



UNAP



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES ENTRE VARIABLES
TERMOFÍSICAS CON LA PRESIÓN Y TEMPERATURA
DEL GAS LICUADO DE PETRÓLEO
MEDIANTE REGRESIÓN MÚLTIPLE**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADO POR:

**KEY-SÚ ANTONIO COK MORI
BRAULIO ADRIÁN RUÍZ TORRES**

ASESOR:

Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc.

IQUITOS, PERÚ

2022



UNAP

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONIA PERUANA
Facultad de Ingeniería Química



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 004-CGT-FIQ-UNAP

En Iquitos, a los diez y seis días del mes de abril del dos mil veinte y dos, a horas Cuatro y quince pm, se dio inicio a la sustentación pública de la Tesis titulada: **"DETERMINACIÓN DE LAS RELACIONES ENTRE VARIABLES TERMOFÍSICAS CON LA PRESIÓN Y TEMPERATURA DEL GAS LICUADO DE PETRÓLEO MEDIANTE REGRESIÓN MÚLTIPLE"**, aprobado con Resolución Decanal N° 086-2022-FIQ-UNAP, presentado por los Bachilleres: **Key-Sú Antonio Cok Mori y Braulio Adrián Ruiz Torres**, para optar el título profesional de **Ingeniero Químico**, que otorga la Universidad de acuerdo Ley y Estatuto.

El jurado calificador y dictaminador designado mediante R. D. N° 043-2022-FIQ-UNAP está integrado por:

Ing. JUAN MANUEL ROJAS AMASIFÉN, Dr.	Presidente
Ing. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ, Mtro.	Miembro
Ing. MIGUEL ÁNGEL CORNELIO CHUJUTALLI, Mtro.	Miembro

Luego de haber escuchado con atención y formulado las preguntas necesarias, las cuales fueron respondidas: SATISFACTORIA

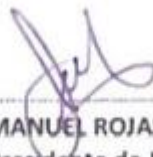
El jurado después de las deliberaciones correspondientes, llegó a las siguientes conclusiones:

La sustentación pública y la tesis ha sido: APROBADO con la calificación BUENA, estando los bachilleres aptos para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Químico**, Siendo las Cinco y Cuarenta y cinco se dio por terminado el acto de SUSTENTACION.

Ing. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ, Mtro.
Miembro

Ing. JUAN MANUEL ROJAS AMASIFÉN, Dr.
Presidente de Jurado
Ing. MIGUEL ÁNGEL CORNELIO CHUJUTALLI, Mtro.
Miembro
Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc.
Asesor

JURADO Y ASESOR



Ing. JUAN MANUEL ROJAS AMASIFÉN, Dr.
Presidente de Jurado



Ing. VÍCTOR GARCÍA PÉREZ, Mtro.
Miembro



Ing. MIGUEL ÁNGEL CORNELIO CHUJUTALLI, Mtro.
Miembro



Ing. FERNANDO JAVIER SALAS BARRERA, MSc.
Asesor

DEDICATORIA

El presente trabajo de investigación, va dedicado a todos los integrantes que conforman mi núcleo familiar, pues sin el apoyo de cada uno de ellos no lo hubiese logrado.

Key-Sú Antonio Cok Mori

El presente trabajo de investigación, lo dedico principalmente a Dios, por bendecirme la vida, guiarme a lo largo de mi existencia, ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad.

A mis padres por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí y convertirme en lo que soy. He sido el orgullo y privilegio de ser su hijo, son los mejores padres.

A mis hermanos por estar siempre presentes, acompañándome y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.

A todas las personas que me han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito, en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.

Braulio Adrián Ruíz Torres

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a mis padres Víctor Antonio y Maruja, por ser mi mayor motivación para superarme y poder llegar hasta esta etapa de mi carrera, a Dios por mantenernos siempre unidos y con salud a pesar de los tiempos difíciles en la actualidad y por último a mis abuelos, hermanos y tíos, que complementan la base de mi unión familiar y que de una u otra forma han aportado a mi realización profesional.

Key-Sú Antonio Cok Mori

Agradezco a mis padres: Walter Ruíz Llerena, Carmen Rosa Torres Mozilote y Juan Gregory Vílchez Flores, por ser los principales promotores de mis sueños, por confiar y creer en mí, por los consejos, valores y principios que me han inculcado e hicieron de mí una mejor persona.

Gracias a mis hermanos: Angela Isabel Ruíz Torres, Cristopher Gabriel Vílchez Torres y Walter Ruíz Holguin, por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento.

Gracias a mi tío Adalberto Ruíz Llerena, y a toda mi familia, porque con sus oraciones y palabras de aliento pude superar cualquier obstáculo y que de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Expreso mi reconocimiento a todos los docentes que, con su sabiduría, conocimiento y apoyo, motivaron a desarrollarme como persona y profesional en la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana.

Braulio Adrián Ruíz Torres

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
PORTADA	i
ACTA DE SUSTENTACIÓN	ii
JURADO Y ASESOR	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	4
1.1. Antecedentes	4
1.2. Bases teóricas	5
1.2.1. Ecuación de estado de Soave-Redlich-Kwong (SRK)	5
1.2.2. Análisis de regresión múltiple	8
1.3. Definición de términos básicos	8
1.3.1. Gas licuado de petróleo	8
1.3.2. Presión	9
1.3.3. Temperatura	9
1.3.4. Densidad	9
1.3.5. Calor específico	9
1.3.6. Conductividad térmica	9
1.3.7. Humedad o fracción de líquido	10
1.4. Modelado de la regresión múltiple	10
CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES	13
2.1. Formulación de la hipótesis	13
2.2. Variables y su operacionalización	13
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	15
3.1. Tipo y diseño	15
3.2. Diseño muestral	16
3.3. Procedimientos de recolección de datos	18
3.4. Procesamiento y análisis de datos	22
3.5. Aspectos éticos	22

CAPÍTULO IV: RESULTADOS	23
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	50
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	52
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	53
CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN	54
ANEXOS	56
Anexo 1. Matriz de consistencia	57
Anexo 2. Determinación del producto matricial $(X^T X)^{-1}$ para la densidad	58
Anexo 3. Determinación del producto matricial $X^T Y$ para la densidad	59
Anexo 4. Determinación de la matriz β para la densidad	60
Anexo 5. Determinación de R^2 para la ecuación de la densidad	61
Anexo 6. Determinación del producto matricial $X^T Y$ para el calor específico	62
Anexo 7. Determinación de la matriz β para el calor específico	63
Anexo 8. Determinación de R^2 para el calor específico	64
Anexo 9. Determinación del producto matricial $X^T Y$ para la conductividad térmica	65
Anexo 10. Determinación de la matriz β para la conductividad térmica	66
Anexo 11. Determinación de R^2 para la conductividad térmica	67

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de las variables	14
Tabla 2. Valores observados para la densidad	23
Tabla 3. Resultados de la matriz β para la densidad	24
Tabla 4. Valores previstos para la densidad y cálculo de R^2	26
Tabla 5. Resultados del residuo para la densidad	29
Tabla 6. Valores observados para el calor específico	32
Tabla 7. Resultados de la matriz β para el calor específico	34
Tabla 8. Valores previstos para el calor específico y cálculo de R^2	35
Tabla 9. Resultados del residuo para el calor específico	38
Tabla 10. Valores observados para la conductividad térmica	41
Tabla 11. Resultados de la matriz β para la conductividad térmica	43
Tabla 12. Valores previstos para la conductividad térmica y cálculo de R^2	43
Tabla 13. Resultados del residuo para la conductividad	47

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema del diseño de investigación	15
Figura 2. Diagrama presión volumen específico	17
Figura 3. Diagrama temperatura volumen específico	17
Figura 4. Ingreso de componentes a Aspen HYSYS V11.0	19
Figura 5. Selección de la ecuación de estado de Soave-Redlich-Kwong (SRK)	19
Figura 6. Ingreso de las condiciones de presión, temperatura y flujo	20
Figura 7. Ingreso de la composición molar	20
Figura 8. Resultado de la densidad	21
Figura 9. Resultado del calor específico	21
Figura 10. Resultado de la conductividad térmica	21

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo de tesis fue: **determinar las relaciones entre las variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica), con la presión y la temperatura del gas licuado de petróleo.** La presente investigación tiene **enfoque cuantitativo** con nivel de profundización **predictivo** y **diseño correlacional**. Se ha realizado el modelado de la regresión múltiple, lo cual ha permitido determinar las relaciones entre las variables termofísicas con la presión y temperatura. El tipo de muestreo fue el no probabilístico, realizándose para cada variable termofísica un total de 101 simulaciones; por tanto, como son tres variables termofísicas, la muestra total tuvo un tamaño de 303. Los resultados que se obtuvieron de las relaciones entre las variables termofísicas, con la presión y temperatura son: para la densidad: $\hat{\rho} = 562.33 - 1.28T + 0.04P$, $R^2 = 0.9986$; para el calor específico: $\hat{C}_e = 2.449 + 0.0088T + 0.0004P$, $R^2 = 0.9924$ y para la conductividad térmica: $\hat{k} = 0.1064 - 0.0005T$, $R^2 = 0.9999$. En las ecuaciones obtenidas para las tres variables termofísicas, el coeficiente de determinación R^2 , fue muy cercano a 1, esto indicó el alto grado de correlación que hay de las tres variables termofísicas con la presión y temperatura, mediante lo cual también se probó la hipótesis general.

Palabras claves: gas licuado de petróleo, densidad, calor específico, conductividad térmica.

ABSTRACT SUMMARY

The main objective of the present work of thesis was: **determining the relations between the variables physicalthermo (density, specific heat and thermal conductivity), with pressure and the temperature of liquefied petroleum gas.** The present investigation has **quantitative focus** with level of deepening with level of deepening **predictive and I design correlational**. The modeling of multiple regression has come true, which has allowed determining the relations between the variables termofísicas with pressure and temperature. The type of sampling was the probabilistic no, coming true for each variable termofísica a total of 101 simulations; therefore, as three variables are physicalthermo, the total sample had a size of 303. The results that they got from the relations between the variables physicalthermo, with pressure and temperature are: for density: $\hat{\rho} = 562.33 - 1.28T + 0.04P$, $R^2 = 0.9986$; for specific heat: $\hat{C}_e = 2.449 + 0.0088T + 0.0004P$, $R^2 = 0.9924$ and for thermal conductivity: $\hat{k} = 0.1064 - 0.0005T$, $R^2 = 0.9999$. In the equations obtained for the three variables physicalthermo, the coefficient of determination R^2 , it was very near 1, this indicated the tall degree of correlation that there are of the three variables physicalthermo with pressure and temperature, by means of which also he tried on his general hypothesis.

Keywords: liquefied petroleum gas, density, specific heat, thermal conductivity.

INTRODUCCIÓN

El gas licuado de petróleo (GLP) es una mezcla de dos hidrocarburos principales: el propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}) y otros en menor proporción. El GLP es obtenido en estado gaseoso en el proceso de destilación del petróleo y se convierte en líquido mediante compresión y enfriamiento para facilitar su manejo y comercialización. El gas de petróleo se licua a bajas presiones y temperaturas, dependiendo de la mezcla propano-butano. Al pasar de estado líquido a gaseoso aumenta su volumen 270 veces aproximadamente.

Para determinar la capacidad óptima de los equipos requeridos en la compresión y enfriamiento del gas de petróleo, se necesita realizar balances de materia y energía, para lo cual se requiere conocer las relaciones de las variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica) con la presión y temperatura. Por ejemplo, si deseamos almacenar el GLP a 8 bar y 15 °C, es necesario realizar balances de materia para determinar el volumen del recipiente que contendrá al GLP, para lo cual se requiere conocer la relación entre la densidad con la presión y temperatura. De la misma forma, para determinar la potencia de los compresores, es necesario realizar balances de energía, requiriéndose para esto conocer la relación entre el calor específico con la presión y temperatura. Cuando se calcule el espesor de aislamiento térmico que deben tener las tuberías que transportarán al GLP, se debe hacer un análisis de transferencia de calor, para lo cual se requiere conocer que valor tendrá la conductividad térmica a 8 bar y 15 °C.

Mediante la ecuación de estado de **Soave-Redlich-Kwong (SRK)**, se puede predecir cual será el volumen molar que tendrá una mezcla de hidrocarburos a una determinada presión y temperatura; sin embargo, esta ecuación no relaciona directamente a las variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica) con la presión y temperatura. Existen muchos trabajos sobre el GLP, pero en ninguno de ellos se determinan ecuaciones que relacionen a las variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica) con la presión y temperatura. Téngase en cuenta que estas relaciones deben ser el resultado de hacer un análisis de regresión multivariable, es decir: $\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$, donde X_1 y X_2 son las variables independientes (X_1 : temperatura, X_2 : presión) e Y es la variable dependiente (variable termofísica).

Por lo que se menciona líneas arriba, es que, en la presente investigación se plantea la siguiente interrogante general: ¿cuáles son las relaciones entre las variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica), con la presión y la temperatura del gas licuado de petróleo?

Los problemas específicos que se formulan en la presente investigación son:

Problemas específicos

- ¿Cuál es la relación entre la densidad con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo?
- ¿Cuál es la relación entre el calor específico con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo?
- ¿Cuál es la relación entre la conductividad térmica con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo?

El objetivo general y los objetivos específicos de la presente investigación, respectivamente, se mencionan a continuación:

Objetivo general

Determinar las relaciones entre las variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica), con la presión y la temperatura del gas licuado de petróleo.

Objetivos específicos

- Determinar la relación entre la densidad con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo.
- Determinar la relación entre el calor específico con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo.
- Determinar la relación entre la conductividad térmica con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo.

Es importante determinar las relaciones entre las variables termofísicas: densidad, calor específico y conductividad térmica, con la presión y la temperatura del gas licuado de petróleo, porque los resultados de esta investigación serán un aporte que generará nuevos conocimientos que faciliten el correcto diseño de los equipos industriales (tanques de almacenamiento, compresores, enfriadores, etc), que se requieren para licuar el gas de petróleo.

La población para la presente investigación, lo representan las múltiples simulaciones que se puedan realizar con la ecuación de Soave-Redlich-Kwong (SRK), de acuerdo a las condiciones de presión y temperatura, en las que el gas de petróleo se encuentre en estado líquido, es por eso que el tipo de muestreo en esta investigación es el no probabilístico. Se realiza un total de 101 simulaciones. Entonces, como son tres variables termofísicas, la muestra total tiene un tamaño de 303. El detalle de estas simulaciones, se puede verificar en la sección 3.2.

La estructura de la tesis, está formada por los siguientes capítulos:

- Capítulo I: Marco teórico
- Capítulo II: Hipótesis y variables
- Capítulo III: Metodología
- Capítulo IV: Resultados
- Capítulo V: Discusión
- Capítulo VI: Conclusiones
- Capítulo VII: Recomendaciones
- Capítulo VIII: Fuentes de información

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

- Rivera y Gómez (2015, p. i), realizaron el trabajo de tesis titulado: Implementación de mejoras en el proceso de envasado de GLP aplicando herramientas de ingeniería de métodos. Caso: Alfa Gas S.A. En este trabajo se enfocaron en la implementación de mejoras en el proceso de envasado de GLP en la empresa Alfa Gas S.A., dedicada a la comercialización del gas licuado de petróleo, el cual ofrece los servicios de envasado y distribución de gas licuado de petróleo (GLP), un producto de calidad con garantía, seguridad y peso exacto para lograr la entera satisfacción y confianza de sus clientes. Al analizar la situación problemática, determinaron que el problema de la presente investigación es que la empresa Alfa Gas S.A. no cuenta con líneas eficientes de envasado de GLP, por lo cual analizaron el área de producción en lo relacionado a mejorar las estaciones de envasado de gas licuado de petróleo de 10 kg para incrementar la productividad en la planta envasadora Alfa Gas S.A. La implementación de este trabajo trajo una reducción significativa en el tiempo total realizado en los procedimientos de acareo de materiales y suministros, con un total de 5750 minutos por proceso de producción.
- Mariño, Labrada y Sánchez (2016, pp. 354-370), realizaron la investigación titulada: Simulación de la unidad de estabilización de la refinería “Hermanos Díaz” empleando el simulador Aspen HYSYS 8.0. En este trabajo se estudió la producción de Gas Licuado de Petróleo que se obtiene en la Unidad de Estabilización de la refinería “Hermanos Díaz”. La implementación de este proceso se realizó con el objetivo de desarrollar una simulación que permitiera elevar la eficiencia de esta planta, para eso se evaluaron diferentes alternativas empleando la herramienta del simulador Databook, como fueron: el análisis de la temperatura y la presión y su influencia en los flujos de los compuestos de interés en los separadores; el número de platos y plato de alimentación en la columna de destilación y su influencia sobre la energía del condensador y el rehervidor. Como resultados obtuvieron, que al trabajar a 44 °C y 160 kPa en el separador D-120 y a 34.5 °C y 738.8 kPa en el separador D-109, asegura un buen rendimiento del

proceso. Además, comprobaron que, con 50 platos y un alimentador por el plato 27 en la torre de destilación T-104 se obtienen los menores consumos de energía (1.4×10^7 kJ/kmol y 1.5×10^7 kJ/kmol, para el condensador y rehervidor respectivamente). Por último, demostraron que, un aumento del flujo de nafta ligera no estabilizada que alimenta a la planta, conlleva a un aumento de la eficiencia de la unidad. De los resultados de la simulación del proceso, concluyeron que es propicio elevar la eficiencia de la planta, ya que el flujo de gas licuado de petróleo aumentó en un 11.79 % con la calidad establecida.

- [Monge \(2002, pp. i-ii\)](#), realizó un trabajo de tesis titulado: Proyecto de Instalación de una Planta Envasadora de Gas Licuado de Petróleo en la ciudad de Arequipa. En la primera parte de este trabajo, describieron algunas generalidades del GLP como son sus propiedades químicas y la disponibilidad del producto en el ámbito nacional. En la segunda parte de este trabajo, desarrollaron la ingeniería del proyecto, en la cual se detalla el proceso para el llenado de los cilindros de gas desde la descarga al tanque estacionario hasta la salida del producto final hacia el mercado local. Por último, hicieron un análisis económico, para la construcción de la planta, la inversión, el periodo de recuperación de capital y las proyecciones de crecimiento de la empresa, en donde demostraron la rentabilidad del proyecto.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Ecuación de estado de Soave-Redlich-Kwong (SRK)

La primera ecuación de estado cúbica que fue considerada válida para gases reales y mezclas de hidrocarburos, fue propuesta por **Van der Waals (VDW)** en 1873, quien propuso corregir el comportamiento de los gases en forma aditiva al incluir el volumen molar de las moléculas mediante los términos a y b ([Figueira, 2005](#); citado por [Fachín y Rimachi, 2019](#), p. 13). Dicha ecuación es:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V_m^2}. \quad (1)$$

Donde:

P : presión, atm

- V_m : volumen molar, L/mol
 a : constante positiva, atm. (L/mol)²
 b : constante positiva, L/mol
 T : temperatura absoluta, K
 R : constante de los gases, 0.0821 atm. L/(mol. K)

Posteriormente, **Redlich y Kwong (RK)** modificaron la ecuación de **VDW** e incluyeron un factor de ajuste (α) en términos de la temperatura, mejorando considerablemente las estimaciones obtenidas. Por último, la ecuación de **RK** fue mejorada por **Soave (S)**, quien ajustó el comportamiento de α al incluir el factor acéntrico de Pitzer (ω). A la expresión resultante se le denomina ecuación de **Soave-Redlich-Kwong (SRK)** (Fachín y Rimachi, 2019, p. 14).

$$\left(P + \frac{a\alpha}{V_m(V_m + b)}\right)(V_m - b) = RT. \quad (2)$$

La ecuación (2), también puede ser escrita como una ecuación cúbica para el volumen, de la forma siguiente:

$$V_m^3 - \left(\frac{RT}{P}\right) V_m^2 + \left(\frac{a\alpha - bRT - Pb^2}{P}\right) V_m - \frac{a\alpha b}{P} = 0. \quad (3)$$

Los valores de a , b y α , se pueden calcular mediante las siguientes ecuaciones:

$$a = 0.427480 \frac{R^2 T_c^2}{P_c}. \quad (4)$$

$$b = 0.086640 \frac{RT_c}{P_c}. \quad (5)$$

Donde P_c y T_c , son la presión y temperatura crítica, respectivamente. El factor de ajuste (α) y el factor acéntrico de Pitzer (ω), se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \left[1 + (0.480 + 1.574\omega - 0.176\omega^2) \left(1 - T_r^{1/2}\right)\right]^2. \quad (6)$$

$$\omega = -1 - \log(P_r^{\text{sat}})_{T_r=0.7}. \quad (7)$$

Los términos P_r y T_r , se definen como la presión y temperatura reducida, respectivamente.

$$P_r = \frac{P}{P_c}. \quad (8)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}. \quad (9)$$

La ecuación (7), indica que ω se puede determinar para cualquier fluido a partir de P_c , T_c y de una sola medición de la presión de vapor hecha a $T_r = 0.7$. Cuando se hace uso de la ecuación de **SRK**, es necesario determinar el factor de compresibilidad (Z), para lo cual tiene que calcularse previamente los parámetros q y β .

$$q = 0.427480 \frac{\alpha P_r}{T_r^2}. \quad (10)$$

$$\beta = 0.086640 \frac{P_r}{T_r}. \quad (11)$$

$$Z^3 - Z^2 + (q - \beta - \beta^2)Z - q\beta = 0. \quad (12)$$

Al conocerse los valores de P , T , Z y M , se puede usar la ecuación (13) para determinar V_m y ρ .

$$V_m = \frac{ZRT}{P} = \frac{M}{\rho}. \quad (13)$$

Si se tiene una mezcla de p componentes:

$$P_{c(\text{mezcla})} = \sum_{i=1}^p y_i P_{ci}. \quad (14)$$

$$T_{c(\text{mezcla})} = \sum_{i=1}^p y_i T_{ci}. \quad (15)$$

$$\omega_{c(\text{mezcla})} = \sum_{i=1}^p y_i \omega_{ci}. \quad (16)$$

Para el caso de tener una mezcla de p componentes, sería necesario que se calcule el factor de compresión para la mezcla (Z_{mezcla}), lo cual se debe reemplazar en la ecuación (13) para poder calcular la densidad de la mezcla (ρ_{mezcla}), es decir:

$$\rho_{\text{mezcla}} = \frac{PM_{\text{mezcla}}}{Z_{\text{mezcla}}RT}. \quad (17)$$

Las cantidades $P_{c(\text{mezcla})}$, $T_{c(\text{mezcla})}$, $\omega_{c(\text{mezcla})}$ y M_{mezcla} , representan a la presión crítica, temperatura crítica, el factor acéntrico de Pitzer y la masa molar de la mezcla, respectivamente.

1.2.2. Análisis de regresión múltiple

El **Análisis de regresión múltiple** nos permite establecer la relación que se produce entre una variable dependiente Y y un conjunto de variables independientes ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) (Carrasco, 2011, pp. 109-111; Chapra y Canale, 2007, pp. 286-289). Un modelo lineal simple que involucra una variable dependiente \hat{Y} y a dos variables independientes X_1 y X_2 , es el que se muestra en la siguiente ecuación:

$$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2. \quad (18)$$

Donde los términos β_1 y β_2 son los coeficientes de las variables independientes X_1 y X_2 , respectivamente y β_0 es el término independiente.

1.3. Definición de términos básicos

1.3.1. Gas licuado de petróleo (GLP)

El gas licuado de petróleo (GLP), es una mezcla de hidrocarburos que se obtiene en estado gaseoso del proceso de refinación del petróleo. El GLP se convierte en líquido

mediante compresión y enfriamiento para facilitar su manejo y comercialización. Su composición molar depende principalmente de dos hidrocarburos: 60% de propano (C_3H_8) y 40% de butano (C_4H_{10}). El gas de petróleo se licua a bajas presiones (6 a 10 bar) y temperaturas (-20 a 40 °C), dependiendo de la mezcla propano-butano. Al pasar de estado líquido a gaseoso aumenta su volumen 270 veces aproximadamente (Osinermin, 2012, p. 8).

1.3.2. Presión

La presión P es la relación entre una fuerza y el área sobre la cual actúa la misma. En consecuencia, las unidades de presión son unidades de fuerza entre unidades de área: bar, atm, N/m^2 , dinas/cm², etc. (Felder y Rousseau, 2004, p. 55).

1.3.3. Temperatura

Es una medida de la energía cinética promedio de las moléculas de una sustancia en determinado estado de agregación (Felder y Rousseau, 2004, p. 61). Se denota como T y sus unidades de medida son: °C, K, °F y °R.

1.3.4. Densidad

La densidad de una sustancia es su masa por unidad de volumen. Se denota como ρ y sus unidades son: kg/m^3 , g/cm^3 , lb_m/pie^3 (Felder y Rousseau, 2004, p. 44).

1.3.5. Calor específico

El calor específico de una sustancia se define como la cantidad de calor necesaria para aumentar su temperatura un grado. Se denota como C_e y sus unidades son: kcal/(kg°C), kJ/(kg°C), kcal/(kg.K), kJ/(kg.K) (Geankoplis, 2006, p. 15).

1.3.6. Conductividad térmica

Es una propiedad física de los materiales, la cual mide la capacidad de transferir calor. Se denota como k y sus unidades de medidas son: $W/(m\cdot°C)$, $W/(m.K)$ (Geankoplis, 2006, pp. 245-246).

1.3.7. Humedad o fracción de líquido

En una mezcla, es la relación entre la masa del líquido a la masa total de la mezcla.

$$f_L = \frac{m_L}{m_L + m_V}. \quad (19)$$

La masa de la mezcla es la suma de la masa en fase líquida (m_L) con la masa de la fase vapor (m_V).

Por ejemplo, si $f_L = 1$, indica que toda la mezcla se encuentra en fase líquida. Si $f_L = 0.40$, indica que el 40 % de la mezcla se encuentra en fase líquida y el 60 % de la mezcla está en fase vapor (Smith, Van Ness y Abbott, 2007, p. 225).

1.4. Modelado de la regresión múltiple

Se supone que se tiene el siguiente modelo lineal:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2. \quad (*)$$

Donde Y representa a la variable termofísica, X_1 y X_2 representan a la temperatura y a la presión, respectivamente.

Entonces, para 101 observaciones de la variable termofísica se tendrá, el siguiente sistema de ecuaciones:

$$Y_1 = \beta_0 + \beta_1 X_{11} + \beta_2 X_{21}. \quad (E1)$$

$$Y_2 = \beta_0 + \beta_1 X_{12} + \beta_2 X_{22}. \quad (E2)$$

$$Y_3 = \beta_0 + \beta_1 X_{13} + \beta_2 X_{23}. \quad (E3)$$

$$Y_4 = \beta_0 + \beta_1 X_{14} + \beta_2 X_{24}. \quad (E4)$$

⋮

⋮

$$Y_{101} = \beta_0 + \beta_1 X_{1\ 101} + \beta_2 X_{2\ 101}. \quad (\text{E101})$$

Si representamos el sistema lineal, en forma matricial, se tiene:

$$Y = X\beta. \quad (*1)$$

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_{101} \end{bmatrix}_{101 \times 1} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} \\ 1 & X_{12} & X_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{1\ 101} & X_{2\ 101} \end{bmatrix}_{101 \times 3} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}_{3 \times 1}$$

Donde:

La matriz Y tiene 101 filas y una sola columna.

La matriz X tiene 101 filas y 3 columnas.

La matriz β tiene 3 filas y una columna.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_{101} \end{bmatrix}_{101 \times 1} = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} \\ 1 & X_{12} & X_{22} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & X_{1\ 101} & X_{2\ 101} \end{bmatrix}_{101 \times 3} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}_{3 \times 1}. \quad (*2)$$

Multiplicando al sistema matricial en (*1) por la matriz transpuesta de X

$$X^T Y = X^T X \beta. \quad (*3)$$

El término X^T es la transpuesta de la matriz X .

Multiplicando ahora a la ecuación (*3) por $(X^T X)^{-1}$, se tiene:

La matriz $(X^T X)^{-1}$ es la inversa del producto matricial $X^T X$.

$$(X^T X)^{-1} X^T Y = (X^T X)^{-1} X^T X \beta. \quad (*4)$$

Tenga en cuenta que: $(X^T X)^{-1} X^T X = I$, donde I es la matriz identidad, entonces:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (*5)$$

Entonces, para obtener la matriz de coeficientes (β), primeramente, se debe realizar la multiplicación de las matrices $(X^T X)^{-1}$, X^T e Y , en el orden que se indica en la ecuación (*5), de esa forma la matriz β resultará de 3 filas y una columna.

Luego el coeficiente de determinación (R^2), se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}. \quad (20)$$

Donde Y_i representa el valor observado e \hat{Y}_i el valor ajustado o previsto, \bar{Y} es el promedio de los valores observados.

El coeficiente de determinación denominado R^2 es usado en un contexto de modelo estadístico, cuyo principal propósito es predecir futuros resultados o probar una hipótesis. Este coeficiente determina la calidad de un modelo para replicar los resultados.

El coeficiente de determinación adquiere los valores entre 0 y 1. Cuanto más cerca a 1 se situó su valor, mayor será el ajuste del modelo de la variable que se está intentando explicar. De forma contraria, cuanto más cerca a 0 sea el valor del coeficiente de determinación, menos ajustado estará el modelo y por tanto será menos fiable.

Se consideran alto grado de correlación entre variables, cuando los valores del coeficiente de correlación están entre 0.7 y 1. Valores entre 0 y menores que 0.7, se consideran baja correlación entre las variables que estamos estudiando.

Por ejemplo, si en el modelo obtenido: $\hat{Y} = 3.2 + 0.05X_1 + 25.6X_2$, el valor del coeficiente de determinación es 0.88, indica que las estimaciones del modelo obtenido se ajustan bien a la variable real. También se puede decir, que el modelo obtenido explica en un 88% a la variable real.

CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES

2.1. Formulación de la hipótesis

a. Hipótesis general

Existen las relaciones entre las variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica), con la presión y la temperatura del gas licuado de petróleo.

b. Hipótesis específicas

- Existe relación entre la densidad con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo.
- Existe relación entre el calor específico con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo.
- Existe relación entre la conductividad térmica con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo.

2.2. Variables y su operacionalización

Variables independientes: presión y temperatura.

Variables dependientes: densidad, calor específico y conductividad térmica.

Tabla 1. Operacionalización de las variables.

Variabes	Notación	Definición	Tipo por su naturaleza	Indicadores	Escala de medición	Medios de verificación
Independientes						
Presión	P	Es la relación entre una fuerza y el área sobre la cual actúa la misma. (Felder y Rousseau, 2004, p. 55).	Cuantitativa continua	bar	Razón	Archivos de las simulaciones en Aspen HYSYS V11.0 y del análisis de regresión en Microsoft Excel 2019.
Temperatura	T	Es una medida de la energía cinética promedio de las moléculas de una sustancia en determinado estado de agregación (Felder y Rousseau, 2004, p. 61).	Cuantitativa continua	°C	Intervalo	Archivos de las simulaciones en Aspen HYSYS V11.0 y del análisis de regresión en Microsoft Excel 2019.
Dependientes						
Densidad	ρ	La densidad de una sustancia es su masa por unidad de volumen (Felder y Rousseau, 2004, p. 44).	Cuantitativa continua	kg/m ³	Razón	Archivos de las simulaciones en Aspen HYSYS V11.0 y del análisis de regresión en Microsoft Excel 2019.
Calor específico	C_e	Se define como la cantidad de calor necesaria para aumentar su temperatura un grado (Geankoplis, 2006, p. 15).	Cuantitativa continua	kJ/(kg. °C)	Razón	Archivos de las simulaciones en Aspen HYSYS V11.0 y del análisis de regresión en Microsoft Excel 2019.
Conductividad térmica	k	Es una propiedad física de los materiales, la cual mide la capacidad de transferir calor (Geankoplis, 2006, p. 245-246).	Cuantitativa continua	W/(m.°C) W/(m.K)	Razón	Archivos de las simulaciones en Aspen HYSYS V11.0 y del análisis de regresión en Microsoft Excel 2019.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño

En la presente investigación, primeramente, se realizó una revisión sobre la ecuación de estado de Soave-Redlich-Kwong (SRK), seguidamente se realizó varias simulaciones de esta ecuación haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, para establecer cuáles serán los rangos de presión y temperatura en los que el gas de petróleo esté en estado líquido. Después se dedujo un modelo de regresión múltiple, lo cual se programó en las hojas de cálculo de Microsoft Excel 2019, para determinar las relaciones de las variables termofísicas con la presión y temperatura. Por lo tanto, la presente investigación tiene **enfoque cuantitativo** con nivel de profundización **predictivo** y tipo de **diseño correlacional no experimental**. El esquema del diseño de investigación, se muestra en la figura 1.

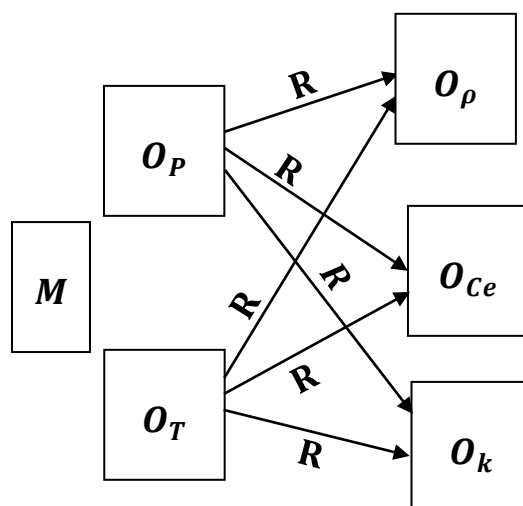


Figura 1. Esquema del diseño de investigación.

Fuente: *Elaboración propia.*

Donde:

O_P , O_T , O_ρ , O_{C_e} y O_k , son las observaciones obtenidas en cada una de las cinco variables (P , T , ρ , C_e y k , respectivamente) distintas de la muestra.

P : presión (variable independiente).

T : temperatura (variable independiente).

ρ : densidad (variable dependiente).

- C_e : calor específico (variable dependiente).
 k : conductividad térmica (variable dependiente).
 R : relación entre las variables.

3.2. Diseño muestral

La población para la presente investigación, lo representaron las múltiples simulaciones que se puedan realizar con la ecuación de Soave-Redlich-Kwong (SRK), de acuerdo a las condiciones de presión y temperatura, en las que el gas de petróleo se encuentre en estado líquido. Entonces, es por eso que el tipo de muestreo en esta investigación fue el no probabilístico, teniéndose en cuenta el siguiente criterio de inclusión para cada variable termofísica:

- Nueve (9) simulaciones haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, a la presión de 6 bar y variando la temperatura de -20 a 20 °C.
- Diez (10) simulaciones haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, a la presión de 6.5 bar y variando la temperatura de -20 a 24 °C.
- Diez (10) simulaciones haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, a la presión de 7 bar y variando la temperatura de -20 a 25 °C.
- Once (11) simulaciones haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, a la presión de 7.5 bar y variando la temperatura de -20 a 30 °C.
- Once (11) simulaciones haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, a la presión de 8 bar y variando la temperatura de -20 a 30 °C.
- Doce (12) simulaciones haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, a la presión de 8.5 bar y variando la temperatura de -20 a 35 °C.
- Doce (12) simulaciones haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, a la presión de 9 bar y variando la temperatura de -20 a 35 °C.
- Trece (13) simulaciones haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, a la presión de 9.5 bar y variando la temperatura de -20 a 39 °C.
- Trece (13) simulaciones haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, a la presión de 10 bar y variando la temperatura de -20 a 40 °C.

Toda esta información, se puede representar gráficamente tal como se indica en las figuras 2 y 3, en las cuales se puede observar la región que le corresponde al gas

licuado de petróleo (GLP), en los diagramas presión volumen específico y temperatura volumen específico. Es decir, las figuras 2 y 3, muestran básicamente las condiciones de presión y temperatura para que el gas de petróleo esté en estado líquido (6 a 10 bar y -20 a 40 °C). Por ejemplo, si la presión de licuado del gas de petróleo es 7.5 bar, la temperatura tendría que ser como máximo 30 °C, una temperatura mayor a esta podría hacer que el gas de petróleo empiece a evaporarse.

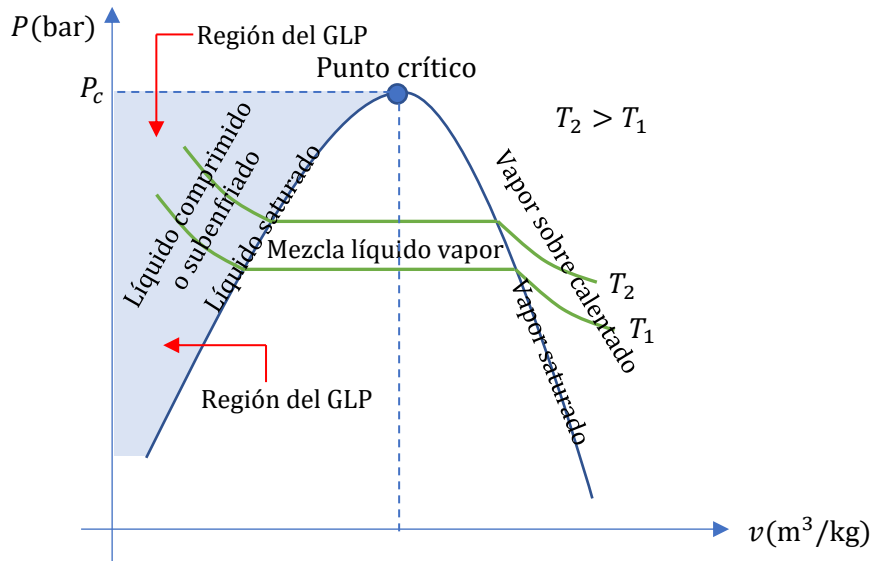


Figura 2. Diagrama presión volumen específico.

Fuente: Smith, Van Ness y Abbott, 2007, p. 66.

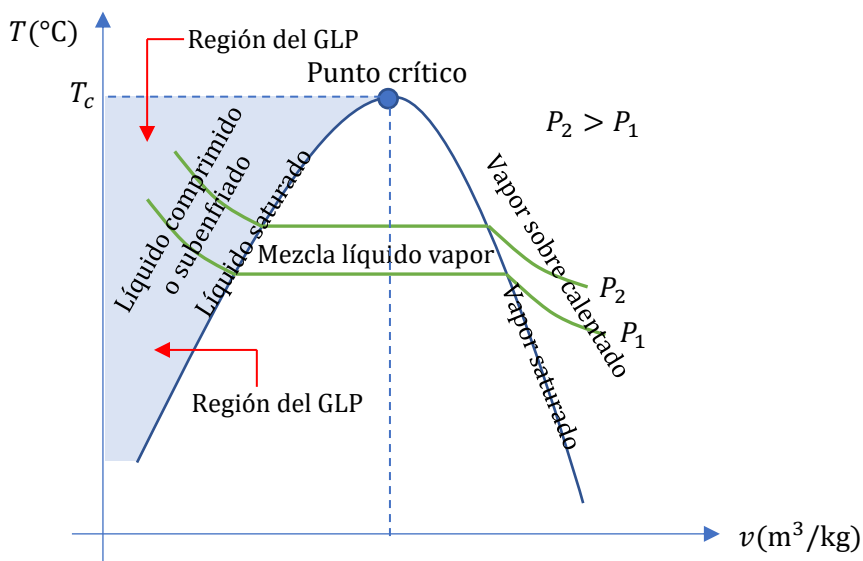


Figura 3. Diagrama temperatura volumen específico.

Fuente: Smith, Van Ness y Abbott, 2007, p. 66.

También, esta información indica que, para determinar la relación de cada variable termofísica con la presión y temperatura, se realizará un total de 101 simulaciones. Entonces, como son tres variables termofísicas, la muestra total tendrá un tamaño de 303.

3.3. Procedimientos de recolección de datos

El procedimiento de recolección de datos, estuvo basado en la recopilación de valores de variables termofísicas a determinados valores de presión y temperatura. Dichos valores se obtenían de las simulaciones de la ecuación de estado de **SRK** haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0. A continuación se muestra un ejemplo de las 101 simulaciones de la ecuación de estado de **SRK**.

Paso 1: se ingresan los componentes del gas licuado de petróleo: de propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}), véase la figura 4.

Paso 2: se selecciona el modelo termodinámico o paquete de fluido, en este caso es la ecuación de estado de Soave-Redlich-Kwong (SRK), véase la figura 5.

Paso 3: se debe crear una corriente de materia, para luego ingresar las siguientes condiciones: presión (6 bar), temperatura ($-20\text{ }^\circ\text{C}$) y flujo (100 kmol/h), véase la figura 6. Para el flujo se puede poner un valor arbitrario y especificarse como molar o másico, en este caso se está haciendo como molar, esto no afecta el estado del gas de petróleo.

Paso 4: se ingresa la composición del gas licuado de petróleo (GLP), de acuerdo a las siguientes especificaciones en fracciones molares: 0.6 para el propano y 0.40 para el butano, véase la figura 7.

Paso 5: seguidamente se hace un clic sobre la opción **properties**, para visualizar los resultados de la densidad, calor específico y conductividad térmica, que el programa Aspen HYSYS V11.0 ha calculado haciendo uso de la ecuación de estado de Soave-Redlich-Kwong (SRK); lo cual se puede observar en las figuras 8, 9 y 10, respectivamente.

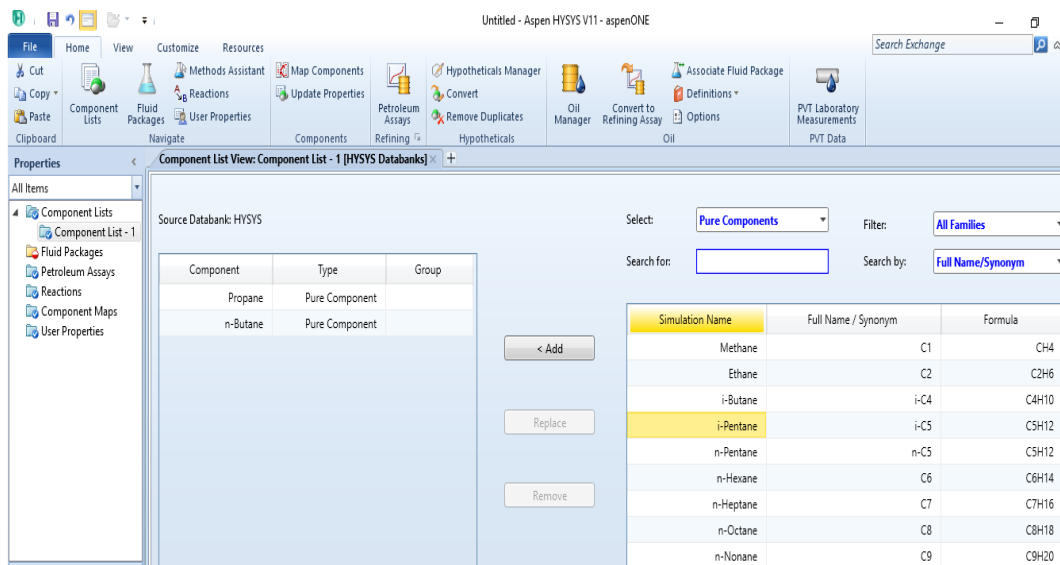


Figura 4. Ingreso de componentes a Aspen HYSYS V11.0.

Fuente: Elaboración propia.

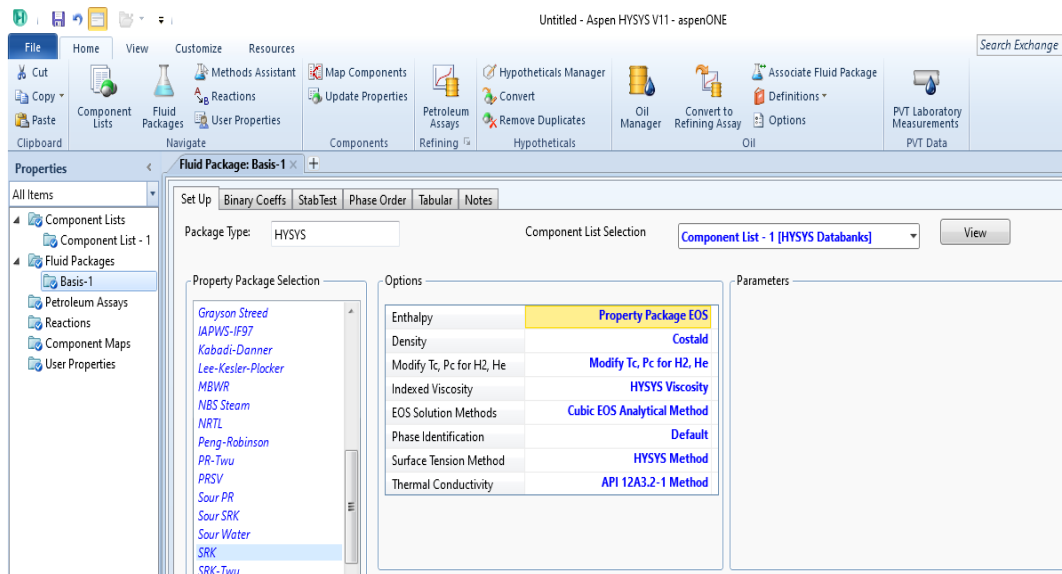


Figura 5. Selección de la ecuación de estado de Soave-Redlich-Kwong (SRK).

Fuente: Elaboración propia.

Material Stream: 6 bar -20 °C		
Worksheet Attachments Dynamics		
Worksheet	Stream Name	6 bar -20 °C
Conditions	Vapour / Phase Fraction	<empty>
Properties	Temperature [C]	-20.00
Composition	Pressure [bar]	6.000
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	100.0
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/s]	<empty>
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	<empty>
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	<empty>
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	<empty>
Cost Parameters	Heat Flow [kW]	<empty>
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	<empty>
▸ Emissions	Fluid Package	Basis-1
	Utility Type	

Figura 6. Ingreso de las condiciones de presión, temperatura y flujo.

Fuente: Elaboración propia.

	Mole Fraction
Propane	0.6000
n-Butane	0.4000

Composition Basis

- Mole Fractions
- Mass Fractions
- Liq Volume Fractions
- Mole Flows
- Mass Flows
- Liq Volume Flows

Composition Controls

Erase

Equalize Composition

Cancel

Normalize Total 1.0000 OK

Figura 7. Ingreso de la composición molar.

Fuente: Elaboración propia.

Material Stream: 6 bar -20 °C			
Worksheet	Attachments	Dynamics	
Worksheet	Stream Name	6 bar -20 °C	Liquid Phase
Conditions	Molecular Weight	49.71	49.71
Properties	Molar Density [kgmole/m3]	11.81	11.81
Composition	Mass Density [kg/m3]	586.8	586.8
Oil & Gas Feed	Act. Volume Flow [m3/h]	8.471	8.471
Petroleum Assay	Mass Enthalpy [kJ/kg]	-2754	-2754
K Value			

Figura 8. Resultado de la densidad.

Fuente: Elaboración propia.

Material Stream: 6 bar -20 °C			
Worksheet	Attachments	Dynamics	
Worksheet	Stream Name	6 bar -20 °C	Liquid Phase
Conditions	Molecular Weight	49.71	49.71
Properties	Molar Density [kgmole/m3]	11.81	11.81
Composition	Mass Density [kg/m3]	586.8	586.8
Oil & Gas Feed	Act. Volume Flow [m3/h]	8.471	8.471
Petroleum Assay	Mass Enthalpy [kJ/kg]	-2754	-2754
K Value	Mass Entropy [kJ/kg-C]	1.174	1.174
User Variables	Heat Capacity [kJ/kgmole-C]	114.2	114.2
Notes	Mass Heat Capacity [kJ/kg-C]	2.296	2.296
Cost Parameters	LHV Molar Basis (Std) [kJ/kgmole]	2.291e+006	2.291e+006
Normalized Yields			

Figura 9. Resultado del calor específico.

Fuente: Elaboración propia.

Material Stream: 6 bar -20 °C			
Worksheet	Attachments	Dynamics	
Worksheet	Ideal Gas Cp [kJ/kgmole-C]	73.81	73.81
Conditions	Mass Ideal Gas Cp [kJ/kg-C]	1.485	1.485
Properties	Heat of Vap. [kJ/kgmole]	1.900e+004	<empty>
Composition	Kinematic Viscosity [cSt]	0.3286	0.3286
Oil & Gas Feed	Liq. Mass Density (Std. Cond) [kg/m3]	543.6	543.6
Petroleum Assay	Liq. Vol. Flow (Std. Cond) [m3/h]	9.145	9.145
K Value	Liquid Fraction	1.000	1.000
User Variables	Molar Volume [m3/kgmole]	8.471e-002	8.471e-002
Notes	Mass Heat of Vap. [kJ/kg]	382.3	<empty>
Cost Parameters	Phase Fraction [Molar Basis]	0.0000	1.0000
Normalized Yields	Surface Tension [dyne/cm]	14.43	14.43
▸ Emissions	Thermal Conductivity [W/m-K]	0.1157	0.1157

Figura 10. Resultado de la conductividad térmica.

Fuente: Elaboración propia.

De esa misma forma se realizan las otras 100 simulaciones para determinar la densidad, el calor específico y la conductividad térmica.

3.4. Procesamiento y análisis de datos

El procesamiento y análisis de datos, estuvo basado en el análisis de regresión múltiple de los valores de cada una de las variables termofísicas con la presión y temperatura, para lo cual se programó la ecuación (*5) en las hojas de cálculo de Microsoft Excel 2019. Las relaciones de cada una de las variables termofísicas con la presión y temperatura, se validaron evaluando el coeficiente de determinación ($0.95 < R^2 < 1$) y haciendo la aplicación a procesos reales.

Para esto primero se construyó las matrices X e Y , para cada variable termofísica y luego se determinaron independientemente los productos matriciales $(X^T X)^{-1}$ y $X^T Y$.

Seguidamente, se determinó la matriz β , haciendo uso de la ecuación (*5).

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (*5)$$

Por último, se determinó el coeficiente de determinación (R^2), haciendo uso de la ecuación (20), para eso previamente se calculó el valor promedio (\bar{Y}) de cada variable termofísica. El detalle de estos cálculos se puede verificar desde el anexo 2 hasta el 11.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}. \quad (20)$$

3.5. Aspectos éticos

Como tesis y egresados de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, declaramos que en nuestro trabajo de investigación no existe plagio de ningún tipo de otro trabajo de tesis, informe, proyecto de investigación o artículo científico. Así mismo, nos comprometemos a respetar la veracidad de los resultados que se obtengan de las ciento uno (101) simulaciones que fueron realizadas de la ecuación de Soave-Redlich-Kwong (SRK).

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Tabla 2. Valores observados para la densidad.

f_L	MATRIZ X		Matriz Y
	$X_1 = T(^{\circ}\text{C})$	$X_2 = P(\text{bar})$	$Y = \rho(\text{kg/m}^3)$
1	-20	6	586.8
1	-15	6	581
1	-10	6	575.1
1	-5	6	569.1
1	0	6	563
1	5	6	556.7
1	10	6	550.3
1	15	6	543.8
1	20	6	537
1	-20	6.5	586.9
1	-15	6.5	581.1
1	-10	6.5	575.2
1	-5	6.5	569.2
1	0	6.5	563.1
1	5	6.5	556.8
1	10	6.5	550.4
1	15	6.5	543.9
1	20	6.5	537.1
1	24	6.5	531.6
1	-20	7	586.9
1	-15	7	581.2
1	-10	7	575.3
1	-5	7	569.3
1	0	7	563.1
1	5	7	556.9
1	10	7	550.5
1	15	7	544
1	20	7	537.2
1	25	7	530.3
1	-20	7.5	587
1	-15	7.5	581.2
1	-10	7.5	575.3
1	-5	7.5	569.3
1	0	7.5	563.2
1	5	7.5	557
1	10	7.5	550.6
1	15	7.5	544.1

1	20	7.5	537.3
1	25	7.5	530.4
1	30	7.5	523.3
1	-20	8	587.1
1	-15	8	581.3
1	-10	8	575.4
1	-5	8	569.4
1	0	8	563.3
1	5	8	557.1
1	10	8	550.7
1	15	8	544.2
1	20	8	537.5
1	25	8	530.6
1	30	8	523.4
1	-20	8.5	587.1
1	-15	8.5	581.4
1	-10	8.5	575.5
1	-5	8.5	569.5
1	0	8.5	563.4
1	5	8.5	557.2
1	10	8.5	550.8
1	15	8.5	544.3
1	20	8.5	537.6
1	25	8.5	530.7
1	30	8.5	523.6
1	35	8.5	516.2
1	-20	9	587.2
1	-15	9	581.4
1	-10	9	575.6
1	-5	9	569.6
1	0	9	563.5
1	5	9	557.2
1	10	9	550.9
1	15	9	544.4
1	20	9	537.7
1	25	9	530.8
1	30	9	523.7
1	35	9	516.3
1	-20	9.5	587.3
1	-15	9.5	581.5
1	-10	9.5	575.6
1	-5	9.5	569.6
1	0	9.5	563.6
1	5	9.5	557.3

1	10	9.5	551
1	15	9.5	544.5
1	20	9.5	537.8
1	25	9.5	530.9
1	30	9.5	523.8
1	35	9.5	516.5
1	39	9.5	510.4
1	-20	10	587.3
1	-15	10	581.6
1	-10	10	575.7
1	-5	10	569.7
1	0	10	563.6
1	5	10	557.4
1	10	10	551.1
1	15	10	544.6
1	20	10	537.9
1	25	10	531
1	30	10	523.9
1	35	10	516.6
1	40	10	509

Fuente: Simulaciones de la ecuación de estado de SRK en Aspen HYSYS V11.0.

Tabla 3. Resultados de la matriz β para la densidad.

Matriz $(X^T \cdot X)^{-1}$			Matriz $X^T \cdot Y$	Matriz β
0.4192	0.0005	-0.0506	56066.30	562.33
0.0005	0.0000	-0.0001	295720.50	-1.28
-0.0506	-0.0001	0.0063	456338.25	0.04

Fuente: Elaboración propia.

Como la ecuación de la densidad en función de la temperatura y presión, debe tener la siguiente forma: $\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$. Entonces, teniendo en cuenta los resultados de la matriz β , la ecuación de la densidad en función de la temperatura y presión queda: $\hat{\rho} = 562.33 - 1.28T + 0.04P$. En esta ecuación se debe observar que la unidad de medida de la densidad es kg/m^3 , la temperatura debe estar en $^{\circ}\text{C}$ y la presión en bar.

Tabla 4. Valores previstos para la densidad y cálculo de R^2 .

Matriz \hat{Y}			
$\hat{Y} = \hat{\rho}(\text{kg/m}^3)$	$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	R^2
588.19	1.922	1004.1369	0.9986
581.79	0.621	670.1947	
575.39	0.084	399.5249	
568.99	0.012	195.6675	
562.59	0.166	62.2224	
556.19	0.255	2.5221	
549.80	0.254	23.1542	
543.40	0.162	127.9587	
537.00	0.000	328.0402	
588.21	1.712	1010.4845	
581.81	0.504	675.3823	
575.41	0.045	403.5325	
569.01	0.035	198.4751	
562.62	0.235	63.8100	
556.22	0.340	2.8497	
549.82	0.338	22.2018	
543.42	0.230	125.7063	
537.02	0.006	324.4279	
531.90	0.092	552.8086	
588.23	1.771	1010.4845	
581.83	0.400	680.5899	
575.43	0.018	407.5601	
569.04	0.070	201.3027	
562.64	0.214	63.8100	
556.24	0.437	3.1974	
549.84	0.435	21.2694	
543.44	0.311	123.4739	
537.04	0.024	320.8355	
530.65	0.120	615.6294	
588.25	1.570	1016.8521	
581.85	0.429	680.5899	
575.46	0.024	407.5601	
569.06	0.059	201.3027	
562.66	0.292	65.4177	
556.26	0.546	3.5650	
549.86	0.543	20.3571	
543.46	0.404	121.2615	
537.07	0.055	317.2631	
530.67	0.072	610.6771	

524.27	0.940	1011.9958
588.28	1.381	1023.2397
581.88	0.333	685.8176
575.48	0.006	411.6078
569.08	0.102	204.1503
562.68	0.382	67.0453
556.28	0.667	3.9526
549.89	0.664	19.4647
543.49	0.508	119.0692
537.09	0.169	310.1784
530.69	0.008	600.8323
524.29	0.796	1005.6434
588.30	1.434	1023.2397
581.90	0.249	691.0652
575.50	0.000	415.6754
569.10	0.158	207.0180
562.70	0.484	68.6929
556.31	0.800	4.3602
549.91	0.797	18.5923
543.51	0.625	116.8968
537.11	0.239	306.6660
530.71	0.000	595.9399
524.31	0.510	992.9987
517.92	2.944	1514.1345
588.32	1.254	1029.6474
581.92	0.272	691.0652
575.52	0.006	419.7630
569.12	0.226	209.9056
562.73	0.598	70.3605
556.33	0.760	4.3602
549.93	0.941	17.7399
543.53	0.754	114.7444
537.13	0.321	303.1736
530.73	0.004	591.0676
524.34	0.405	986.7063
517.94	2.683	1506.3621
588.34	1.086	1036.0750
581.94	0.197	696.3328
575.55	0.003	419.7630
569.15	0.205	209.9056
562.75	0.725	72.0482
556.35	0.902	4.7879
549.95	1.098	16.9076
543.55	0.896	112.6120

537.16	0.416	299.7012
530.76	0.020	586.2152
524.36	0.312	980.4339
517.96	2.133	1490.8774
512.84	5.962	1999.1523
588.36	1.133	1036.0750
581.97	0.134	701.6204
575.57	0.018	423.8706
569.17	0.282	212.8132
562.77	0.687	72.0482
556.37	1.056	5.2355
549.97	1.267	16.0952
543.58	1.049	110.4996
537.18	0.522	296.2489
530.78	0.049	581.3828
524.38	0.231	974.1815
517.98	1.912	1483.1650
511.58	6.678	2126.3056
	66.197	46413.626

Fuente: Elaboración propia.

Los valores previstos para la densidad ($\hat{\rho}$), se calcularon haciendo uso de la ecuación: $\hat{\rho} = 562.33 - 1.28T + 0.04P$. Por ejemplo, si deseamos calcular la densidad a $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $P = 8\text{ bar}$, se realizaría de la forma siguiente:

$$\hat{\rho} = 562.33 - 1.28 \times 30 + 0.04 \times 8 \cong 524.29\text{ kg/m}^3.$$

De esta forma se podría calcular el valor de la densidad para cualquier valor de la temperatura y presión.

Para el cálculo de R^2 , se hizo uso de la ecuación (20). Para este caso $\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = 66.197$ y $\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = 46413.626$. Entonces:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{66.197}{46413.626} \cong 0.9986.$$

Tabla 5. Resultados del residuo para la densidad.

f_L	MATRIZ X		Valor observado	Valor previsto	Residuo de ρ	% Error
	$X_1 = T(^{\circ}\text{C})$	$X_2 = P(\text{bar})$	$Y = \rho(\text{kg/m}^3)$	$\hat{Y} = \hat{\rho}(\text{kg/m}^3)$	$Y_i - \hat{Y}_i$	
1	-20	6	586.8	588.19	-1.39	0.24%
1	-15	6	581	581.79	-0.79	0.14%
1	-10	6	575.1	575.39	-0.29	0.05%
1	-5	6	569.1	568.99	0.11	0.02%
1	0	6	563	562.59	0.41	0.07%
1	5	6	556.7	556.19	0.51	0.09%
1	10	6	550.3	549.80	0.50	0.09%
1	15	6	543.8	543.40	0.40	0.07%
1	20	6	537	537.00	0.00	0.00%
1	-20	6.5	586.9	588.21	-1.31	0.22%
1	-15	6.5	581.1	581.81	-0.71	0.12%
1	-10	6.5	575.2	575.41	-0.21	0.04%
1	-5	6.5	569.2	569.01	0.19	0.03%
1	0	6.5	563.1	562.62	0.48	0.09%
1	5	6.5	556.8	556.22	0.58	0.10%
1	10	6.5	550.4	549.82	0.58	0.11%
1	15	6.5	543.9	543.42	0.48	0.09%
1	20	6.5	537.1	537.02	0.08	0.01%
1	24	6.5	531.6	531.90	-0.30	0.06%
1	-20	7	586.9	588.23	-1.33	0.23%
1	-15	7	581.2	581.83	-0.63	0.11%
1	-10	7	575.3	575.43	-0.13	0.02%
1	-5	7	569.3	569.04	0.26	0.05%
1	0	7	563.1	562.64	0.46	0.08%
1	5	7	556.9	556.24	0.66	0.12%
1	10	7	550.5	549.84	0.66	0.12%
1	15	7	544	543.44	0.56	0.10%
1	20	7	537.2	537.04	0.16	0.03%
1	25	7	530.3	530.65	-0.35	0.07%
1	-20	7.5	587	588.25	-1.25	0.21%
1	-15	7.5	581.2	581.85	-0.65	0.11%
1	-10	7.5	575.3	575.46	-0.16	0.03%
1	-5	7.5	569.3	569.06	0.24	0.04%
1	0	7.5	563.2	562.66	0.54	0.10%
1	5	7.5	557	556.26	0.74	0.13%
1	10	7.5	550.6	549.86	0.74	0.13%
1	15	7.5	544.1	543.46	0.64	0.12%
1	20	7.5	537.3	537.07	0.23	0.04%
1	25	7.5	530.4	530.67	-0.27	0.05%

1	30	7.5	523.3	524.27	-0.97	0.18%
1	-20	8	587.1	588.28	-1.18	0.20%
1	-15	8	581.3	581.88	-0.58	0.10%
1	-10	8	575.4	575.48	-0.08	0.01%
1	-5	8	569.4	569.08	0.32	0.06%
1	0	8	563.3	562.68	0.62	0.11%
1	5	8	557.1	556.28	0.82	0.15%
1	10	8	550.7	549.89	0.81	0.15%
1	15	8	544.2	543.49	0.71	0.13%
1	20	8	537.5	537.09	0.41	0.08%
1	25	8	530.6	530.69	-0.09	0.02%
1	30	8	523.4	524.29	-0.89	0.17%
1	-20	8.5	587.1	588.30	-1.20	0.20%
1	-15	8.5	581.4	581.90	-0.50	0.09%
1	-10	8.5	575.5	575.50	0.00	0.00%
1	-5	8.5	569.5	569.10	0.40	0.07%
1	0	8.5	563.4	562.70	0.70	0.12%
1	5	8.5	557.2	556.31	0.89	0.16%
1	10	8.5	550.8	549.91	0.89	0.16%
1	15	8.5	544.3	543.51	0.79	0.15%
1	20	8.5	537.6	537.11	0.49	0.09%
1	25	8.5	530.7	530.71	-0.01	0.00%
1	30	8.5	523.6	524.31	-0.71	0.14%
1	35	8.5	516.2	517.92	-1.72	0.33%
1	-20	9	587.2	588.32	-1.12	0.19%
1	-15	9	581.4	581.92	-0.52	0.09%
1	-10	9	575.6	575.52	0.08	0.01%
1	-5	9	569.6	569.12	0.48	0.08%
1	0	9	563.5	562.73	0.77	0.14%
1	5	9	557.2	556.33	0.87	0.16%
1	10	9	550.9	549.93	0.97	0.18%
1	15	9	544.4	543.53	0.87	0.16%
1	20	9	537.7	537.13	0.57	0.11%
1	25	9	530.8	530.73	0.07	0.01%
1	30	9	523.7	524.34	-0.64	0.12%
1	35	9	516.3	517.94	-1.64	0.32%
1	-20	9.5	587.3	588.34	-1.04	0.18%
1	-15	9.5	581.5	581.94	-0.44	0.08%
1	-10	9.5	575.6	575.55	0.05	0.01%
1	-5	9.5	569.6	569.15	0.45	0.08%
1	0	9.5	563.6	562.75	0.85	0.15%
1	5	9.5	557.3	556.35	0.95	0.17%
1	10	9.5	551	549.95	1.05	0.19%
1	15	9.5	544.5	543.55	0.95	0.17%

1	20	9.5	537.8	537.16	0.64	0.12%
1	25	9.5	530.9	530.76	0.14	0.03%
1	30	9.5	523.8	524.36	-0.56	0.11%
1	35	9.5	516.5	517.96	-1.46	0.28%
1	39	9.5	510.4	512.84	-2.44	0.48%
1	-20	10	587.3	588.36	-1.06	0.18%
1	-15	10	581.6	581.97	-0.37	0.06%
1	-10	10	575.7	575.57	0.13	0.02%
1	-5	10	569.7	569.17	0.53	0.09%
1	0	10	563.6	562.77	0.83	0.15%
1	5	10	557.4	556.37	1.03	0.18%
1	10	10	551.1	549.97	1.13	0.20%
1	15	10	544.6	543.58	1.02	0.19%
1	20	10	537.9	537.18	0.72	0.13%
1	25	10	531	530.78	0.22	0.04%
1	30	10	523.9	524.38	-0.48	0.09%
1	35	10	516.6	517.98	-1.38	0.27%
1	40	10	509	511.58	-2.58	0.51%

Fuente: Simulaciones de la ecuación de estado de SRK en Aspen HYSYS V11.0.

Los valores del residuo de la densidad que se muestran en la tabla 5, se obtuvieron haciendo la diferencia entre el valor observado y el valor previsto, es decir: $Y_i - \hat{Y}_i$. Por ejemplo, para calcular el residuo de la densidad a $P = 7$ bar y $T = -10$ °C, se realizó el siguiente cálculo: $(575.3 - 575.43) = -0.13$.

Para determinar el porcentaje de error correspondiente a este residuo, se realizó el siguiente cálculo:

$$\%Error = \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{\hat{Y}_i} \times 100.$$

$$\%Error = \frac{|575.3 - 575.43|}{575.43} \times 100 = 0.02 \%$$

Tabla 6. Valores observados para el calor específico.

f_L	MATRIZ X		Matriz Y
	$X_1 = T(^{\circ}\text{C})$	$X_2 = P(\text{bar})$	$Y = C_e \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right)$
1	-20	6	2.296
1	-15	6	2.332
1	-10	6	2.368
1	-5	6	2.406
1	0	6	2.446
1	5	6	2.487
1	10	6	2.531
1	15	6	2.577
1	20	6	2.626
1	-20	6.5	2.296
1	-15	6.5	2.331
1	-10	6.5	2.368
1	-5	6.5	2.405
1	0	6.5	2.445
1	5	6.5	2.486
1	10	6.5	2.53
1	15	6.5	2.576
1	20	6.5	2.625
1	24	6.5	2.666
1	-20	7	2.295
1	-15	7	2.331
1	-10	7	2.367
1	-5	7	2.405
1	0	7	2.444
1	5	7	2.485
1	10	7	2.529
1	15	7	2.575
1	20	7	2.623
1	25	7	2.676
1	-20	7.5	2.295
1	-15	7.5	2.33
1	-10	7.5	2.366
1	-5	7.5	2.404
1	0	7.5	2.443
1	5	7.5	2.484
1	10	7.5	2.528
1	15	7.5	2.573
1	20	7.5	2.622
1	25	7.5	2.674

1	30	7.5	2.73
1	-20	8	2.294
1	-15	8	2.329
1	-10	8	2.366
1	-5	8	2.403
1	0	8	2.443
1	5	8	2.484
1	10	8	2.527
1	15	8	2.572
1	20	8	2.621
1	25	8	2.673
1	30	8	2.729
1	-20	8.5	2.294
1	-15	8.5	2.329
1	-10	8.5	2.365
1	-5	8.5	2.403
1	0	8.5	2.442
1	5	8.5	2.483
1	10	8.5	2.526
1	15	8.5	2.571
1	20	8.5	2.619
1	25	8.5	2.671
1	30	8.5	2.727
1	35	8.5	2.788
1	-20	9	2.294
1	-15	9	2.328
1	-10	9	2.364
1	-5	9	2.402
1	0	9	2.441
1	5	9	2.482
1	10	9	2.525
1	15	9	2.57
1	20	9	2.618
1	25	9	2.67
1	30	9	2.725
1	35	9	2.786
1	-20	9.5	2.293
1	-15	9.5	2.328
1	-10	9.5	2.364
1	-5	9.5	2.401
1	0	9.5	2.44
1	5	9.5	2.481
1	10	9.5	2.524
1	15	9.5	2.569

1	20	9.5	2.617
1	25	9.5	2.668
1	30	9.5	2.723
1	35	9.5	2.784
1	39	9.5	2.836
1	-20	10	2.293
1	-15	10	2.327
1	-10	10	2.363
1	-5	10	2.401
1	0	10	2.439
1	5	10	2.48
1	10	10	2.523
1	15	10	2.568
1	20	10	2.616
1	25	10	2.667
1	30	10	2.722
1	35	10	2.782
1	40	10	2.847

Fuente: Simulaciones de la ecuación de estado de SRK en Aspen HYSYS V11.0.

Tabla 7. Resultados de la matriz β para el calor específico.

Matriz $(X^T \cdot X)^{-1}$			Matriz $X^T \cdot Y$	Matriz β
0.4192	0.0005	-0.0506	252.90	2.4490
0.0005	0.0000	-0.0001	1746.18	0.0088
-0.0506	-0.0001	0.0063	2064.40	0.0004

Fuente: Elaboración propia.

Para la ecuación del calor específico en función de la temperatura y presión, se tiene en cuenta en cuenta los resultados de la matriz β , entonces esta ecuación queda:

$$\hat{C}_e = 2.449 + 0.0088T + 0.0004P.$$

En esta ecuación se debe observar que la unidad de medida del calor específico es $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}}\right)$, la temperatura debe estar en $^\circ\text{C}$ y la presión en bar.

Tabla 8. Valores previstos para el calor específico y cálculo de R^2 .

Matriz \hat{Y} $\hat{Y} = \hat{C}_e \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^\circ\text{C}} \right)$	$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	R^2
2.276	0.00042	0.0432	0.9924
2.320	0.00016	0.0296	
2.363	0.00002	0.0185	
2.407	0.00000	0.0096	
2.451	0.00003	0.0034	
2.495	0.00007	0.0003	
2.539	0.00006	0.0007	
2.583	0.00003	0.0053	
2.627	0.00000	0.0149	
2.276	0.00041	0.0432	
2.320	0.00013	0.0299	
2.364	0.00002	0.0185	
2.407	0.00001	0.0098	
2.451	0.00004	0.0035	
2.495	0.00009	0.0003	
2.539	0.00008	0.0007	
2.583	0.00005	0.0052	
2.627	0.00000	0.0147	
2.662	0.00002	0.0263	
2.276	0.00036	0.0436	
2.320	0.00012	0.0299	
2.364	0.00001	0.0187	
2.408	0.00001	0.0098	
2.452	0.00006	0.0036	
2.495	0.00011	0.0004	
2.539	0.00011	0.0006	
2.583	0.00007	0.0051	
2.627	0.00002	0.0142	
2.671	0.00003	0.0296	
2.276	0.00036	0.0436	
2.320	0.00010	0.0302	
2.364	0.00000	0.0190	
2.408	0.00001	0.0100	
2.452	0.00008	0.0037	
2.496	0.00013	0.0004	
2.539	0.00013	0.0006	
2.583	0.00011	0.0048	
2.627	0.00003	0.0139	

2.671	0.00001	0.0289
2.715	0.00022	0.0511
2.276	0.00031	0.0441
2.320	0.00008	0.0306
2.364	0.00000	0.0190
2.408	0.00003	0.0102
2.452	0.00008	0.0037
2.496	0.00014	0.0004
2.540	0.00016	0.0005
2.584	0.00013	0.0046
2.627	0.00004	0.0137
2.671	0.00000	0.0286
2.715	0.00019	0.0507
2.277	0.00031	0.0441
2.320	0.00007	0.0306
2.364	0.00000	0.0193
2.408	0.00003	0.0102
2.452	0.00010	0.0038
2.496	0.00017	0.0004
2.540	0.00019	0.0005
2.584	0.00016	0.0045
2.628	0.00007	0.0132
2.672	0.00000	0.0279
2.715	0.00013	0.0498
2.759	0.00082	0.0807
2.277	0.00030	0.0441
2.321	0.00005	0.0309
2.364	0.00000	0.0196
2.408	0.00004	0.0104
2.452	0.00013	0.0040
2.496	0.00020	0.0005
2.540	0.00023	0.0004
2.584	0.00019	0.0044
2.628	0.00010	0.0130
2.672	0.00000	0.0276
2.716	0.00009	0.0489
2.759	0.00070	0.0796
2.277	0.00026	0.0445
2.321	0.00005	0.0309
2.365	0.00000	0.0196
2.409	0.00006	0.0106
2.452	0.00015	0.0041
2.496	0.00023	0.0005
2.540	0.00026	0.0004

2.584	0.00023	0.0042
2.628	0.00012	0.0128
2.672	0.00002	0.0269
2.716	0.00005	0.0480
2.760	0.00059	0.0784
2.795	0.00170	0.1103
2.277	0.00025	0.0445
2.321	0.00004	0.0313
2.365	0.00000	0.0199
2.409	0.00006	0.0106
2.453	0.00019	0.0042
2.497	0.00027	0.0006
2.540	0.00030	0.0004
2.584	0.00027	0.0041
2.628	0.00015	0.0126
2.672	0.00003	0.0266
2.716	0.00004	0.0476
2.760	0.00049	0.0773
2.804	0.00187	0.1177
	0.017	2.202

Fuente: *Elaboración propia.*

Los valores previstos para el calor específico (\hat{C}_e), se calcularon haciendo uso de la ecuación: $\hat{C}_e = 2.449 + 0.0088T + 0.0004P$. Por ejemplo, si deseamos calcular el calor específico a $T = 20$ °C y $P = 7$ bar, se realizaría de la forma siguiente:

$$\hat{C}_e = 2.449 + 0.0088 \times 20 + 0.0004 \times 7 \cong 2.627 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

De esta forma se podría calcular el calor específico para cualquier valor de la temperatura y presión.

Para el cálculo de R^2 , se hizo uso de la ecuación **(20)**. Para este caso $\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = 0.017$ y $\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = 2.202$. Entonces:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{0.017}{2.202} \cong 0.9924.$$

Tabla 9. Resultados del residuo para el calor específico.

f_L	MATRIZ X		Valor observado	Valor previsto	Residuo de C_e	% Error
	$X_1 = T(^{\circ}\text{C})$	$X_2 = P(\text{bar})$	$Y = C_e \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \right)$	$\hat{Y} = \hat{C}_e \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}} \right)$		
1	-20	6	2.296	2.276	0.020	0.90%
1	-15	6	2.332	2.320	0.012	0.54%
1	-10	6	2.368	2.363	0.005	0.19%
1	-5	6	2.406	2.407	-0.001	0.05%
1	0	6	2.446	2.451	-0.005	0.21%
1	5	6	2.487	2.495	-0.008	0.32%
1	10	6	2.531	2.539	-0.008	0.31%
1	15	6	2.577	2.583	-0.006	0.23%
1	20	6	2.626	2.627	-0.001	0.03%
1	-20	6.5	2.296	2.276	0.020	0.89%
1	-15	6.5	2.331	2.320	0.011	0.49%
1	-10	6.5	2.368	2.364	0.004	0.19%
1	-5	6.5	2.405	2.407	-0.002	0.10%
1	0	6.5	2.445	2.451	-0.006	0.26%
1	5	6.5	2.486	2.495	-0.009	0.37%
1	10	6.5	2.53	2.539	-0.009	0.36%
1	15	6.5	2.576	2.583	-0.007	0.27%
1	20	6.5	2.625	2.627	-0.002	0.07%
1	24	6.5	2.666	2.662	0.004	0.15%
1	-20	7	2.295	2.276	0.019	0.84%
1	-15	7	2.331	2.320	0.011	0.48%
1	-10	7	2.367	2.364	0.003	0.14%
1	-5	7	2.405	2.408	-0.003	0.11%
1	0	7	2.444	2.452	-0.008	0.31%
1	5	7	2.485	2.495	-0.010	0.42%
1	10	7	2.529	2.539	-0.010	0.41%
1	15	7	2.575	2.583	-0.008	0.32%
1	20	7	2.623	2.627	-0.004	0.16%
1	25	7	2.676	2.671	0.005	0.19%
1	-20	7.5	2.295	2.276	0.019	0.83%
1	-15	7.5	2.33	2.320	0.010	0.43%
1	-10	7.5	2.366	2.364	0.002	0.09%
1	-5	7.5	2.404	2.408	-0.004	0.16%
1	0	7.5	2.443	2.452	-0.009	0.36%
1	5	7.5	2.484	2.496	-0.012	0.47%
1	10	7.5	2.528	2.539	-0.011	0.45%
1	15	7.5	2.573	2.583	-0.010	0.40%
1	20	7.5	2.622	2.627	-0.005	0.20%

1	25	7.5	2.674	2.671	0.003	0.11%
1	30	7.5	2.73	2.715	0.015	0.55%
1	-20	8	2.294	2.276	0.018	0.78%
1	-15	8	2.329	2.320	0.009	0.38%
1	-10	8	2.366	2.364	0.002	0.08%
1	-5	8	2.403	2.408	-0.005	0.21%
1	0	8	2.443	2.452	-0.009	0.36%
1	5	8	2.484	2.496	-0.012	0.47%
1	10	8	2.527	2.540	-0.013	0.50%
1	15	8	2.572	2.584	-0.012	0.45%
1	20	8	2.621	2.627	-0.006	0.25%
1	25	8	2.673	2.671	0.002	0.06%
1	30	8	2.729	2.715	0.014	0.51%
1	-20	8.5	2.294	2.277	0.017	0.77%
1	-15	8.5	2.329	2.320	0.009	0.37%
1	-10	8.5	2.365	2.364	0.001	0.03%
1	-5	8.5	2.403	2.408	-0.005	0.22%
1	0	8.5	2.442	2.452	-0.010	0.41%
1	5	8.5	2.483	2.496	-0.013	0.52%
1	10	8.5	2.526	2.540	-0.014	0.55%
1	15	8.5	2.571	2.584	-0.013	0.49%
1	20	8.5	2.619	2.628	-0.009	0.33%
1	25	8.5	2.671	2.672	-0.001	0.02%
1	30	8.5	2.727	2.715	0.012	0.43%
1	35	8.5	2.788	2.759	0.029	1.04%
1	-20	9	2.294	2.277	0.017	0.76%
1	-15	9	2.328	2.321	0.007	0.32%
1	-10	9	2.364	2.364	0.000	0.02%
1	-5	9	2.402	2.408	-0.006	0.26%
1	0	9	2.441	2.452	-0.011	0.46%
1	5	9	2.482	2.496	-0.014	0.57%
1	10	9	2.525	2.540	-0.015	0.59%
1	15	9	2.57	2.584	-0.014	0.54%
1	20	9	2.618	2.628	-0.010	0.37%
1	25	9	2.67	2.672	-0.002	0.06%
1	30	9	2.725	2.716	0.009	0.35%
1	35	9	2.786	2.759	0.027	0.96%
1	-20	9.5	2.293	2.277	0.016	0.71%
1	-15	9.5	2.328	2.321	0.007	0.31%
1	-10	9.5	2.364	2.365	-0.001	0.03%
1	-5	9.5	2.401	2.409	-0.008	0.31%
1	0	9.5	2.44	2.452	-0.012	0.51%
1	5	9.5	2.481	2.496	-0.015	0.61%
1	10	9.5	2.524	2.540	-0.016	0.64%

1	15	9.5	2.569	2.584	-0.015	0.58%
1	20	9.5	2.617	2.628	-0.011	0.42%
1	25	9.5	2.668	2.672	-0.004	0.15%
1	30	9.5	2.723	2.716	0.007	0.27%
1	35	9.5	2.784	2.760	0.024	0.88%
1	39	9.5	2.836	2.795	0.041	1.48%
1	-20	10	2.293	2.277	0.016	0.70%
1	-15	10	2.327	2.321	0.006	0.26%
1	-10	10	2.363	2.365	-0.002	0.08%
1	-5	10	2.401	2.409	-0.008	0.32%
1	0	10	2.439	2.453	-0.014	0.56%
1	5	10	2.48	2.497	-0.017	0.66%
1	10	10	2.523	2.540	-0.017	0.68%
1	15	10	2.568	2.584	-0.016	0.63%
1	20	10	2.616	2.628	-0.012	0.46%
1	25	10	2.667	2.672	-0.005	0.19%
1	30	10	2.722	2.716	0.006	0.22%
1	35	10	2.782	2.760	0.022	0.80%
1	40	10	2.847	2.804	0.043	1.54%

Fuente: Simulaciones de la ecuación de estado de SRK en Aspen HYSYS V11.0.

Los valores del residuo del calor específico que se muestran en la tabla 9, se obtuvieron haciendo la diferencia entre el valor observado y el valor previsto, es decir: $Y_i - \hat{Y}_i$. Por ejemplo, para calcular el residuo del calor específico a $P = 9$ bar y $T = -20$ °C, se realizó el siguiente cálculo: $(2.294 - 2.277) = 0.017$.

Para determinar el porcentaje de error correspondiente a este residuo, se realizó el siguiente cálculo:

$$\%Error = \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{\hat{Y}_i} \times 100.$$

$$\%Error = \frac{|2.294 - 2.277|}{2.277} \times 100 = 0.76 \%$$

Tabla 10. Valores observados para la conductividad térmica.

f_L	MATRIZ X		Matriz Y $Y = k \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$
	$X_1 = T(^{\circ}C)$	$X_2 = P(\text{bar})$	
1	-20	6	0.1157
1	-15	6	0.1134
1	-10	6	0.1111
1	-5	6	0.1087
1	0	6	0.1064
1	5	6	0.104
1	10	6	0.1016
1	15	6	0.09925
1	20	6	0.09685
1	-20	6.5	0.1157
1	-15	6.5	0.1134
1	-10	6.5	0.1111
1	-5	6.5	0.1087
1	0	6.5	0.1064
1	5	6.5	0.104
1	10	6.5	0.1016
1	15	6.5	0.09925
1	20	6.5	0.09685
1	24	6.5	0.09493
1	-20	7	0.1157
1	-15	7	0.1134
1	-10	7	0.1111
1	-5	7	0.1087
1	0	7	0.1064
1	5	7	0.104
1	10	7	0.1016
1	15	7	0.09925
1	20	7	0.09685
1	25	7	0.09445
1	-20	7.5	0.1157
1	-15	7.5	0.1134
1	-10	7.5	0.1111
1	-5	7.5	0.1087
1	0	7.5	0.1064
1	5	7.5	0.104
1	10	7.5	0.1016
1	15	7.5	0.09925
1	20	7.5	0.09685
1	25	7.5	0.09445

1	30	7.5	0.09202
1	-20	8	0.1157
1	-15	8	0.1134
1	-10	8	0.1111
1	-5	8	0.1087
1	0	8	0.1064
1	5	8	0.104
1	10	8	0.1016
1	15	8	0.09925
1	20	8	0.09685
1	25	8	0.09445
1	30	8	0.09202
1	-20	8.5	0.1157
1	-15	8.5	0.1134
1	-10	8.5	0.1111
1	-5	8.5	0.1087
1	0	8.5	0.1064
1	5	8.5	0.104
1	10	8.5	0.1016
1	15	8.5	0.09925
1	20	8.5	0.09685
1	25	8.5	0.09445
1	30	8.5	0.09202
1	35	8.5	0.08959
1	-20	9	0.1157
1	-15	9	0.1134
1	-10	9	0.1111
1	-5	9	0.1087
1	0	9	0.1064
1	5	9	0.104
1	10	9	0.1016
1	15	9	0.09925
1	20	9	0.09685
1	25	9	0.09445
1	30	9	0.09202
1	35	9	0.08959
1	-20	9.5	0.1157
1	-15	9.5	0.1134
1	-10	9.5	0.1111
1	-5	9.5	0.1087
1	0	9.5	0.1064
1	5	9.5	0.104
1	10	9.5	0.1016
1	15	9.5	0.09925

1	20	9.5	0.09685
1	25	9.5	0.09445
1	30	9.5	0.09202
1	35	9.5	0.08959
1	39	9.5	0.08763
1	-20	10	0.1157
1	-15	10	0.1134
1	-10	10	0.1111
1	-5	10	0.1087
1	0	10	0.1064
1	5	10	0.104
1	10	10	0.1016
1	15	10	0.09925
1	20	10	0.09685
1	25	10	0.09445
1	30	10	0.09202
1	35	10	0.08959
1	40	10	0.08713

Fuente: Simulaciones de la ecuación de estado de SRK en Aspen HYSYS V11.0.

Tabla 11. Resultados de la matriz β para la conductividad térmica.

Matriz $(X^T \cdot X)^{-1}$			Matriz $X^T \cdot Y$	Matriz β
0.4192	0.0005	-0.0506	10.45	0.1064
0.0005	0.0000	-0.0001	48.45	-0.0005
-0.0506	-0.0001	0.0063	84.99	0.0000

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Valores previstos para la conductividad térmica y cálculo de R^2 .

Matriz \hat{Y} $\hat{Y} = \hat{k} \left(\frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$	$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	R^2
0.1158	0.000000	0.0001	0.9999
0.1135	0.000000	0.0001	
0.1111	0.000000	0.0001	
0.1087	0.000000	0.0000	
0.1063	0.000000	0.0000	

0.1040	0.0000000	0.0000
0.1016	0.0000000	0.0000
0.0992	0.0000000	0.0000
0.0968	0.0000000	0.0000
0.1158	0.0000000	0.0001
0.1135	0.0000000	0.0001
0.1111	0.0000000	0.0001
0.1087	0.0000000	0.0000
0.1063	0.0000000	0.0000
0.1040	0.0000000	0.0000
0.1016	0.0000000	0.0000
0.0992	0.0000000	0.0000
0.0968	0.0000000	0.0000
0.0949	0.0000000	0.0001
0.1158	0.0000000	0.0001
0.1134	0.0000000	0.0001
0.1111	0.0000000	0.0001
0.1087	0.0000000	0.0000
0.1063	0.0000000	0.0000
0.1040	0.0000000	0.0000
0.1016	0.0000000	0.0000
0.0992	0.0000000	0.0000
0.0968	0.0000000	0.0000
0.0945	0.0000000	0.0001
0.1158	0.0000000	0.0001
0.1134	0.0000000	0.0001
0.1111	0.0000000	0.0001
0.1087	0.0000000	0.0000
0.1063	0.0000000	0.0000
0.1040	0.0000000	0.0000
0.1016	0.0000000	0.0000
0.0992	0.0000000	0.0000
0.0968	0.0000000	0.0000
0.0945	0.0000000	0.0001
0.0921	0.0000000	0.0001
0.1158	0.0000000	0.0001
0.1134	0.0000000	0.0001
0.1111	0.0000000	0.0001
0.1087	0.0000000	0.0000
0.1063	0.0000000	0.0000
0.1039	0.0000000	0.0000
0.1016	0.0000000	0.0000
0.0992	0.0000000	0.0000
0.0968	0.0000000	0.0000

0.0945	0.0000000	0.0001
0.0921	0.0000000	0.0001
0.1158	0.0000000	0.0001
0.1134	0.0000000	0.0001
0.1111	0.0000000	0.0001
0.1087	0.0000000	0.0000
0.1063	0.0000000	0.0000
0.1039	0.0000000	0.0000
0.1016	0.0000000	0.0000
0.0992	0.0000000	0.0000
0.0968	0.0000000	0.0000
0.0944	0.0000000	0.0001
0.0921	0.0000000	0.0001
0.0897	0.0000000	0.0002
0.1158	0.0000000	0.0001
0.1134	0.0000000	0.0001
0.1111	0.0000000	0.0001
0.1087	0.0000000	0.0000
0.1063	0.0000000	0.0000
0.1039	0.0000000	0.0000
0.1016	0.0000000	0.0000
0.0992	0.0000000	0.0000
0.0968	0.0000000	0.0000
0.0944	0.0000000	0.0001
0.0921	0.0000000	0.0001
0.0897	0.0000000	0.0002
0.1158	0.0000000	0.0001
0.1134	0.0000000	0.0001
0.1111	0.0000000	0.0001
0.1087	0.0000000	0.0000
0.1063	0.0000000	0.0000
0.1039	0.0000000	0.0000
0.1016	0.0000000	0.0000
0.0992	0.0000000	0.0000
0.0968	0.0000000	0.0000
0.0944	0.0000000	0.0001
0.0921	0.0000000	0.0001
0.0897	0.0000000	0.0002
0.0878	0.0000000	0.0003
0.1158	0.0000000	0.0001
0.1134	0.0000000	0.0001
0.1110	0.0000000	0.0001
0.1087	0.0000000	0.0000
0.1063	0.0000000	0.0000

0.1039	0.0000000	0.0000
0.1016	0.0000000	0.0000
0.0992	0.0000000	0.0000
0.0968	0.0000000	0.0000
0.0944	0.0000000	0.0001
0.0921	0.0000000	0.0001
0.0897	0.0000000	0.0002
0.0873	0.0000000	0.0003
	0.0000004	0.006

Fuente: *Elaboración propia.*

Los valores previstos para la conductividad térmica (\hat{k}), se calcularon haciendo uso de la ecuación: $\hat{k} = 0.1064 - 0.0005T$. Por ejemplo, si deseamos calcular la conductividad térmica a $T = 25\text{ °C}$ y $P = 7\text{ bar}$, se realizaría de la forma siguiente:

$$\hat{k} = 0.1064 - 0.0005 \times 25 \cong 0.094 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{°C}}$$

De los resultados obtenidos, se puede observar que la conductividad térmica, depende específicamente de la temperatura, la dependencia con la presión se puede considerar insignificante.

De esta forma se podría calcular la conductividad térmica para cualquier valor de la temperatura.

En la ecuación: $\hat{k} = 0.1064 - 0.0005T$, se debe observar que la unidad de medida de la conductividad térmica es $\left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{°C}}\right)$ y la temperatura debe estar en °C .

Para el cálculo de R^2 , se hizo uso de la ecuación (20). Para este caso $\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = 0.0000004$ y $\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = 0.006$. Entonces:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} = 1 - \frac{0.0000004}{0.006} \cong 0.9999.$$

Tabla 13. Resultados del residuo para la conductividad.

f_L	MATRIZ X		Valor observado	Valor previsto	Residuo de k	% Error
	$X_1 = T(^{\circ}\text{C})$	$X_2 = P(\text{bar})$	$Y = k \left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right)$	$\hat{Y} = \hat{k} \left(\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}} \right)$		
1	-20	6	0.1157	0.1158	-0.00013	0.11%
1	-15	6	0.1134	0.1135	-0.00006	0.05%
1	-10	6	0.1111	0.1111	0.00002	0.01%
1	-5	6	0.1087	0.1087	-0.00001	0.01%
1	0	6	0.1064	0.1063	0.00006	0.06%
1	5	6	0.104	0.1040	0.00004	0.03%
1	10	6	0.1016	0.1016	0.00001	0.01%
1	15	6	0.09925	0.0992	0.00003	0.03%
1	20	6	0.09685	0.0968	0.00000	0.01%
1	-20	6.5	0.1157	0.1158	-0.00013	0.11%
1	-15	6.5	0.1134	0.1135	-0.00005	0.05%
1	-10	6.5	0.1111	0.1111	0.00002	0.02%
1	-5	6.5	0.1087	0.1087	-0.00001	0.01%
1	0	6.5	0.1064	0.1063	0.00007	0.06%
1	5	6.5	0.104	0.1040	0.00004	0.04%
1	10	6.5	0.1016	0.1016	0.00001	0.01%
1	15	6.5	0.09925	0.0992	0.00004	0.04%
1	20	6.5	0.09685	0.0968	0.00001	0.01%
1	24	6.5	0.09493	0.0949	-0.00001	0.01%
1	-20	7	0.1157	0.1158	-0.00012	0.11%
1	-15	7	0.1134	0.1134	-0.00005	0.04%
1	-10	7	0.1111	0.1111	0.00002	0.02%
1	-5	7	0.1087	0.1087	0.00000	0.00%
1	0	7	0.1064	0.1063	0.00007	0.07%
1	5	7	0.104	0.1040	0.00004	0.04%
1	10	7	0.1016	0.1016	0.00002	0.02%
1	15	7	0.09925	0.0992	0.00004	0.04%
1	20	7	0.09685	0.0968	0.00001	0.01%
1	25	7	0.09445	0.0945	-0.00001	0.01%
1	-20	7.5	0.1157	0.1158	-0.00012	0.10%
1	-15	7.5	0.1134	0.1134	-0.00004	0.04%
1	-10	7.5	0.1111	0.1111	0.00003	0.03%
1	-5	7.5	0.1087	0.1087	0.00000	0.00%
1	0	7.5	0.1064	0.1063	0.00008	0.07%
1	5	7.5	0.104	0.1040	0.00005	0.05%
1	10	7.5	0.1016	0.1016	0.00002	0.02%
1	15	7.5	0.09925	0.0992	0.00005	0.05%
1	20	7.5	0.09685	0.0968	0.00002	0.02%

1	25	7.5	0.09445	0.0945	-0.00001	0.01%
1	30	7.5	0.09202	0.0921	-0.00006	0.07%
1	-20	8	0.1157	0.1158	-0.00011	0.10%
1	-15	8	0.1134	0.1134	-0.00004	0.04%
1	-10	8	0.1111	0.1111	0.00003	0.03%
1	-5	8	0.1087	0.1087	0.00001	0.01%
1	0	8	0.1064	0.1063	0.00008	0.08%
1	5	8	0.104	0.1039	0.00005	0.05%
1	10	8	0.1016	0.1016	0.00003	0.03%
1	15	8	0.09925	0.0992	0.00005	0.05%
1	20	8	0.09685	0.0968	0.00002	0.02%
1	25	8	0.09445	0.0945	0.00000	0.00%
1	30	8	0.09202	0.0921	-0.00006	0.07%
1	-20	8.5	0.1157	0.1158	-0.00011	0.09%
1	-15	8.5	0.1134	0.1134	-0.00004	0.03%
1	-10	8.5	0.1111	0.1111	0.00004	0.03%
1	-5	8.5	0.1087	0.1087	0.00001	0.01%
1	0	8.5	0.1064	0.1063	0.00008	0.08%
1	5	8.5	0.104	0.1039	0.00006	0.06%
1	10	8.5	0.1016	0.1016	0.00003	0.03%
1	15	8.5	0.09925	0.0992	0.00005	0.06%
1	20	8.5	0.09685	0.0968	0.00003	0.03%
1	25	8.5	0.09445	0.0944	0.00000	0.00%
1	30	8.5	0.09202	0.0921	-0.00006	0.06%
1	35	8.5	0.08959	0.0897	-0.00011	0.13%
1	-20	9	0.1157	0.1158	-0.00010	0.09%
1	-15	9	0.1134	0.1134	-0.00003	0.03%
1	-10	9	0.1111	0.1111	0.00004	0.04%
1	-5	9	0.1087	0.1087	0.00002	0.01%
1	0	9	0.1064	0.1063	0.00009	0.08%
1	5	9	0.104	0.1039	0.00006	0.06%
1	10	9	0.1016	0.1016	0.00004	0.04%
1	15	9	0.09925	0.0992	0.00006	0.06%
1	20	9	0.09685	0.0968	0.00003	0.03%
1	25	9	0.09445	0.0944	0.00001	0.01%
1	30	9	0.09202	0.0921	-0.00005	0.06%
1	35	9	0.08959	0.0897	-0.00011	0.12%
1	-20	9.5	0.1157	0.1158	-0.00010	0.09%
1	-15	9.5	0.1134	0.1134	-0.00003	0.02%
1	-10	9.5	0.1111	0.1111	0.00005	0.04%
1	-5	9.5	0.1087	0.1087	0.00002	0.02%
1	0	9.5	0.1064	0.1063	0.00009	0.09%
1	5	9.5	0.104	0.1039	0.00007	0.06%
1	10	9.5	0.1016	0.1016	0.00004	0.04%

1	15	9.5	0.09925	0.0992	0.00006	0.06%
1	20	9.5	0.09685	0.0968	0.00004	0.04%
1	25	9.5	0.09445	0.0944	0.00001	0.01%
1	30	9.5	0.09202	0.0921	-0.00005	0.05%
1	35	9.5	0.08959	0.0897	-0.00010	0.11%
1	39	9.5	0.08763	0.0878	-0.00016	0.19%
1	-20	10	0.1157	0.1158	-0.00009	0.08%
1	-15	10	0.1134	0.1134	-0.00002	0.02%
1	-10	10	0.1111	0.1110	0.00005	0.05%
1	-5	10	0.1087	0.1087	0.00003	0.02%
1	0	10	0.1064	0.1063	0.00010	0.09%
1	5	10	0.104	0.1039	0.00007	0.07%
1	10	10	0.1016	0.1016	0.00005	0.04%
1	15	10	0.09925	0.0992	0.00007	0.07%
1	20	10	0.09685	0.0968	0.00004	0.04%
1	25	10	0.09445	0.0944	0.00002	0.02%
1	30	10	0.09202	0.0921	-0.00004	0.05%
1	35	10	0.08959	0.0897	-0.00010	0.11%
1	40	10	0.08713	0.0873	-0.00019	0.21%

Fuente: Simulaciones de la ecuación de estado de SRK en Aspen HYSYS V11.0.

Los valores del residuo de la conductividad térmica que se muestran en la tabla 13, se obtuvieron haciendo la diferencia entre el valor observado y el valor previsto, es decir: $Y_i - \hat{Y}_i$. Por ejemplo, para calcular el residuo del calor específico a $P = 10$ bar y $T = -20$ °C, se realizó el siguiente cálculo: $(0.1157 - 0.1158) = -0.00009$.

Para determinar el porcentaje de error correspondiente a este residuo, se realizó el siguiente cálculo:

$$\%Error = \frac{|Y_i - \hat{Y}_i|}{\hat{Y}_i} \times 100.$$

$$\%Error = \frac{|0.1157 - 0.1158|}{0.1158} \times 100 = 0.08 \%$$

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

Las tablas 2, 6 y 10, muestran los valores observados de la densidad, calor específico y conductividad térmica, respectivamente; dichos valores han sido obtenidos de las 101 simulaciones que se han realizado de la ecuación de Soave-Redlich-Kwong (SRK), en el programa Aspen HYSYS V11.0. En Osinergmin (2012, p. 8), se menciona que el gas de petróleo se licua a bajas presiones (6 a 10 bar) y temperaturas (-20 a 40 °C), dependiendo de la mezcla propano-butano. Las 101 simulaciones que se realizaron, se llevaron a cabo a estas condiciones de presión y temperatura, resultando en todas estas, que la fracción de líquido (f_L) es igual a 1, lo cual indica que el gas de petróleo se encuentra en fase líquida, esto también prueba que los resultados obtenidos en la presente investigación son válidos.

En las tablas 3, 7 y 11, se indican los valores obtenidos para la matriz β , de la densidad, calor específico y conductividad térmica, respectivamente; estos valores fueron obtenidos haciendo el producto de las matrices $(X^T X)^{-1}$ y $X^T Y$, tal como lo indica la ecuación (*5).

Las tablas 4, 8 y 12, se muestran los valores previstos de la densidad, calor específico y conductividad térmica; dichos valores fueron obtenidos mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Densidad: } \hat{\rho} = 562.33 - 1.28T + 0.04P, \quad R^2 = 0.9986.$$

$$\text{Calor específico: } \hat{C}_e = 2.449 + 0.0088T + 0.0004P, \quad R^2 = 0.9924.$$

$$\text{Conductividad térmica: } \hat{k} = 0.1064 - 0.0005T, \quad R^2 = 0.9999.$$

También se puede observar en las tablas 4, 8 y 12, que, en las ecuaciones obtenidas para la densidad, calor específico y conductividad térmica, el coeficiente de determinación R^2 , es muy cercano a 1, esto indica el alto grado de correlación que hay de las tres variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica) con la presión y temperatura. Esto también prueba la hipótesis general: “existen las relaciones entre las variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica), con

la presión y la temperatura del gas licuado de petróleo”. Las dos primeras relaciones, se pueden aplicar a casos reales. Por ejemplo, si se desea determinar el volumen de un recipiente el cual contiene 1000 kg de gas licuado de petróleo a 8 bar y 25 °C. Dicho volumen (V), se calcularía mediante siguiente ecuación:

$$V = \frac{m}{\hat{\rho}}$$

Donde $m = 1000$ kg, entonces:

$$V = \frac{1000 \text{ kg}}{(562.33 - 1.28 \times 25 + 0.04 \times 8) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = \frac{1000 \text{ kg}}{530.65 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 1.88 \text{ m}^3.$$

Otro proceso real, es si quisiéramos enfriar los 1000 kg de gas licuado de petróleo que está a 8 bar y 25 °C, hasta -5 °C. Este proceso de enfriamiento es isobárico, es decir la presión se mantendrá a 8 bar. En este proceso se requiere determinar la cantidad de energía (E), lo cual se calcularía de la forma siguiente:

$$E = m \int_{T_1}^{T_2} \hat{C}_e dT$$

La ecuación del calor específico a 8 bar es:

$$\hat{C}_e = 2.449 + 0.0088T + 0.0004 \times 8 = 2.4522 + 0.0088T.$$

$$E = 1000 \int_{25}^{-5} (2.4522 + 0.0088T) dT$$

$$E = 1000 \times \left\{ 2.4522(-5 - 25) + \frac{0.0088}{2} [(-5)^2 - (25)^2] \right\}$$

$$E = 1000 \times (-73.566 - 2.64) = -76206 \text{ kJ}.$$

El signo negativo, indica que el gas licuado de petróleo, en el proceso de enfriamiento, pierde energía.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

- Se determinó la relación entre la densidad con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo. Dicha relación es: $\hat{\rho} = 562.33 - 1.28T + 0.04P$, donde la unidad de medida de la densidad es kg/m^3 , la temperatura debe estar en $^{\circ}\text{C}$ y la presión en bar. Esta ecuación indica, que para temperaturas mayores de 0°C , la densidad aumenta al aumentar la presión y disminuye al aumentar la temperatura.
- Se determinó la relación entre el calor específico con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo. Dicha relación es: $\hat{C}_e = 2.449 + 0.0088T + 0.0004P$, donde el calor específico se mide en $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}}\right)$, la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ y la presión en bar. Esta ecuación indica, que para temperaturas mayores de 0°C , el calor específico aumenta al aumentar la presión y la temperatura.
- Se determinó la relación entre la conductividad térmica con la temperatura del gas licuado de petróleo. Dicha relación es: $\hat{k} = 0.1064 - 0.0005T$, donde la conductividad térmica se mide en $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}}\right)$ y la temperatura debe estar en $^{\circ}\text{C}$. Esta ecuación nos indica, que para temperaturas mayores de 0°C , la conductividad térmica disminuye, al aumentar la temperatura.
- En las ecuaciones obtenidas para la densidad, calor específico y conductividad térmica, el coeficiente de determinación R^2 , es muy cercano a 1, esto indica el alto grado de correlación que hay de las tres variables termofísicas con la presión y temperatura.
- Se ha podido observar que la determinación de las propiedades termofísicas con la presión y temperatura, pueden servir para dimensionar la capacidad de los equipos que se requieren para almacenar el gas licuado de petróleo (en el caso del volumen), además permiten determinar la cantidad de energía que se requiere en los procesos de enfriamiento (en el caso del calor específico). De esta forma se concluye el presente trabajo de tesis, donde se está probando cada una de las hipótesis específicas y la hipótesis general y conjuntamente también se está cumpliendo con cada uno de los objetivos específicos y el objetivo general.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar otros estudios, donde se determine las relaciones entre propiedades termodinámicas como la entalpía y la entropía, con la presión y temperatura.
- Se recomienda realizar otros estudios, donde se incluya en las relaciones entre propiedades termofísicas, la composición del gas licuado de petróleo.
- Se recomienda hacer uso de la ecuación: $\hat{\rho} = 562.33 - 1.28T + 0.04P$, para el dimensionamiento de tanques de almacenamiento del gas licuado de petróleo, teniendo en cuenta que la unidad de medida de la densidad es kg/m^3 , la temperatura debe estar en $^{\circ}\text{C}$ y la presión en bar.
- Se recomienda hacer uso de la ecuación: $\hat{C}_e = 2.449 + 0.0088T + 0.0004P$, donde el calor específico se mide en $\left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}\right)$, la temperatura en $^{\circ}\text{C}$ y la presión en bar, esto con la finalidad de determinar la capacidad de los equipos que se requieren ya sea en los procesos de enfriamiento o calentamiento del gas licuado de petróleo.
- Se recomienda hacer uso de la ecuación: $\hat{k} = 0.1064 - 0.0005T$, donde la conductividad térmica se mide en $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}\right)$ y la temperatura debe estar en $^{\circ}\text{C}$, cuando se tenga que aplicar los mecanismos de transferencia de calor para aislar las tuberías que transportan el gas licuado de petróleo.
- Se debe fomentar para que estos tipos de trabajos, se sigan realizando entre los alumnos, egresados y docentes de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), donde se haga el uso de herramientas como los simuladores de procesos (Aspen HYSYS V11.0) y los métodos numéricos, ya que esto permite realizar modelamientos para determinar con gran exactitud las relaciones matemáticas entre las variables que intervienen y que sirven para optimizar los diversos procesos industriales.

CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN

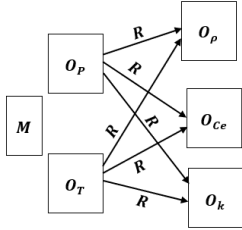
- CARRASCO, Luis. Métodos Numéricos Aplicados a la Ingeniería. 4a. ed. Lima, Perú: Empresa Editora Macro, 2011. pp. 109-111.
ISBN: 978-612-304-028-4.
- CHAPRA, Steven y CANALE, Raymond. Métodos numéricos para ingenieros. 5a. ed. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2007. pp. 486-489.
ISBN-13: 978-970-10-6114-5.
ISBN-10: 970-10-6114-4.
- FACHÍN, Tania y RIMACHI, Kevin. “Simulación y análisis de la eficiencia térmica del ciclo de Rankine usando el software Aspen HYSYS V8.0”. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2019. pp. 13-14.
- FELDER, Richard y ROUSSEAU, Ronald. Principios elementales de los procesos químicos. 3a. ed. México: Limusa Wiley, 2004. pp. 44, 55, 61.
ISBN: 968-18-6169-8.
- GEANKOPLIS, Christie. Procesos de transporte y principios de separación. 4a. ed. México: Compañía Editorial Continental, 2006. pp. 15, 245-246.
ISBN: 970-24-0856-3.
- MARIÑO, Thayset, LABRADA, Benigno y SÁNCHEZ, Estela. Simulación de la unidad de estabilización de la refinería “Hermanos Díaz” empleando el simulador Aspen HYSYS 8.0, Santiago de Cuba-Cuba. Tecnología Química, 36 (3): 354-370, 2016.
ISSN: 0041-8420.
- MONGE, Miguel. “Proyecto de Instalación de una Planta Envasadora de Gas Licuado de Petróleo en la ciudad de Arequipa”. Tesis para optar el Título

Profesional de Ingeniero Industrial. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2002. pp. i-ii.

- OSINERGMIN. El gas natural y sus diferencias con el GLP. Lima, Perú: Teps Group S.A.C, 2012. 8 p.
- RIVERA, Roxana y GÓMEZ, Julio. “Implementación de mejoras en el proceso de envasado de GLP aplicando herramientas de ingeniería de métodos. Caso: Alfa Gas S.A.”. Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Industrial y de Gestión Empresarial. Lima, Perú: Universidad Wiener, Facultad de Ingeniería, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Industrial y de Gestión Empresarial, 2015. i p.
- SMITH, J. M., VAN NESS, H. C. y ABBOTT, M. M. Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química. 7a. ed. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2007. pp. 66, 225.
ISBN-13: 978-970-10-6147-3.
ISBN-10: 970-10-6147-0.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>Problema general</p> <p>¿Cuáles son las relaciones entre las variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica), con la presión y la temperatura del gas licuado de petróleo?</p> <p>Problemas específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cuál es la relación entre la densidad con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo? • ¿Cuál es la relación entre el calor específico con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo? • ¿Cuál es la relación entre la conductividad térmica con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo? 	<p>Objetivo general</p> <p>Determinar las relaciones entre las variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica), con la presión y la temperatura del gas licuado de petróleo.</p> <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar la relación entre la densidad con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo. • Determinar la relación entre el calor específico con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo. • Determinar la relación entre la conductividad térmica con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo. 	<p>Hipótesis general</p> <p>Existen las relaciones entre las variables termofísicas (densidad, calor específico y conductividad térmica), con la presión y la temperatura del gas licuado de petróleo.</p> <p>Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existe relación entre la densidad con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo. • Existe relación entre el calor específico con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo. • Existe relación entre la conductividad térmica con la presión y temperatura del gas licuado de petróleo. 	<p>VARIABLES independientes</p> <p>T: temperatura</p> <p>P: Presión</p> <p>VARIABLES dependientes</p> <p>ρ: densidad</p> <p>C_e: calor específico</p> <p>k: conductividad térmica</p>	<p>$^{\circ}\text{C}$</p> <p>bar</p> <p>kg/m^3</p> <p>$\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$</p> <p>$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$</p>	<p>Tipo de investigación</p> <p>la presente investigación tiene enfoque cuantitativo con nivel de profundización predictivo y tipo de diseño correlacional no experimental.</p>  <p>Figura 1. Esquema del diseño de investigación.</p> <p>Población</p> <p>Lo representan las múltiples simulaciones que se puedan realizar de acuerdo a las condiciones de presión y temperatura, en las que el gas de petróleo se encuentre en estado líquido.</p> <p>Muestra</p> <p>Para determinar la relación de cada variable termofísica con la presión y temperatura, se realizó un total de 101 simulaciones. Entonces, como son tres variables termofísicas, la muestra total tendrá un tamaño de 303.</p>

Anexo 2. Determinación del producto matricial $(X^T X)^{-1}$ para la densidad.

H17 {=MINVERSA(MMULT(TRANSPONER(C18:E118);C18:E118))}									
	C	D	E	F	G	H	I	J	K
16	MATRIZ X			Matriz Y	Matriz $(X^T X)^{-1}$			Matriz $X^T \cdot Y$	Matriz β
17	f_L	$X_1 = (T \text{ °C})$	$X_2 = P(\text{bar})$	$Y = \rho(\text{kg/m}^3)$	0.4192	0.0005	-0.0506	56066.30	562.33
18	1	-20	6	586.8	0.0005	0.0000	-0.0001	295720.50	-1.28
19	1	-15	6	581	-0.0506	-0.0001	0.0063	456338.25	0.04
20	1	-10	6	575.1					
21	1	-5	6	569.1					
22	1	0	6	563	$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. (*5)$		$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$		
23	1	5	6	556.7			$\hat{\rho} = 562.33 - 1.28T + 0.04P$		
24	1	10	6	550.3					
25	1	15	6	543.8					
26	1	20	6	537					
27	1	-20	6.5	586.9			$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$		
28	1	-15	6.5	581.1					

Anexo 3. Determinación del producto matricial $X^T Y$ para la densidad.

J17 {=MMULT(TRANSPONER(C18:E118);F18:F118)}									
	C	D	E	F	G	H	I	J	K
16	MATRIZ X			Matriz Y	Matriz $(X^T X)^{-1}$			Matriz $X^T \cdot Y$	Matriz β
17	f_L	$X_1 = (T \text{ °C})$	$X_2 = P(\text{bar})$	$Y = \rho(\text{kg/m}^3)$	0.4192	0.0005	-0.0506	56066.30	562.33
18	1	-20	6	586.8	0.0005	0.0000	-0.0001	295720.50	-1.28
19	1	-15	6	581	-0.0506	-0.0001	0.0063	456338.25	0.04
20	1	-10	6	575.1					
21	1	-5	6	569.1					
22	1	0	6	563	$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (*5)$		$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$		
23	1	5	6	556.7				$\hat{\rho} = 562.33 - 1.28T + 0.04P$	
24	1	10	6	550.3					
25	1	15	6	543.8					
26	1	20	6	537					
27	1	-20	6.5	586.9				$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$	
28	1	-15	6.5	581.1					

Anexo 4. Determinación de la matriz β para la densidad.

K17 {=MMULT(G17:I19;J17:J19)}									
	C	D	E	F	G	H	I	J	K
16	MATRIZ X			Matriz Y	Matriz $(X^T X)^{-1}$			Matriz $X^T Y$	Matriz β
17	f_L	$X_1 = (T \text{ } ^\circ\text{C})$	$X_2 = P \text{ (bar)}$	$Y = \rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	0.4192	0.0005	-0.0506	56066.30	562.33
18	1	-20	6	586.8	0.0005	0.0000	-0.0001	295720.50	-1.28
19	1	-15	6	581	-0.0506	-0.0001	0.0063	456338.25	0.04
20	1	-10	6	575.1					
21	1	-5	6	569.1					
22	1	0	6	563	$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (*5)$		$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$		
23	1	5	6	556.7			$\hat{\rho} = 562.33 - 1.28T + 0.04P$		
24	1	10	6	550.3					
25	1	15	6	543.8					
26	1	20	6	537					
27	1	-20	6.5	586.9			$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$		
28	1	-15	6.5	581.1					

Anexo 5. Determinación de R^2 para la ecuación de la densidad.

P18 : X ✓ fx =1-(N119/O119)										
	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
13										
14										
15										
16	Matriz $(X^T X)^{-1}$			Matriz $X^T Y$	Matriz β	\bar{Y}	Matriz \hat{Y}	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (20)$		
17	0.4192	0.0005	-0.0506	56066.30	562.33	555.1119	$\hat{Y} = \rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	R^2
18	0.0005	0.0000	-0.0001	295720.50	-1.28		588.19	1.922	1004.1369	0.9986
19	-0.0506	-0.0001	0.0063	456338.25	0.04		581.79	0.621	670.1947	
20							575.39	0.084	399.5249	
21							568.99	0.012	195.6675	
22	$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (*5)$		$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$				562.59	0.166	62.2224	
23			$\hat{\rho} = 562.33 - 1.28T + 0.04P$				556.19	0.255	2.5221	
24							549.80	0.254	23.1542	
25							543.40	0.162	127.9587	
26							537.00	0.000	328.0402	
27							588.21	1.712	1010.4845	
28							581.81	0.504	675.3823	

Anexo 6. Determinación del producto matricial $X^T Y$ para el calor específico.

J17 {=MMULT(TRANSPONER(C18:E118);F18:F118)}									
	C	D	E	F	G	H	I	J	K
15									
16	MATRIZ X			Matriz Y	Matriz $(X^T X)^{-1}$			Matriz $X^T \cdot Y$	Matriz β
17	f_L	$X_1 = (T \text{ } ^\circ\text{C})$	$X_2 = P \text{ (bar)}$	$Y = C_e \text{ (kJ/kg. } ^\circ\text{C)}$	0.4192	0.0005	-0.0506	252.90	2.4490
18	1	-20	6	2.296	0.0005	0.0000	-0.0001	1746.18	0.0088
19	1	-15	6	2.332	-0.0506	-0.0001	0.0063	2064.40	0.0004
20	1	-10	6	2.368					
21	1	-5	6	2.406					
22	1	0	6	2.446					
23	1	5	6	2.487	$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (*5)$			$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$	$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$
24	1	10	6	2.531					
25	1	15	6	2.577				$\hat{C}_e = 2.449 + 0.0088T + 0.0004P$	
26	1	20	6	2.626					
27	1	-20	6.5	2.296					
28	1	-15	6.5	2.331					

Anexo 7. Determinación de la matriz β para el calor específico.

	C	D	E	F	G	H	I	J	K
15									
16		MATRIZ X		Matriz Y	Matriz $(X^T X)^{-1}$			Matriz $X^T \cdot Y$	Matriz β
17	f_L	$X_1 = (T \text{ } ^\circ\text{C})$	$X_2 = P \text{ (bar)}$	$Y = C_e \text{ (kJ/kg.}^\circ\text{C)}$	0.4192	0.0005	-0.0506	252.90	2.4490
18	1	-20	6	2.296	0.0005	0.0000	-0.0001	1746.18	0.0088
19	1	-15	6	2.332	-0.0506	-0.0001	0.0063	2064.40	0.0004
20	1	-10	6	2.368					
21	1	-5	6	2.406					
22	1	0	6	2.446					
23	1	5	6	2.487	$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. \text{ (*5)}$				$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$
24	1	10	6	2.531					$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$
25	1	15	6	2.577				$\hat{C}_e = 2.449 + 0.0088T + 0.0004P$	
26	1	20	6	2.626					
27	1	-20	6.5	2.296					
28	1	-15	6.5	2.331					

Anexo 8. Determinación de R^2 para el calor específico.

	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
12										
13										
14								$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (20)$		
15										
16	Matriz $(X^T X)^{-1}$			Matriz $X^T Y$	Matriz β	\bar{Y}	Matriz \hat{Y}			
17	0.4192	0.0005	-0.0506	252.90	2.4490	2.5039	$\hat{Y} = Ce \text{ (kJ/kg.}^\circ\text{C)}$	$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	R^2
18	0.0005	0.0000	-0.0001	1746.18	0.0088		2.28	0.00042	0.0432	0.9924
19	-0.0506	-0.0001	0.0063	2064.40	0.0004		2.32	0.00016	0.0296	
20							2.36	0.00002	0.0185	
21							2.41	0.00000	0.0096	
22			$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$		$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$		2.45	0.00003	0.0034	
23	$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (*5)$						2.50	0.00007	0.0003	
24							2.54	0.00006	0.0007	
25		$\hat{C}_e = 2.449 + 0.0088T + 0.0004P$					2.58	0.00003	0.0053	
26							2.63	0.00000	0.0149	

Anexo 9. Determinación del producto matricial $X^T Y$ para la conductividad térmica.

J17 : X ✓ fx {=MMULT(TRANSPONER(C18:E118);F18:F118)}									
	C	D	E	F	G	H	I	J	K
15									
16	MATRIZ X			Matriz Y	Matriz $(X^T X)^{-1}$			Matriz $X^T \cdot Y$	Matriz β
17	f_L	$X_1 = (T \text{ °C})$	$X_2 = P (\text{bar})$	$Y = k (\text{W/m. °C})$	0.4192	0.0005	-0.0506	10.45	0.1064
18	1	-20	6	0.1157	0.0005	0.0000	-0.0001	48.45	-0.0005
19	1	-15	6	0.1134	-0.0506	-0.0001	0.0063	84.99	0.0000
20	1	-10	6	0.1111					
21	1	-5	6	0.1087					
22	1	0	6	0.1064					
23	1	5	6	0.104					
24	1	10	6	0.1016	$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. (*5)$				
25	1	15	6	0.09925					
26	1	20	6	0.09685					
27	1	-20	6.5	0.1157					
28	1	-15	6.5	0.1134					

$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$ $\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$

$\hat{k} = 0.1064 - 0.0005T$

Anexo 10. Determinación de la matriz β para la conductividad térmica.

K17 {=MMULT(G17:I19;J17:J19)}									
	C	D	E	F	G	H	I	J	K
15									
16	MATRIZ X			Matriz Y	Matriz $(X^T X)^{-1}$			Matriz $X^T \cdot Y$	Matriz β
17	f_L	$X_1 = (T \text{ °C})$	$X_2 = P(\text{bar})$	$Y = k(\text{W/m. °C})$	0.4192	0.0005	-0.0506	10.45	0.1064
18	1	-20	6	0.1157	0.0005	0.0000	-0.0001	48.45	-0.0005
19	1	-15	6	0.1134	-0.0506	-0.0001	0.0063	84.99	0.0000
20	1	-10	6	0.1111					
21	1	-5	6	0.1087					
22	1	0	6	0.1064					
23	1	5	6	0.104					
24	1	10	6	0.1016					
25	1	15	6	0.09925					
26	1	20	6	0.09685					
27	1	-20	6.5	0.1157					
28	1	-15	6.5	0.1134					

$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (*5)$

$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$

$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$

$\hat{k} = 0.1064 - 0.0005T$

Anexo 11. Determinación de R^2 para la conductividad térmica.

	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
15										
16	Matriz $(X^T X)^{-1}$			Matriz $X^T \cdot Y$	Matriz β	\bar{Y}	Matriz \hat{Y}			
17	0.4192	0.0005	-0.0506	10.45	0.1064	0.1035	$\hat{Y} = k(\text{W/m. } ^\circ\text{C})$	$(Y_i - \hat{Y}_i)^2$	$(Y_i - \bar{Y})^2$	R^2
18	0.0005	0.0000	-0.0001	48.45	-0.0005		0.1158	0.000000	0.0001	0.9999
19	-0.0506	-0.0001	0.0063	84.99	0.0000		0.1135	0.000000	0.0001	
20							0.1111	0.000000	0.0001	
21							0.1087	0.000000	0.0000	
22			$\hat{Y} = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$		$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix}$		0.1063	0.000000	0.0000	
23	$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y. (*5)$						0.1040	0.000000	0.0000	
24			$\hat{k} = 0.1064 - 0.0005T$				0.1016	0.000000	0.0000	
25							0.0992	0.000000	0.0000	
26							0.0968	0.000000	0.0000	
27							0.1158	0.000000	0.0001	
28							0.1135	0.000000	0.0001	
29							0.1111	0.000000	0.0001	