,5	Datos de composición No. 5											
1-xAB	0,5												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	20,3	20,3		20,9		20,9		20,9					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
840	72,5	29,7	72	26,3	74	25	72	25,2	75	27	73,1	26,6	
850	72	29,9	71	26,3	73,5	25,3	71,5	25,3	74	26,9	72,4	26,7	
860	71	29,6	70,5	26,3	73	25,6	71	25,8	74	27,3	71,9	26,9	
870	70,5	29,5	70	26,7	72,5	25,3	70,5	25,5	73,5	26,8	71,4	26,8	
880	70	29,2	69,5	26,3	72	24,8	70	25,3	73	26,1	70,9	26,3	
890	69,5	29,3	69	26,4	71	24,8	69,5	24,5	72,5	26,6	70,3	26,3	
900	69	29,3	68	26,3	71	24,6	69	25	72	26,6	69,8	26,4	
910	68,5	29,3			70,5	24,7	68,5	24,9	71,5	26,6	69,8	26,4	
920	68	29			70	24,8	68	24,6	71	25,6	69,3	26	
930					69,5	25,4			70,5	26	70	25,7	
940					69	25			70	26,4	69,5	25,7	
950					68,5	24,7			70	27,1	69,3	25,9	
960					68	24,7			69	25,8	68,5	25,3	
970									69	25,3	69	25,3	
980									68,5	26,6	68,5	26,6	
990									68	25,4	68	25,4	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,625	Datos de composición No. 6										
1-xAB	0,375											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,7	17,1		17,1		17,1		24,4				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
0	150	41	150	44	150	42	150	41	150	47	150	43
10	149	43	148	42	149	43	149	42	150	47	149	43
20	147,5	42	147	42	148	42	148	40	149	48	148	43
30	146	42	147	43	147	42	147	41	148	48	147	43
40	145	41	146	43	146	41	145	40	147	48	146	43
50	144	40	144	42	145	40	144	40	146	46	145	42
60	142	41	143	41	143	40	143	39	145	46	143	41
70	141	41	142	41	142	39	142	39	144	47	142	41
80	140	41	140	39	141	38	140	39	143	46	141	41
90	139	40	139	40	139	38	139	38	142	45	140	40
100	138	39	138	39	138	38	137	38	141	45	138	40
110	137	39	137	39	137	38	136	38	140	45	137	40
120	135	37	135	38	135	37	135	37	139	44	136	39
130	134	37	134	38	134	36	134	37	138	45	135	39
140	132,5	36	133	38	133	36	132	35	137	45	133	38
150	131	36	132	38	131	36	131	37	136	44	132	38
160	130	38	130	36	130	36	130	36	135	44	131	38
170	129	36	129	36	129	35	128	35	134	44	130	37
180	128	36	128	35	128	35	127	36	133	43	129	37
190	126,5	36	127	35	127	34	126	35	131	42	127	36
200	125,5	36	126	35	125	34	125	35	130	43	126	37

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,625	Datos de composición No. 6											
1-xAB	0,375												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	21,7	17,1		17,1		17,1		24,4					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
210	124,5	35	125	35	124	34	123	33	130	42	125	36	
220	123	35	123	34	123	33	122	33	129	42	124	35	
230	122	34	122	34	122	35	121	34	127	43	123	36	
240	121	34	121	34	121	34	120	34	127	43	122	35	
250	120	34	120	33	119	32	119	32	126	41	121	34	
260	119	33	119	34	118	32	117	33	124	40	119	34	
270	118	32	118	32	117	33	116	32	123	41	118	34	
280	117	33	117	32	116	32	115	32	123	41	117	34	
290	116	33	116	33	115	31	114	31	122	40	116	33	
300	115	32	114	32	114	31	113	31	121	39	115	33	
310	114	32	114	31	113	31	111	32	120	41	114	33	
320	113	32	112	31	112	30	110	31	119	39	113	33	
330	112	31	111	31	110	30	109	31	118	39	112	32	
340	111	31	110	24	109	29	107	31	117	39	111	31	
350	110	31	109	31	108	29	107	31	116	39	110	32	
360	109	31	108	30	107	29	105	30	115	39	109	32	
370	108	31	107	30	106	28	104	30	114	39	108	32	
380	107	31	106	29	105	28	104	30	113	38	107	31	
390	106,5	31	105	29	104	28	101	30	113	38	106	31	
400	106	31	104	28	103	28	100	28	112	38	105	31	
410	105	30	103	28	102	27	99	28	111	38	104	30	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,625	Datos de composición No. 6										
1-xAB	0,375											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,7	17,1		17,1		17,1		24,4				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
420	104	30	102	29	101	27	98	28	110	38	103	30
430	103	30	101	28	100	26	97	28	109	38	102	30
440	102	30	100	27	99	28	96	28	109	38	101	30
450	101	30	99	26	98	26	95	29	108	38	100	30
460	100	30	98	27	97	26	94	28	107	37	99	29
470	99,5	29	97	26	96	26	93	27	106	38	98	29
480	98,5	29	97	27	95	26	92	28	105	37	97	29
490	97,5	29	96	26	94	26	91	27	104	36	96	29
500	97	29	95	25	93	26	90	26	104	36	96	28
510	96		94	25	92	25	89	27	103	37	95	28
520	95	29	93	25	91	26	89	27	102	36	94	29
530	94	29	92	26	90	25	88	26	101	36	93	28
540	93,5	28	91	25	89	25	87	27	101	36	92	28
550	92,5	28	91	24	89	25	86	26	100	36	92	28
560	92	28	90	24	88	25	86	26	99	35	91	28
570	91	27	89	25	87	25	85	26	98	35	90	28
580	90,5	27	88	25	86	25	84	26	98	36	89	28
590	89,55	27	87	24	85	24	83	26	97	35	88	27
600	89	27	86	24	84	24	82	25	96	35	87	27
610	88	27	86	24	84	24	82	25	96	35	87	27
620	87	26	85	24	83	25	81	27	95	35	86	27

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,625	Datos de composición No. 6										
1-xAB	0,375											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,7	17,1		17,1		17,1		24,4				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
630	86,5	27	84	23	82	24	80	24	94	35	85	27
640	86	27	83	23	81	24	80	24	94	35	85	27
650	85	27	83	23	81	23	79	25	93	35	84	27
660	84,5	26	82	24	80	24	78	24	92	34	83	27
670	84	26	81	23	79	24	78	24	91	34	83	26
680	83	26	80	23	79	23	77	24	91	34	82	26
690	82,5	25	80	23	78	23	76	24	90	34	81	26
700	82	26	79	23	78	24	76	24	89	34	81	26
710	81	25	78	22	77	24	75	24	89	34	80	26
720	80,5	25	78	22	77	23	74	23	88	34	79	25
730	80	25	77	22	76	23	74	24	87	34	79	26
740	79,5	25	77	22	76	23	73	24	87	34	78	26
750	79	25	76	22	75	22	73	23	86	33	78	25
760	78	25	76	22	74	23	72	23	85	33	77	25
770	77,5	25	75	22	74	22	72	23	85	33	76	25
780	77	25	75	22	73	22	71	23	84	32	76	25
790	76,5	24	74	22	73	23	71	23	83	33	75	25
800	76	24	74	22	72	23	70	23	83	33	75	25
810	75,5	24	73	21	71	23	70	22	82	33	74	25
820	75	24	73	22	71	22	69	23	82	33	74	25
830	74,5	24	72	22	71	22	69	23	81	32	73	25

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,625	Datos de composición No. 6										
1-xAB	0,375											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,7	17,1		17,1		17,1		24,4				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
840	74	24	72	21	70	22	68	22	81	32	73	24
850	73,5	24	71	21	70	22			80	32	74	25
860	73	24	71	21	69	22			79	32	73	25
870	72,5	24	71	21	69	22			79	32	73	25
880	72	24	70	21	68	23			79	32	72	25
890	71	24	70	20					78	32	73	25
900	71	24	69	21					78	32	73	25
910	70,5	23	69	21					77	32	72	25
920	70	24	68	20					77	32	72	25
930	69,5	24							76	32	73	28
940	69	24							76	32	72	28
950	69	24							75	32	72	28
960	68,5	23							75	32	72	27
970	68	23							74	31	71	27
980									74	31	74	31
990									74	31	74	31
1000									73	31	73	31
1010									73	31	73	31
1020									73	32	73	32
1030									72	32	72	32
1040									72	32	72	32

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,625	Datos de composición No. 6										
1-xAB	0,375											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,7	17,1		17,1		17,1		24,4				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
1050									72	31	72	31
1060									71	31	71	31
1070									71	31	71	31
1080									71	31	71	31
1090									70	31	70	31
1100									70	31	70	31
1110									70	31	70	31
1120									69	31	69	31
1130									69	31	69	31
1140									69	31	69	31
1150									68	31	68	31

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,75	Datos de composición No. 7										
1-xAB	0,25											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	20,3	21,1		21,1		20,9		20,9				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
0	150	40,8	150	41,6	150	39	150	44,1	150	42,3	150	41,56
10	148	40,4	149	41,6	149	37,4	149	44,1	148,5	39,6	148,7	40,62
20	146	40,6	148	41,6	148	36,6	147	41,5	147	41,5	147,2	40,36
30	145	39,8	147	41,6	146,5	36,2	146	42,4	146	40,4	146,1	40,08
40	144	39,8	146	38,8	145	36	145	42,8	145	39,4	145	39,36
50	142	38,9	145	38,7	144,5	35,8	143,5	43,6	144	39,6	143,8	39,32
60	141	38,2	143,5	37,9	143	36,8	142	40,6	143	41,3	142,5	38,96
70	140	38,8	142	37,6	142	35,5	141	39,6	141	39,2	141,2	38,14
80	139	38	141	37,7	140,5	34,5	140	41,2	140	39,6	140,1	38,2
90	138	37,7	140	36,8	140	36,6	138,5	40,8	139	38,8	139,1	38,14
100	136	37,5	138	35,6	138,5	34,9	137	40,2	138	39	137,5	37,44
110	135	37,7	136	36,8	137	34,8	136	40,2	136,5	38,2	136,1	37,54
120	133	37,4	135	36,7	136	34,5	134,5	40,2	135	39,2	134,7	37,6
130	132	37,9	133	35,5	135	32,9	133	39,2	134	40	133,4	37,1
140	131	36,7	132	34,5	133,5	35,3	132	37,7	133	39,4	132,3	36,72
150	130	36,8	130,5	34,9	132,5	33,1	131	38,4	132	39,4	131,2	36,52
160	128,5	36,6	129	34,8	131,5	33,4	130	38,6	130,5	38,1	129,9	36,3
170	127	36,3	127	34,2	130,5	32,7	129	38,2	129	37,9	128,5	35,86
180	126	35	125	32,8	129,5	31,5	127	37,5	128	37,8	127,1	34,92
190	125	36	124	33,8	128	31	126	37,3	127	38,8	126	35,38

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,75	Datos de composición No. 7											
1-xAB	0,25												
Repetición	1		2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	20,3		21,1		21,1		20,9		20,9				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
200	124	36	122	33,5	127	31,1	125	37,9	126	37,6	124,8	35,22	
210	123	35	121	33,5	126	32,1	124	36,8	125	36,2	123,8	34,72	
220	121	37,4	119,5	33	125	31,3	123	36,7	124	39,2	122,5	35,52	
230	120	34,8	118	33	123,5	31	121	35,5	123	36,5	121,1	34,16	
240	119	34,1	117	31,9	122,5	30,3	119,5	36,7	122	35,6	120	33,72	
250	117	32,7	116	31,9	121	30,7	118	35,7	121	35,2	118,6	33,24	
260	116	32,9	115	30,5	120	31	116	36,1	120	35,2	117,4	33,14	
270	115	32,2	114	31,1	119,5	29,2	114,5	35,9	119	36	116,4	32,88	
280	113,5	31,9	113	31,1	118,5	29,7	113	35,5	117,5	36,2	115,1	32,88	
290	112	32	112	31,2	117,5	29,7	112	36,4	116	34,5	113,9	32,76	
300	110,5	32,5	111	31,2	116	28,7	111	35,8	115,5	34,5	112,8	32,54	
310	109,5	31,5	110	31,2	115	29,7	109	36,5	114	35,5	111,5	32,88	
320	109	31,5	109	30,7	114	29,2	108	36,5	113	34,7	110,6	32,52	
330	108	31,7	108	30,6	113	29,3	106,5	36,5	112	33,5	109,5	32,32	
340	106,5	31,7	107	30,5	112	28,7	106	33,9	111	33,5	108,5	31,66	
350	105	30,9	105,5	29,7	111	29,4	104,5	34,8	110	33,5	107,2	31,66	
360	104	31,2	105	29,8	110	28,9	103	34,8	109	33,4	106,2	31,62	
370	103	30,9	104	29,5	109	28,9	102	34,8	108	33,4	105,2	31,5	
380	102	31,1	103	29,7	108	27,8	101	34,8	107,5	33,2	104,3	31,32	
390	101	31,1	102	28,6	107	27,6	100	34,5	106	33,7	103,2	31,1	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,75	Datos de composición No. 7										
1-xAB	0,25											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	20,3	21,1		21,1		20,9		20,9				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
400	100	30,6	102	29	105,5	28,1	99,5	33,5	105	33,7	102,4	30,98
410	99	30,6	101	29	104,5	26,7	98	34	104,5	33,2	101,4	30,7
420	98	30,6	100	28,1	103	27,5	97,5	33,6	103,5	32,4	100,4	30,44
430	97	30,6	99,5	28,8	102,5	27,1	97	35	103	32,2	99,8	30,74
440	96	30,6	98	28	101,5	27,5	96	32,9	102	32,2	98,7	30,24
450	95	29,4	98	27,8	100,5	27	95	31,9	101	31,4	97,9	29,5
460	94	29,4	97	27,3	100	27,3	94,5	31,7	100	31,2	97,1	29,38
470	93,5	29,2	96,5	27,9	98,5	27,3	94	32	99,5	31,8	96,4	29,64
480	92,5	29,4	96	28,1	98	27,3	93,5	32	98,5	31,8	95,7	29,72
490	92	29,5	95	27,5	97,5	26,4	93	33,2	97,5	31,3	95	29,58
500	91	28,2	94,5	27,7	97	26,5	92	32,2	97	30	94,3	28,92
510	90	28,2	94	27,6	96	26,5	92	33,4	96	30,7	93,6	29,28
520	89,5	28	93	27,4	95,5	26,4	91	33,4	95,5	30,5	92,9	29,14
530	89	28	92,5	28,1	95	26,5	90,5	31,2	95	30	92,4	28,76
540	88,5	27,6	92	27,8	94	26,4	90	30,9	94	30	91,7	28,54
550	88	27,6	92	26,7	93,5	26,4	89,5	32,7	93,5	30,2	91,3	28,72
560	87	27,4	91	26,7	93	26,7	89	31,2	93	29,6	90,6	28,32
570	86,5	28,3	90,5	27,3	92,5	25,2	88,5	31	92	29,2	90	28,2
580	86	28,4	90	27	92	25,9	88	32,3	91,5	29,6	89,5	28,64
590	85,5	28,5	90	26	91,5	25,6	87,5	30,6	91	29,5	89,1	28,04

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,75	Datos de composición No. 7											
1-xAB	0,25												
Repetición	1		2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	20,3		21,1		21,1		20,9		20,9				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
600	85	27,9	89,5	26,9	91	25,3	87	31,4	90,5	29,44	88,6	28,19	
610	84	27,1	89	26,9	90,5	25,3	86,5	29,9	90	29,6	88	27,76	
620	83,5	27,2	88,5	27,3	90	25,2	86	30,2	89	29,6	87,4	27,9	
630	83	26,6	88	27,3	89	25,2	85,5	29,4	88,5	29,5	86,8	27,6	
640	82,5	26,5	88	25,8	88,5	25,8	85	30	87	27,9	86,2	27,2	
650	82	27	87	26,2	88	25	84,5	30,3	87	27,6	85,7	27,22	
660	81,5	28	87	26,3	87	25	84	30,8	86,5	29,6	85,2	27,94	
670	81	27,2	86	25,7	87	25,4	83,5	31,2	86	29,6	84,7	27,82	
680	80,5	27	86	25,3	86,5	28,1	83	29,4	85,5	26,7	84,3	27,3	
690	80	27,3	85,5	25,6	85,5	28,1	82,5	29	85	27	83,7	27,4	
700	79,5	27,2	85	25,2	85	25,6	82	30,4	84,5	27,3	83,2	27,14	
710	79	26,3	84,5	25,6	85	24,4	82	30	84	27,7	82,9	26,8	
720	78,5	26,5	84	26,2	84,5	25,3	81,5	29,2	83,5	29,2	82,4	27,28	
730	78	27	83,5	25,6	84	24,1	81	29,5	83	26,4	81,9	26,52	
740	77	27	83	25,4	83,5	25,1	80,5	28,9	82,5	27	81,3	26,68	
750	76,5	26,8	83	25,7	83	25,8	80	29	82	27,1	80,9	26,88	
760	76	26,8	82	25,5	82,5	25,8	80	28,6	82	27,7	80,5	26,88	
770	75,5	26,2	81,5	24,3	82	25,3	79,5	28,8	81	28,9	79,9	26,7	
780	75	26,2	81	24,7	81,5	25,3	79	29	81	28	79,5	26,64	
790	75	26	81	24,5	81	25,3	78,5	29,6	80,5	27	79,2	26,48	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,75	Datos de composición No. 7										
1-xAB	0,25											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	20,3	21,1		21,1		20,9		20,9				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
800	74,5	27	80	25,3	80,5	25,3	78	29,3	80	27	78,6	26,78
810	74	26,7	80	25,7	80	24,3	78	28,9	79,5	27,3	78,3	26,58
820	74	26,8	79,5	24,6	79,5	24	77	28,9	79	26,8	77,8	26,22
830	73	27	79	25	79	24,6	77	28,6	78,5	28,2	77,3	26,68
840	73	26,5	78,5	24,6	78,5	24,8	77	27,8	78,5	27	77,1	26,14
850	72,5	26,3	78,5	24,5	78	24,8	76	28,2	78	27	76,6	26,16
860	72	25,9	78	24,5	78	25,1	76	28,2	77,5	27,2	76,3	26,18
870	72	26,3	77,5	24,4	77,5	24,6	75,5	27,1	77	27	75,9	25,88
880	71	26,3	77	24,3	77	24,9	75	27,1	77	26,6	75,4	25,84
890	71	26,7	77	24,3	77	24,9	75	27,9	76,5	26,4	75,3	26,04
900	70,5	25,9	76,5	24,2	76	24,9	75	28,7	76	26,5	74,8	26,04
910	70	26,6	76	24,2	76	23,8	74,5	27,4	76	26,1	74,5	25,62
920	70	26,3	76	24,6	75,5	24,4	74	27,3	75,5	26,5	74,2	25,82
930	70	26	75,5	24,2	75	24,4	74	27,5	75	26,4	73,9	25,7
940	69	26	75,5	23,7	75	24,2	73	27,3	75	26,4	73,5	25,52
950	69	26	75	24,2	74,5	24,2	73	27,6	74,5	25,8	73,2	25,56
960	68,5	26	74,5	23,8	74	24,2	73	27,6	74	26,3	72,8	25,58
970	68	25,5	74,5	23,9	74	24,2	72	27,6	74	27,4	72,5	25,72
980			74	23,9	73,5	24,2	72	27,3	73,5	27,6	73,25	25,75
990			73,5	24,3	73	24	72	26,8	73,5	27,6	73	25,68

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,75	Datos de composición No. 7											
1-xAB	0,25												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	20,3	21,1		21,1		20,9		20,9					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
1000			73	23,9	73	23,7	71	27	73	26,3	72,5	25,23	
1010			73	23,8	73	23,7	71	26,6	72,5	26,3	72,38	25,1	
1020			72,5	23,6	72,5	23	71	26,2	72	25,9	72	24,68	
1030			72	23,7	72	23,9	70,5	26,4	72	26	71,63	25	
1040			72	24	72	23,3	70	26,6	71	25,9	71,25	24,95	
1050			71,5	23,5	71,5	23,6	70	26,7	71	25,4	71	24,8	
1060			71,5	23,4	71	23,5	70	26,4	71	26,3	70,88	24,9	
1070			71	23,8	71	23,5	69,5	27,4	70,5	25,6	70,5	25,08	
1080			70,5	23,2	70,5	23	69	27	70	26	70	24,8	
1090			70,5	23,3	70	22,9	69	27,3	70	25,6	69,88	24,78	
1100			70	23,7	70	22,6	69	26,4	70	25,6	69,75	24,58	
1110			70	22,4	69,5	22,6	68,5	26,3	69	26,7	69,25	24,5	
1120			70	22,4	69,5	22,5	68	26	69	26,3	69,13	24,3	
1130			69,5	23,1	69	22,6			69	26,3	69,17	24	
1140			69	23,1	69	22,6			68,5	26,3	68,83	24	
1150			69	23,2	68,5	22,3			68	25,4	68,5	23,63	
1160			68,5	23,1	68,5	22,9					68,5	23	
1170			68	22,6	68	22,4					68	22,5	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,875	Datos de composición No. 8										
1-xAB	0,125											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	22	22		22		22		20,82				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
0	150	43,4	150	43,3	150	45,1	150	42,8	150	43,6	150	43,64
10	149	40,3	149	41,2	149	46	149	42,8	149	43,6	149	42,78
20	146	45,3	148	39,8	148	46	148	42,8	148	43,9	147,6	43,56
30	144	39,3	147	42,2	146,5	43,9	147	42,8	146,5	43,9	146,2	42,42
40	142,5	38,6	146,5	42,2	145,5	43,9	146	43	145	43,6	145,1	42,26
50	141	38,1	145,5	42,2	144,5	43	145	43	143,5	43	143,9	41,86
60	140	37,9	144	39,1	143	43,1	144	41,8	142,5	42,4	142,7	40,86
70	138,5	38,4	143	38	142	42,6	142,5	41,8	141	42,2	141,4	40,6
80	137,5	37,8	142	38,4	141	42,6	141,5	42,4	140	42,1	140,4	40,66
90	137	37,6	141	37,8	139,5	43,5	140,5	41,6	138,5	42,1	139,3	40,52
100	136,5	36,3	140	39,3	138,5	41,8	139	40,7	137,5	42,1	138,3	40,04
110	136	36,8	139	39,3	137	41,8	138	41,7	135,5	40,7	137,1	40,06
120	135	36	138	38,2	136	42,1	137	40,7	133	39,5	135,8	39,3
130	133,5	35,2	137	38,2	135	40,5	135,5	40,7	131	40	134,4	38,92
140	132	35,4	136	36	133,5	39,2	134	39,8	129	39	132,9	37,88
150	131	34,8	135,5	36,8	132,5	40,6	132,5	39,8	128	38,2	131,9	38,04
160	130	36	134,5	36,4	131	40,6	131	40	126,5	37,9	130,6	38,18
170	129	34,7	133,5	36,9	130	38,6	129,5	40	125,5	38,6	129,5	37,76
180	128	34,4	132,5	34,7	128,5	38,8	128,5	40	124	37,2	128,3	37,02
190	127,5	34,4	131,5	34,7	127,5	38,8	127,5	38,2	123	37,1	127,4	36,64

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,875	Datos de composición No. 8											
1-xAB	0,125												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	22	22		22		22		20,82					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
200	126	34,3	130,5	35,5	126	38,6	126,5	40,4	122	36,2	126,2	37	
210	125	33,6	129,5	35,5	125	38,1	125,5	38,3	121	35,5	125,2	36,2	
220	124	33,6	128	34,4	123,5	37,8	124	38	120	36,6	123,9	36,08	
230	123	32,2	127,5	34,5	122,5	38	123	36,4	118,5	34,7	122,9	35,16	
240	121,5	32,5	126	33	121	38	122	36,4	117	35,9	121,5	35,16	
250	120,5	33,2	125	33,5	120	37	120	38,4	115,5	35,5	120,2	35,52	
260	119	33,2	124	33	119	37	119	36	114	35,5	119	34,94	
270	118	32,3	123	33,1	118	37	117,5	37,3	113	34,9	117,9	34,92	
280	117	32,3	122	33,1	116,5	35,7	116	36,6	112	34,7	116,7	34,48	
290	116	31,9	120,5	31,7	116	36,4	115	36	110,5	35,2	115,6	34,24	
300	115	31,6	119,5	31,8	115	35,4	114	34,4	109,5	34,7	114,6	33,58	
310	113,5	31,6	118	31,8	114	35,5	112,5	35	108	33,2	113,2	33,42	
320	112,5	31,4	117	30,7	113	35	111	36,4	107	33,7	112,1	33,44	
330	111,5	31,1	116	31	112	35,2	110	36,4	105,5	33,5	111	33,44	
340	110	30,5	115	31	111	35,2	109	36,4	104,5	33,4	109,9	33,3	
350	109	30,8	114	31	110	35,2	108	34,8	103,5	33	108,9	32,96	
360	108,5	30,6	113	29,6	108,5	33,7	107	34,6	102	33	107,8	32,3	
370	107	30,1	112	30,9	107,5	34,2	106	34,7	101	32,3	106,7	32,44	
380	106,5	29,9	111	30	106,5	34,2	105	34,7	100	32,5	105,8	32,26	
390	105,5	30,5	110	30,1	105,5	35,2	104,5	34,7	99	32,2	104,9	32,54	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,875	Datos de composición No. 8										
1-xAB	0,125											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	22	22		22		22		20,82				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
400	104,5	29,6	109	30	104,5	35,2	103,5	34,8	98	32,4	103,9	32,4
410	104	27,9	108	30,8	103,5	35,2	103	35,2	97	32,5	103,1	32,32
420	103	29,3	107	29,3	103	34,2	102	34,2	96	32,1	102,2	31,82
430	102	29,8	106	29,8	102	33,7	101,5	34,8	95	32,3	101,3	32,08
440	101	29,1	105	29,7	101,5	32,4	100,5	34,2	94	31,5	100,4	31,38
450	100,5	30,3	104	29,7	101	32,4	100	34,4	93,5	32,2	99,8	31,8
460	99,5	28,6	103	29,7	100	32,4	99	34,4	92,5	31,6	98,8	31,34
470	99	28,4	102,5	29,7	100	32,4	98,5	34,3	92	31,5	98,4	31,26
480	98,5	29,5	101,5	29,7	99	32	98	33,8	91	31,4	97,6	31,28
490	97,5	29,5	100	29,6	98	33,3	97,5	33,4	90,5	31,8	96,7	31,52
500	97	28,8	99,5	29,6	98,5	33,3	96,5	33,4	90	31,4	96,3	31,3
510	96	28	99	29,6	98	33,3	96	33,2	89	30,9	95,6	31
520	95,5	28	98	29,6	97,5	32,9	95,5	33,2	88,5	30,9	95	30,92
530	95	28,1	97,5	28,6	97	33,1	95	34,1	88	31,4	94,5	31,06
540	94	28,1	97	28,8	96,5	32,7	94,5	33,2	87	30,9	93,8	30,74
550	93,5	27,6	96	28,2	96	32,7	94	33,2	86,5	30,5	93,2	30,44
560	93	28,2	95,5	29,2	95,5	31,9	93,5	33,1	86	30,5	92,7	30,58
570	92,5	28,2	94,5	29,3	95	31,8	93	32,6	85,5	30,5	92,1	30,48
580	92	27,4	94	29,3	94,5	31,8	92,5	33,2	85	29,7	91,6	30,28
590	91,5	27,8	93,5	28,2	94	31,8	92	33,7	84,5	29,9	91,1	30,28

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,875	Datos de composición No. 8											
1-xAB	0,125												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	22	22		22		22		20,82					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
600	91	27,8	92,5	28,2	93,5	31,8	91,5	33,7	84	29,9	90,5	30,28	
610	90	27,2	92	28,9	93	30,1	91	33,4	83,5	29,9	89,9	29,9	
620	89,5	27,5	91,5	28,9	92,5	30,1	91	33,2	83	29,1	89,5	29,76	
630	89	27	91	27,9	92,5	32,2	90	33,2	82,5	29,1	89	29,88	
640	88,5	26,3	90	28,4	91,5	32,5	90	32,7	82	29,2	88,4	29,82	
650	88	27	90	27,6	91	32,4	89,5	32,7	82	29,2	88,1	29,78	
660	87,5	26,6	89	27,3	90,5	32,2	89	33,2	81	29,2	87,4	29,7	
670	87	26,6	89	27,8	90,5	31,5	88,5	32	81	28,9	87,2	29,36	
680	86,5	28,5	88	27,2	90	31,8	88	32	80,5	28,7	86,6	29,64	
690	86	28,5	88	27,3	89,5	31,2	88	32,8	80	28,7	86,3	29,7	
700	85,5	26,8	87,5	27,3	89	31,2	87,5	33,2	80	28,5	85,9	29,4	
710	85	26,4	87	27,5	88,5	31	87	31,9	79,5	29	85,4	29,16	
720	84,5	26,5	86,5	27,5	88	31	87	32,6	79	28,6	85	29,24	
730	84	27	86	27,2	88	31	86,5	32,2	78,5	28,6	84,6	29,2	
740	83,5	26,5	85,5	27,9	87,5	31	86	33,2	78	28,6	84,1	29,44	
750	83	26,3	85,5	27,2	87	31,2	86	32,1	78	28,5	83,9	29,06	
760	82,5	26,3	85	27,5	86,5	31,2	85,5	32	77,5	28,6	83,4	29,12	
770	82	26,4	84,5	26,9	86	30,8	85	32	77	28,6	82,9	28,94	
780	81,5	25,8	84	26,9	86	31,6	85	32	77	28,6	82,7	28,98	
790	81	27	84	26,9	85,5	30,5	84,5	32	76,5	27	82,3	28,68	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,875	Datos de composición No. 8										
1-xAB	0,125											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	22	22		22		22		20,82				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
800	81	26	83	26,4	85	30,5	84	32	76	28,1	81,8	28,6
810	80,5	25,5	83	26,9	85	30,6	84	31,5	76	27,7	81,7	28,44
820	80	25,5	82,5	26,6	84,5	30,5	83,5	31,5	75,5	27,7	81,2	28,36
830	79,5	25,6	82	26,4	84	30,7	83	31,7	75	27,7	80,7	28,42
840	79	25,6	82	27,6	84	30,7	83	32,1	75	27	80,6	28,6
850	79	25,7	81,5	26,3	83,5	30,2	83	32,1	74,5	27	80,3	28,26
860	78,5	25,6	81	26,3	83	30,2	82,5	32,4	74	27,4	79,8	28,38
870	78	25,8	81	26,7	82,5	29,6	82	31,4	74	27,4	79,5	28,18
880	77,5	25,3	80,5	26,7	82,5	29,8	82	31,2	73,5	26,9	79,2	27,98
890	77	25,3	80	25,6	82	29,8	81,5	31,2	73	26,9	78,7	27,76
900	77	25,3	79,5	25,7	81,5	29,3	81	31,3	73	27	78,4	27,72
910	76,5	24,9	79,5	26,5	81	30	81	31,3	72,5	27	78,1	27,94
920	76	25	79	26,3	81	30	80,5	31,3	72	27	77,7	27,92
930	76	24,8	78,5	26,2	80,5	29,9	80	30,5	71,5	26,6	77,3	27,6
940	75,5	24,9	78	26,2	80	29,9	80	30,8	71,5	26,6	77	27,68
950	75	25	77,5	26,2	80	29,3	80	30,7	71	26,7	76,7	27,58
960	74,5	25,2	77	26,8	79,5	29,2	79	30,6	71	26,4	76,2	27,64
970	74	24,7	77	26	79	28,4	79	30,6	70,5	26,4	75,9	27,22
980	74	25,3	76,5	25,8	79	29	79	30,7	70	26,8	75,7	27,52
990	73,5	25,3	76	26,1	78,5	28,7	78,5	30	70	26,8	75,3	27,38

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,875	Datos de composición No. 8											
1-xAB	0,125												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	22	22		22		22		20,82					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
1000	73,5	24,5	76	25,7	78	28,7	78	30,5	69,5	26,4	75	27,16	
1010	73	25	75,5	25,8	78	28,3	78	30,3	69	26,1	74,7	27,1	
1020	72,5	25,1	75	25,8	77,5	28,8	77,5	31,4	69	26,2	74,3	27,46	
1030	72,5	25,2	75	25,8	77	29	77,5	30,5	68,5	26	74,1	27,3	
1040	70	25,2	74,5	25,5	77	29	77	30,3	68,5	26	73,4	27,2	
1050	71,5	25	74	25,5	76,5	29	77	30,3	68	25,7	73,4	27,1	
1060	71,5	24,3	74	25,5	76	29	76,5	30,3			74,5	27,28	
1070	71	24,5	73,5	25,3	76	29	76	30,3			74,13	27,28	
1080	71	24,8	73	25,5	75,5	29,4	76	29,8			73,88	27,38	
1090	70,5	24,5	73	25	75	29,5	75,5	29,9			73,5	27,23	
1100	70	24,4	72,5	25,2	75	29,5	75	30			73,13	27,28	
1110	70	24,3	72	25	75	28,4	75	32,5			73	27,55	
1120	69,5	34,3	72	25,4	74,5	27,9	75	30,2			72,75	29,45	
1130	69	24,3	71,5	25,4	74	28,2	75	30,1			72,38	27	
1140	69	24,4	71	25	74	28,2	74,5	30,2			72,13	26,95	
1150	68,5	24,4	71	25	73,5	29,2	74	30,2			71,75	27,2	
1160	68,5	24,2	70,5	24,7	73,5	29	74	29,9			71,63	26,95	
1170	68	24,2	70	24,6	73	29,3	74	30,5			71,25	27,15	
1180			70	24,6	72,5	29,1	73,5	30,5			72	28,07	
1190			69,5	24,6	72,5	29,1	73	30,1			71,67	27,93	

Continuación Apéndice 4.

xAB	0,875	Datos de composición No. 8										
1-xAB	0,125											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	22	22		22		22		20,82				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
1200			69	24,6	72	28,5	73	29,7			71,33	27,6
1210			69	24,6	72	28,5	73	29,7			71,33	27,6
1220			68,5	24,6	71,5	28,4	72,5	29,7			70,83	27,57
1230			68,5	24,6	71,5	28,6	72	29,7			70,67	27,63
1240			68	24,7	71	28,9	72	29,2			70,33	27,6
1250					71	28,3	72	30,2			71,5	29,25
1260					70,5	29	71,5	29,3			71	29,15
1270					70,5	28,6	71	29,3			70,75	28,95
1280					70	28,6	71	29,5			70,5	29,05
1290					70	28,5	70,5	29			70,25	28,75
1300					69,5	28,5	70,5	29			70	28,75
1310					69	28,5	70	29,4			69,5	28,95
1320					69	28,5	70	29,2			69,5	28,85
1330					68,5	28,5	70	29,1			69,25	28,8
1340					68,5	29,3	69,5	29,6			69	29,45
1350					68	29	69	28,8			68,5	28,9
1360							69	29,7			69	29,7
1370							68,5	29,3			68,5	29,3
1380							68	28,5			68	28,5

Continuación Apéndice 4.

xAB	1	Datos de composición No. 9											
1-xAB	0												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	21,7	15,8		15,8		24,4		24,4					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
0	150	44,8	150	35,6	150	35,8	150	45,1	150	45,8	150	41,42	
10	148	44,6	149	34,7	149	34,2	148,5	44,5	149	45,2	148,7	40,64	
20	147	44	147,5	34,4	148	36,1	147	42,6	148	45,6	147,5	40,54	
30	146	44,7	146	35	147	35,7	146	43,3	147	44	146,4	40,54	
40	145	44,7	145	33	146	34,5	145	43,3	146,5	44,5	145,5	40	
50	144	43	144	32	145	34,1	144	42,4	145,5	43,8	144,5	39,06	
60	143,5	42,9	142,5	32	143,5	33,3	143,5	41,9	145	43,3	143,6	38,68	
70	142,5	42,6	141,5	33,1	142	33,8	142	42,4	143,5	43,4	142,3	39,06	
80	141,5	42,8	140	31,6	141	31,7	141	41,1	143	43,4	141,3	38,12	
90	140,5	40,6	139	31,9	140	32,3	140	41,1	142	43,2	140,3	37,82	
100	140	41,8	138	30,7	139	31,5	139	42,7	141	42,3	139,4	37,8	
110	139	41,1	136,5	31,3	137	31,5	138	42,7	140	42,6	138,1	37,84	
120	138	41	135,5	31,5	136	30,8	137	40,6	139	41,1	137,1	37	
130	137	40,5	134	30,5	135,5	31,3	135,5	40,6	138	41,8	136	36,94	
140	136	40,6	133	30,1	134	31	135	39,8	137	40,7	135	36,44	
150	135	39,6	132	29,6	133	30	133,5	40,6	136	41,2	133,9	36,2	
160	134	39,6	131	29,8	132	31,6	132,5	39,5	135	40,2	132,9	36,14	
170	132,5	39	130	39	131	30,4	131,5	38,8	134	40,3	131,8	37,5	
180	131,5	39,2	129	29,2	130	29,6	130,5	38,8	133	40,7	130,8	35,5	
190	130,5	39,4	128	28,9	128,5	29	130	39,2	132	41,2	129,8	35,54	

Continuación Apéndice 4.

xAB	1	Datos de composición No. 9										
1-xAB	0											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,7	15,8		15,8		24,4		24,4				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
200	129	39,6	126	28,4	127,5	29,7	128,5	39,4	131	39,3	128,4	35,28
210	127,5	39,6	125,5	28,7	126,5	29,8	127,5	39	130,5	39,4	127,5	35,3
220	126	36,8	125	27,8	125	28,5	127	39,2	129	39,8	126,4	34,42
230	125	37,8	123,5	27,5	124	27,7	125,5	37,6	128,5	39,4	125,3	34
240	124,5	37,9	122,5	27,3	123	27,6	125	37,6	127,5	39,4	124,5	33,96
250	123,5	38,5	121	27,3	122	27,9	123,5	37,8	126,5	39,7	123,3	34,24
260	122	37,4	120,5	26,1	121	27	123	38	126	39,2	122,5	33,54
270	121	37,2	119	26,7	120	26,8	122	37,2	125	39,2	121,4	33,42
280	120,5	36,6	118	26,3	119	26,1	121	37,2	124	39	120,5	35,04
290	119,5	36,1	117	27,1	118	26,5	120	37,4	123,5	38,4	119,6	33,1
300	118,5	36,2	116	25,8	117	27,5	119	36,8	123	38	118,7	32,86
310	117,5	36,8	115	26	116	27	118	35,4	122	38	117,7	32,64
320	116,5	36,8	114	25,6	115	27,2	117	35,4	121	38,2	116,7	32,64
330	115,5	35,4	113,5	26	114	27	116	35,4	120	37	115,8	32,16
340	114,5	35	113	25,4	113	26	115	37	119	36,9	114,9	32,06
350	113,5	35,7	112	25,3	112	24,9	114,5	36	118	36	114	31,58
360	113	36,4	111	25,1	111	26,3	113,5	36	117,5	36,5	113,2	32,06
370	111,5	34,8	110	25,3	110,5	25,6	112,5	36,6	117	36,5	112,3	31,76
380	111	34,5	109,5	25,2	110	25,4	112	36,3	116	36,1	111,7	31,5
390	110	35	109	25,3	109	25,3	111	36,3	115	36,8	110,8	31,74

Continuación Apéndice 4.

xAB	1	Datos de composición No. 9											
1-xAB	0												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	21,7	15,8		15,8		24,4		24,4					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
400	109	34,6	108,5	24,6	109	25,6	110,5	36,3	114	37,2	110,2	31,66	
410	108	33,5	108	24,5	108	25,6	109,5	36,4	113,5	36,5	109,4	31,3	
420	107,5	34,3	107,5	24,5	107,5	25,8	108,5	35,7	113	36,1	108,8	31,28	
430	107	35	107	24	107	25,3	108	35,7	112	36,3	108,2	31,26	
440	105,5	33,9	107	23,7	107	25,5	107	35,7	111	36,8	107,5	31,12	
450	105	34,7	106,5	23,7	106,5	25,2	106,5	36	110,5	35,9	107	31,1	
460	104	34,2	106,5	23,7	106	25	106	35,5	110	36,3	106,5	30,94	
470	103,5	33,6	106	23,5	105,5	24,7	105	35,5	109	35,9	105,8	30,64	
480	102,5	34,7	106	24,2	105,5	23,8	104,5	35,2	108,5	35,6	105,4	30,7	
490	102	34,7	105,5	24,2	105	24,7	104	35,2	108	36,1	104,9	30,98	
500	101,5	33,6	105	23	104,5	25	103,5	34,8	107	35,7	104,3	30,42	
510	101	34,2	105	22,9	104	24,7	103	35,3	106,5	35,4	103,9	30,5	
520	100,5	33	104	23,3	104	23,9	102	34,2	106	35,6	103,3	30	
530	100	33,3	104	23,1	103,5	23,3	101,5	34,2	105	34,7	102,8	29,72	
540	99	33,3	103,5	22,7	103	24,3	101	34,2	104,5	35,7	102,2	30,04	
550	98,5	33,2	103	23,2	102,5	23,7	100,5	34	104	34,9	101,7	29,8	
560	98	33,2	103	22,4	102	23,3	100,5	34,2	103,5	35	101,4	29,62	
570	97,5	32,9	102,5	22,1	102	23,7	100	34,5	103	35	101	29,64	
580	97	33,4	102	22	101,5	23,5	99,4	33,8	102,5	35	100,5	29,54	
590	96,5	32,4	101,5	22,2	101	24	99	34	102	35	100	29,52	

Continuación Apéndice 4.

xAB	1	Datos de composición No. 9										
1-xAB	0											
Repetición	1		2		3		4		5		Promedio	
T amb (°C)	21,7		15,8		15,8		24,4		24,4			
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
600	96	32	101	22,5	101	23,3	98,5	33,8	101	34,7	99,5	29,26
610	95,5	32	101	22,1	100,5	22,6	98	33,7	101	35,2	99,2	29,12
620	95	31,9	100,5	21,5	100	22,8	97,5	33,7	100,5	34,6	98,7	28,9
630	94,5	31,7	100	21,3	99,5	22,3	97	33,7	102	34,7	98,6	28,74
640	94	31,7	100	21	99	22,7	96,5	32,9	101,5	34,7	98,2	28,6
650	93,5	31,7	99	20,5	98,5	21,6	96	32,7	101	33,9	97,6	28,08
660	93	31,6	99	21,3	98	22	95,5	33,2	100,5	34,5	97,2	28,52
670	92,5	31,2	98,5	20,8	98	22,3	95	33,2	100	33,9	96,8	28,28
680	92	31,5	98	21,1	97,5	22,6	95	33,2	99	34,2	96,3	28,52
690	91,5	30,7	97,5	20,9	97	23,8	94,5	32,6	99	34,2	95,9	28,44
700	91	30,8	97,5	20,5	96,5	23	94	32,6	98	34,2	95,4	28,22
710	90,5	30,8	97	21	96	21	93,5	32,6	97,5	33,5	94,9	27,78
720	90	30,5	96,5	20,2	95,5	21,4	93	32,6	97	34	94,4	27,74
730	89,5	30,7	96	20,4	95	23,3	93	32	97	33,5	94,1	27,98
740	89	30,7	96	20,3	95	21,4	92,5	32	96	33,4	93,7	27,56
750	88,5	30,2	95,5	19,8	95	21,1	91,5	31,9	95,5	33,4	93,2	27,28
760	88	30,6	95	19,8	94	22,5	91	31,7	95,5	33,5	92,7	27,62
770	88	30	94,5	20,2	94	20,5	91	31,7	95	33,4	92,5	27,16
780	87	30,8	94	19,3	93,5	21	90,5	31,4	94,5	33,2	91,9	27,14
790	87	30,8	94	18,5	93	20,9	90,5	31,4	94	32,8	91,7	26,88

Continuación Apéndice 4.

xAB	1	Datos de composición No. 9											
1-xAB	0												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	21,7	15,8		15,8		24,4		24,4					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
800	87	30,2	93	19,3	93	21	90	31,7	93,5	33,2	91,3	27,08	
810	86	30,2	93	19,7	92	20,7	90	31,4	93	33,2	90,8	27,04	
820	85,5	30,1	92,5	18,9	92	20,7	89,5	31,6	93	33,1	90,5	26,88	
830	85	30,1	92	19,1	91,5	20,8	89	31,5	92,5	32,8	90	26,86	
840	85	29,7	91,5	19,1	91	20,7	88,5	31,5	92	32,8	89,6	26,76	
850	84,5	29,9	91	18,5	91	21,8	88	31,5	91,5	32,7	89,2	26,88	
860	84	29,7	91	18,7	90,5	21,6	88	31,1	91	32,5	88,9	26,72	
870	83,5	29,8	90,5	18,4	90	20,3	87,5	31,2	91	32,6	88,5	26,46	
880	83	29,2	90	18,5	89,5	20	87	31,2	90,5	33	88	26,38	
890	82,5	29,2	89,5	19,5	89	20,4	86,5	31	90	33	87,5	26,62	
900	82	29,1	89	18,3	89	20	86,5	30,8	89,5	32,7	87,2	26,18	
910	81,5	29	89	18,5	88	20,7	86	30,7	89	32,3	86,7	26,24	
920	81	28,9	88	18,1	88	20,3	86	30,6	89	32	86,4	25,98	
930	80,5	29,3	87,5	18,2	87,5	20,4	85,5	30,8	88,5	31,7	85,9	26,08	
940	80	29	87	18,5	87	20,6	85	30,7	88	31,7	85,4	26,1	
950	80	28,7	87	17,6	87	20,1	85	30,2	87,5	31,7	85,3	25,66	
960	80	28,7	86,5	18,5	86	19,4	85	30,2	87	32,2	84,9	25,8	
970	79,5	28,5	86	18,3	86	19,8	84,5	30	86,5	32	84,5	25,72	
980	79	29	85,5	18,3	85,5	20,6	84	30	86	31,9	84	25,96	
990	78	28,6	85	18,7,8	85	19,4	83,5	29,9	86	31,5	83,5	59,44	

Continuación Apéndice 4.

xAB	1	Datos de composición No. 9										
1-xAB	0											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,7	15,8		15,8		24,4		24,4				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
1000	77	28,6	85	18,3	84,5	19,4	83,5	30,3	85,5	32	83,1	25,72
1010	77	28	84	17,6	84	19,5	83	30,2	85	30,9	82,6	25,24
1020	76,5	28,2	84	18,4	84	19,5	83	30,2	84,5	30,2	82,4	25,3
1030	76	28,3	83	17,6	83,5	19	82,5	30,2	84	31,7	81,8	25,36
1040	76	28,2	83	17,7	83	19,9	82	30	84	31,7	81,6	25,5
1050	75	28,2	82,5	17,3	82,5	19,5	82	29,9	83,5	31	81,1	25,18
1060	75	27,9	82	17	82	19	81,5	29,5	83	31,2	80,7	24,92
1070	74,5	27,6	81,5	17,5	81,5	19,1	81	29,5	83	31,1	80,3	24,96
1080	74	27,6	81	17,4	81	18,7	81	29,7	82,5	31	79,9	24,88
1090	73,5	27,4	81	17	81	18,8	81	30	82	31	79,7	24,84
1100	73	27,67	80,5	17	80,5	18,3	80,5	29,4	82	31,4	79,3	24,75
1110	72,5	27,9	80	16,5	80	18,9	80	29,7	81,5	31,4	78,8	24,88
1120	72,5	27,6	79,5	16,6	79,5	19,3	80	29,6	81	31,1	78,5	24,84
1130	72	27,6	79	17	79	18,5	79,5	29,6	80,5	31	78	24,74
1140	71,5	27,3	78,5	17,2	79	18,8	79	29,1	80,5	31,3	77,7	24,74
1150	71	27,3	78	16,7	78	18,5	79	29,3	80	31	77,2	24,56
1160	71	27,2	77,5	16,9	77,5	18,9	79	29,5	80	31,5	77	24,8
1170	70,5	27,2	77,5	16,5	77	18,5	78,5	29	79,5	30,4	76,6	24,32
1180	70	27,4	77	16,8	77	18,9	78	28,9	79	31	76,2	24,6
1190	70	27	76,5	16,5	76,5	18,5	77,5	29	78,5	30,5	75,8	24,3

Continuación Apéndice 4.

xAB	1	Datos de composición No. 9											
1-xAB	0												
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio			
T amb (°C)	21,7	15,8		15,8		24,4		24,4					
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	
1200	69,5	26,7	76	16,5	76	18,3	77,5	29	78	30,3	75,4	24,16	
1210	69,5	27,1	75,5	16,1	75,5	18	77	29,2	78	31	75,1	24,28	
1220	69	27,2	75	16,3	75	18,6	76,5	28,7	77,5	31	74,6	24,36	
1230	68,5	26,6	75	16,1	74,5	18,4	76	28,7	77,5	30,6	74,3	24,08	
1240	68,5	26,5	74	16,4	74	17,6	76	28,6	77	30,6	73,9	23,94	
1250			74	16,4	73,5	18,5	75,5	28,2	76,5	30,3	74,88	23,35	
1260			73,5	16,4	73	18	75	28,6	76,5	30,3	74,5	23,33	
1270			73	15,8	72,5	17,9	75	28,5	76	30,3	74,13	23,13	
1280			72,5	15,7	72	18	74,5	28,6	76	30,5	73,75	23,2	
1290			72	16	72	18	74	28,4	75,5	30,5	73,38	23,23	
1300			72	15,4	71	17,8	74	28,6	75	30,1	73	22,98	
1310			71	15,5	71	18,2	73,5	28,5	74,5	30,2	72,5	23,1	
1320			71	15,8	70,5	17,5	73	28,4	74,5	30,6	72,25	23,08	
1330			70,5	15,6	70	17,6	72,5	28,3	74	30,2	71,75	22,93	
1340			70	15,4	69,5	17,8	72	28	73,5	30,6	71,25	22,95	
1350			69,5	15,3	69	17,8	72	28,2	73,5	29,9	71	22,8	
1360			69	15,5	68,5	17,8	71,5	28,2	73	29,8	70,5	22,83	
1370			68,5	15,3	68	17,6	71,5	27,9	73	29,7	70,25	22,63	
1380			68	15,4			71	27,6	72,5	30,2	70,5	24,4	
1390							70,5	28	72	30	71,25	29	

Continuación Apéndice 4.

xAB	1	Datos de composición No. 9										
1-xAB	0											
Repetición	1	2		3		4		5		Promedio		
T amb (°C)	21,7	15,8		15,8		24,4		24,4				
t (s)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)	T int (°C)	T ext (°C)
1400							70	27,9	72	30	71	28,95
1410							70	27,7	71,5	30	70,75	28,85
1420							69,5	27,6	71,5	30	70,5	28,8
1430							69	27,5	71	29,7	70	28,6
1440							69	27,9	71	29,5	70	28,7
1450							68,5	27,9	70,5	29,5	69,5	28,7
1460							68	27,8	70	29,5	69	28,65
1470									70	29,5	70	29,5
1480									69,5	29	69,5	29
1490									69	28,3	69	28,3
1500									69	28,3	69	28,3
1510									68,5	29	68,5	29
1520									68,5	29,6	68,5	29,6
1530									68	29,7	68	29,7

Fuente: elaboración propia.