



UNAP



FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**DETERMINACIÓN DE ECUACIONES ENTRE VARIABLES
TERMODINÁMICAS: RELACIÓN DE EXPANSIÓN,
PRESIÓN Y TEMPERATURA, EN LA
COMPRESIÓN Y LICUADO
DEL GAS NATURAL**

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

PRESENTADO POR:

MAGALI ELIZABETH VICENTE REYES

JACK LALO PORTAL HUAYMACARI

ASESORA:

ING. KARENTH ELENA RAMÍREZ ÁLVAREZ, MSc.

IQUITOS, PERÚ

2021



UNAP

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA AMAZONIA PERUANA
Facultad de Ingeniería Química



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 009-CGT-FIQ-UNAP

En Iquitos, a los treinta días del mes de diciembre del dos mil veinte y uno, a horas 11 am, se dio inicio a la sustentación pública de la Tesis titulada: **“DETERMINACIÓN DE ECUACIONES ENTRE VARIABLES TERMODINÁMICAS: RELACIÓN DE EXPANSIÓN, PRESIÓN Y TEMPERATURA, EN LA COMPRESIÓN Y LICUADO DEL GAS NATURAL”**, aprobado con Resolución Decanal N° 236-2021-FIQ-UNAP, presentado por los Bachilleres: **Magali Elizabeth Vicente Reyes y Jack Lalo Portal Huaymacari**, 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° 104-2021-FIQ-UNAP está integrado por:

- | | |
|---|------------|
| Ing. JUAN MANUEL ROJAS AMASIFEN, Dr. | Presidente |
| Ing. CARMEN PATRICIA CERDEÑA DEL ÁGUILA, Dra. | Miembro |
| Ing. DANIEL DIOMEDES CARRASCO MONTAÑEZ, MSc. | Miembro |

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

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

La sustentación pública y la tesis ha sido: Aprobada con la calificación Buena, estando los bachilleres aptos para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Químico**. Siendo las 12:29 p.m. se dio por terminado el acto de sustentación

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

.....
 Ing. CARMEN PATRICIA CERDEÑA DEL ÁGUILA, Dra.
 Miembro

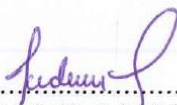
.....
 Ing. DANIEL DIOMEDES CARRASCO MONTAÑEZ, MSc.
 Miembro

.....
 Ing. KARENTH ELENA RAMÍREZ ÁLVAREZ, MSc.
 Asesora

JURADO Y ASESOR



.....
Ing. Juan Manuel Rojas Amasifen. Dr.
Presidente



.....
Ing. Carmen Patricia Cerdeña del Águila. Dra.
Miembro



.....
Ing. Daniel Diomedes Carrasco Montañez. MSc.
Miembro



.....
Ing. Karenth Elena Ramírez Álvarez. MSc.
Asesora

DEDICATORIA

Dedico con todo mi corazón mi tesis a mi madre Rita, mis tías Ana y Edith, sin sus consejos y ejemplos no hubiera logrado llegar hasta el final.

A mi esposo e hijos por estar siempre a mi lado, por darme la confianza y el tiempo necesario para realizarme como profesional.

Magali Elizabeth Vicente Reyes

Dedico mi tesis a mi madre por su apoyo incondicional en este maravilloso proyecto realizado en el libro de mi vida y desearme siempre lo mejor en cada paso que doy, pues sin ello no hubiera llegado a cumplir mis metas pactadas hasta ahora.

Jack Lalo Portal Huaymacari

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme la oportunidad de completar un escalón más en mi carrera profesional.

A mi madre, por su apoyo incondicional en todo el largo camino de mi vida estudiantil y profesional.

A mi esposo, por su perseverancia y apoyo continuo en esta etapa de mi vida.

Agradezco a la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana por haberme aceptado ser parte de ella, a los diferentes docentes de la Facultad de Ingeniería Química que brindaron sus conocimientos y apoyo para seguir adelante.

Magali Elizabeth Vicente Reyes

A Dios, por darme fuerzas para seguir luchando todos los días de mi vida.

A mi madre, por amarme tanto a pesar de las dificultades que me pudo poner la vida y luchar juntos para salir adelante.

A mi familia y amigos que me apoyaron, en lo mucho y en lo poco para lograr este maravilloso proyecto de formación profesional.

A los docentes de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana por haberme inculcado conocimientos de bien y formarme como buen profesional.

Jack Lalo Portal Huaymacari

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	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Bases teóricas	4
1.3. Definición de términos básicos	6
CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES	8
2.1. Formulación de la hipótesis	8
2.2. Variables y su operacionalización	8
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	10
3.1. Tipo y diseño	10
3.2. Diseño muestral	11
3.3. Procedimientos de recolección de datos	11
3.4. Procesamiento y análisis de datos	14
3.5. Aspectos éticos	14
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	15
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN	21

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	22
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	23
CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN	24
ANEXOS	25
Anexo 1. Matriz de consistencia.	26
Anexo 2. Hoja de cálculo de Excel para el GNC.	27
Anexo 3. Hoja de cálculo de Excel para el GNL.	28
Anexo 4. Esquema de las simulaciones realizadas en Aspen HYSYS V11.0 para el GNC.	29
Anexo 5. Esquema de las simulaciones realizadas en Aspen HYSYS V11.0 para el GNL.	30
Anexo 3. Hoja de cálculo de Excel para el GNL	28
Anexo 4. Esquema de las simulaciones realizadas en Aspen HYSYS V11.0 para el GNC	29
Anexo 5. Esquema de las simulaciones realizadas en Aspen HYSYS V11.0 para el GNL	30

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Operacionalización de las variables	9
Tabla 2. Resultados de la densidad y la relación de expansión para el GNC	15
Tabla 3. Resumen de las regresiones para obtener la relación entre R_E y P	18
Tabla 4. Resultados de la densidad y la relación de expansión para el GNL	19

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema del diseño de investigación	10
Figura 2. Ingreso de componentes a Aspen HYSYS V11.0	12
Figura 3. Selección de la ecuación de Peng-Robinson	12
Figura 4. Ingreso del valor de las condiciones: presión, temperatura y flujo	13
Figura 5. Ingreso del valor de la condición: fracción molar	13
Figura 6. Resultado de la densidad	14
Figura 7. Primera regresión para obtener la relación entre R_E y P	16
Figura 8. Segunda regresión para obtener la relación entre R_E y P	16
Figura 9. Tercera regresión para obtener la relación entre R_E y P	17
Figura 10. Cuarta regresión para obtener la relación entre R_E y P	17
Figura 11. Regresión para obtener la relación entre R_E y T	20

RESUMEN

El objetivo principal de esta tesis fue: determinar las ecuaciones entre la relación de expansión con la presión y la temperatura en los procesos de compresión y licuado del gas natural. Esta investigación tiene enfoque cuantitativo con nivel de profundización explicativo. La población de estudio lo representan las múltiples simulaciones que se puedan realizar en la compresión y licuado del gas natural y el tipo de muestreo es no probabilístico, teniéndose en cuenta el siguiente criterio de inclusión: treinta (30) simulaciones en la compresión del gas natural y treinta (30) simulaciones en el licuado del gas natural, de lo cual resulta el tamaño de la muestra igual a sesenta (60). Los datos de la densidad del gas natural comprimido y licuado, se recolectaron de las simulaciones de la ecuación de Peng-Robinson, haciéndose uso del programa Aspen HYSYS V11.0. Los resultados obtenidos, muestran que existe relación directa entre la relación de expansión y la presión, siendo esta una ecuación polinómica de cuarto grado, es decir: $R_E = 6 \times 10^{-8}P^4 - 5 \times 10^{-5}P^3 + 0.0103P^2 + 0.7164P + 1.9038$. Los resultados obtenidos, también muestran que existe relación directa entre la relación de expansión y la temperatura, la cual es una ecuación lineal, esta es: $R_E = -1.6896T + 332.97$. En conclusión, al haber encontrado estas ecuaciones, se prueba cada una de las hipótesis específicas y la hipótesis general.

Palabras claves: gas natural comprimido, gas natural licuado, relación de expansión.

ABSTRACT SUMMARY

The main objective of this thesis was: Determining the equations between the expansion ratio with pressure and the temperature in the processes of compression and natural gas liquefied. Its investigation has quantitative. The population of study the multiple simulations that can come true in compression and liquefied of natural gas and the type of sampling is not represent it probabilistic, having in account the following opinion of inclusion: Thirty simulations (30) in the compression of natural gas and thirty (30) simulations in the liquefied of natural gas, of which the size results from the similar sample to sixty. The data of the density of the natural gas compressed and liquefied, they gathered themselves of the simulations of the equation of Peng Robinson, getting oneself use of the program Aspen HYSYS V11.0. The obtained results, they show that there is direct relationship between the expansion ratio and the pressure, being this relation a polynomial equation of fourth degree, that is: $R_E = 6 \times 10^{-8}P^4 - 5 \times 10^{-5}P^3 + 0.0103P^2 + 0.7164P + 1.9038$. The obtained results, also show that there is direct relationship between the expansion ratio and the temperature, which is a linear equation, is it is: $R_E = -1.6896T + 332.97$. In conclusion, when having found these equations, he tries on every one of the specific hypotheses and the general hypothesis.

Keywords: compressed natural gas, liquefied natural gas, expansion ratio.

INTRODUCCIÓN

En los vehículos, el gas natural se utiliza en forma de gas comprimido (GNC = gas natural comprimido entre 200 a 250 bar) o en forma de gas licuado ($-162\text{ }^{\circ}\text{C}$) (GNL = gas natural licuado). Ambos casos implican una drástica reducción en el volumen del gas, con la ventaja de proporcionar una utilización más eficaz de la capacidad de los tanques de almacenamiento, para los cuales también es necesario conocer las ecuaciones entre las variables termodinámicas (presión, temperatura y relación de expansión) que están involucradas en la compresión y licuado del gas natural. En la actualidad el modelo termodinámico más recomendado es la ecuación de Peng-Robinson, la cual relaciona a variables termodinámicas como la presión, temperatura y el volumen de una mezcla de hidrocarburos; sin embargo, esta ecuación no nos relaciona directamente lo siguiente: la relación de expansión en función de la presión (manteniendo la temperatura constante para el caso del GNC) y la relación de expansión en función de la temperatura (manteniendo la presión constante para el caso del GNL). El no conocer las relaciones mencionadas, hace que no sea posible conocer en qué medida disminuirá el volumen del gas al ser comprimido o licuado; lo cual trae como consecuencia el no poder determinar con exactitud la capacidad de los equipos que forman parte de los sistemas de compresión y enfriamiento, utilizados en los procesos de envasado y transporte del gas natural. Hasta la fecha, en la Facultad de Ingeniería Química (FIQ), de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), no existe algún trabajo que muestre en detalle, como determinar las mencionadas relaciones para el caso del GNC y el GNL. La presente investigación, generará nuevos conocimientos en los docentes y alumnos de la Facultad de Ingeniería Química (FIQ) de la Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), además que puede servir como referencia a los ingenieros de procesos para diseñar adecuadamente los sistemas de compresión y licuado del gas natural. Por lo que se acaba de manifestar, en la presente investigación se formula el siguiente problema general: ¿Cuales son las ecuaciones entre la relación de expansión con la presión y la temperatura en los procesos de compresión y licuado del gas natural?

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

- ¿Cuál es la ecuación entre la relación de expansión y la presión en la compresión del gas natural?

- ¿Cuál es la ecuación entre la relación de expansión y la temperatura en el licuado del gas natural?

Los objetivos específicos de la presente investigación son:

- Determinar la ecuación entre la relación de expansión y la presión en la compresión del gas natural.
- Determinar la ecuación entre la relación de expansión y la temperatura en el licuado del gas natural.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes

- Sandoval y Campos (2019, p. XIII), realizaron un trabajo de tesis titulado: Modelamiento y simulación del proceso de obtención del Gas de Síntesis Mejorado mediante el Método Modular Simultáneo. En este trabajo desarrollaron un programa computacional denominado METANACIÓN. m, codificado en el lenguaje de programación MatlabR2014a para visualizar los diferentes escenarios virtuales de un proceso de obtención de gas de síntesis mejorado, en el que se aumentó la concentración de metano en la corriente del producto final. Para realizar el programa computacional tuvieron en cuenta diferentes tipos de análisis como el de grados de libertad y los balances de materia y energía. Los resultados finales permitieron afirmar que al eliminar el 99% de agua a través de un separador, favorece el rendimiento de la producción de metano, con la finalidad de incrementar el potencial energético del gas de síntesis resultante.
- Urquiaga y Pérez (2015, pp. 42-69), realizaron un trabajo de tesis titulado: Simulación de una columna de destilación para la separación de propano-propileno usando Aspen HYSYS 8.0. En este trabajo se utilizó el modelo termodinámico de Peng-Robinson para simular el proceso de separación del propano-propileno en una torre de destilación. La corriente de alimentación a la torre de destilación tuvo una composición molar de 40% propano y 60% propileno, para luego obtener por la zona superior de la

torre una composición de propileno igual al 99% y por el fondo de la torre una composición de propano igual al 94.23%. En este trabajo, se comprobó que para obtener como producto de destilado expresado como fracción molar 0.99 de propileno y 0.01 de propano, teóricamente se necesita 200 platos en la columna de destilación, pero en la realidad se necesita 233 platos. Mediante esto determinaron que la eficacia del proceso de separación es 86%. Por último, concluyeron que la fracción molar de propileno en la corriente de destilado, aumenta a medida que se incrementa el número de platos de la columna de destilación.

- Ríos y Montalván (2015, pp. 45-81), realizaron un trabajo de tesis titulado: Determinación y simulación de variables termodinámicas en CSTR (reactor de tanque agitado continuo) y PFR (reactor de flujo pistón), mediante software HYSYS V8.0. Las variables termodinámicas que se analizaron fueron: presión, temperatura y volumen, para lo cual plantearon los siguientes casos de estudio.

Caso I: Producción de etileno en un PFR

Caso II: Producción de ácido acético en un CSTR

Posteriormente realizaron el modelado de ambos casos, teniendo en cuenta las condiciones de entrada y salida para el CSTR y PFR, esto les permitió determinar las ecuaciones de diseño para ambos reactores y a su vez realizar la simulación convencional de variables termodinámicas para los casos de estudio mencionados.

La simulación de los casos de estudio, lo realizaron haciendo uso del software Aspen HYSYS V8.0; seleccionando el modelo termodinámico de Peng-Robinson para el caso I (por tratarse de una mezcla de hidrocarburos) y para el caso II seleccionaron el de UNIQUAC (por tratarse de una solución acuosa con componentes polares). Los resultados que se obtuvieron en ambos casos de estudio, demostraron que el software HYSYS es una excelente herramienta, el cual permite determinar datos de propiedades físicas, termodinámicas y de transporte, en las corrientes de entrada y salida del CSTR y PFR.

- Vásquez (2013, pp. 1-53), publicó el libro titulado: Termodinámica para Ingeniería Química con el Simulador HYSYS. En este libro se muestra diversos ejemplos sobre

simulación de procesos de compresión de mezclas de gases mediante el simulador Aspen HYSYS, en los cuales se hace uso de la ecuación de Peng-Robinson para determinar variables termodinámicas.

1.2. Bases teóricas

1.2.1. Ecuación de Peng-Robinson

La ecuación de estado de Peng-Robinson es una ecuación cúbica construida a partir de la ecuación básica de Van der Waals y fue desarrollada en la década del 70 por Ding-Yu Peng y Donald Baker Robinson. Ding-Yu Peng era alumno de doctorado del Prof. Donald Robinson en la Universidad de Calgary, Canadá. Este trabajo investigativo fue apadrinado por la Junta Canadiense de Energía (Canadian Energy Board) para solucionar específicamente sistemas de gas natural. Finalmente, en 1976 se publicó este trabajo (Zavaleta, 2010; citado por Urquiaga y Pérez, 2015, p. 1). La ecuación de Peng-Robinson se expresa en los siguientes términos:

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

Donde P es la presión en atm, V_m es el volumen molar en L/mol, T la temperatura absoluta en K y $R = 0.0821$ atm. L/(mol. K) la constante de los gases.

El volumen molar, también se puede expresar en función de la densidad y la masa molar, es decir: $V_m = M/\rho$, donde M es la masa molar y ρ la densidad. Los coeficientes empíricos a y b y el factor α vienen de las siguientes relaciones, dependientes de la presión crítica P_c , temperatura crítica T_c y el factor acéntrico ω :

$$a = \frac{0.45724R^2T_c^2}{P_c}. \quad (2)$$

$$b = \frac{0.07780RT_c}{P_c}. \quad (3)$$

$$\alpha = [1 + (0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2)(1 - T_r^{0.5})]^2. \quad (4)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c}. \quad (5)$$

La ecuación de Peng-Robinson, también puede expresarse en términos del factor de compresión (Z) en la forma polinómica siguiente:

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0. \quad (6)$$

Donde:

$$A = a\alpha \frac{P}{R^2 T^2} = 0.45724 \frac{\alpha P_r}{T_r^2}. \quad (7)$$

$$B = \frac{bP}{RT} = 0.07780 \frac{P_r}{T_r}. \quad (8)$$

Si se conoce P , T , Z y M , se puede usar la ecuación (9) para determinar V_m y ρ .

$$V_m = \frac{ZRT}{P} = \frac{M}{\rho}. \quad (9)$$

Para una mezcla de p componentes, la presión crítica, la temperatura crítica y el factor acéntrico, se puede calcular mediante las siguientes ecuaciones:

$$P_{c(\text{mezcla})} = \sum_{i=1}^p y_i P_{ci}. \quad (10)$$

$$T_{c(\text{mezcla})} = \sum_{i=1}^p y_i T_{ci}. \quad (11)$$

$$\omega_{c(\text{mezcla})} = \sum_{i=1}^p y_i \omega_{ci}. \quad (12)$$

En este caso, se tendría en la ecuación (6) el factor de compresión para la mezcla (Z_{mezcla}) y esto se remplazaría en la ecuación (9) para calcular la densidad de la mezcla, es decir:

$$\rho_{mezcla} = \frac{PM_{mezcla}}{Z_{mezcla}RT} \quad (13)$$

1.2.2. Aspen HYSYS V11.0

Aspen HYSYS es un software de simulación interactivo enfocado a la ingeniería de procesos y es utilizado en la actualidad para solucionar diversos problemas relacionados con procesos químicos. Aspen HYSYS es una excelente herramienta que permite determinar datos de variables termodinámicas, las cuales son necesarias conocer para realizar los balances de materia y energía en los procesos químicos, esto es debido a que cuenta con una interfaz muy amigable para el usuario, facilitando de este modo la simulación de diversos procesos. (Ríos y Montalván, 2015, p. viii).

1.3. Definición de términos básicos

1.3.1. Gas natural

El **gas natural** es una mezcla de hidrocarburos ligeros de origen natural que son extraídos de yacimientos fósiles, ya sea solo o diluido en petróleo. Principalmente contiene metano y normalmente incluye cantidades variables de otros alcanos y a veces un pequeño porcentaje de dióxido de carbono, nitrógeno, ácido sulfhídrico o helio (www.nedgia.es/conocenos/caracteristicas-del-gas-natural/). El gas natural pertenece al grupo de energías fósiles y contaminantes.

El gas natural se utiliza en forma de gas comprimido (GNC = gas natural comprimido entre 200 a 250 bar) y temperatura ambiente (aproximadamente 20 °C) (wikipedia.org/wiki/Gas_natural_comprimido) o en forma de gas natural licuado (GNL = gas natural licuado a -162 °C y a presión atmosférica 1 atm) (masminermetal.com/es/glosario/54-gnl-gas-natural-licuado). En ambos casos, el volumen del gas natural se reduce considerablemente y generalmente tienen la siguiente composición molar: 85% de metano, 10% de etano y 5% de propano.

El GNL se obtiene mediante un proceso criogénico donde se disminuye su temperatura a -162 °C, reduciendo su volumen unas seiscientas (600) veces y de esa forma facilita su almacenamiento y transporte a través de buques (masminermetal.com/es/glosario/54-gnl-gas-natural-licuado). A diferencia del GNC, el

GNL ha sido procesado para ser transportado en forma líquida y es 1.4 veces más pesado que el aire, pero a medida que se calienta, su densidad baja, alcanzando 0.55 veces la del aire a temperatura ambiente. El gas natural se transporta principalmente a través de gasoductos y como gas natural licuado (GNL) en los llamados buques metaneros y camiones criogénicos, asimismo se puede transportar en cilindros de alta presión como gas natural comprimido (GNC) (masmineral.com/es/glosario/54-gnl-gas-natural-licuado).

1.3.2. Presión

La presión P ejercida por un fluido, sobre una superficie se define como la fuerza normal ejercida por el fluido por unidad de área de superficie. Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades es el pascal y se representa por Pa. También se expresa en otras unidades como, el bar (bar) y la atmósfera (atm) (Smith, Van Ness y Abbott, 2007, p. 7).

1.3.3. Temperatura

La temperatura se mide con termómetros de líquidos en capilares de vidrio, donde el fluido se expande cuando se calienta. De esta forma un tubo lleno parcialmente con mercurio, indica el grado de calentamiento mediante la longitud de la columna de fluido (Smith, Van Ness y Abbott, 2007, pp. 5-6). Sus unidades son: °C, K, °F y °R.

1.3.4. Fracción de vapor

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

$$\phi = \frac{\text{masa del vapor}}{\text{masa de la mezcla}}. \quad (14)$$

Por ejemplo, si $\phi = 1$, indica que toda la mezcla se encuentra en fase vapor. Si $\phi = 0.65$, indica que el 65% de la mezcla se encuentra en fase vapor y el 35% de la mezcla está en fase líquida (Smith, Van Ness y Abbott, 2007, p. 225).

1.3.5. Relación de expansión

Se denota como R_E , e indica la relación entre el volumen del gas a condiciones

normales de presión y temperatura (CNPT) con el volumen del gas comprimido o licuado (www.nedgia.es/conocenos/caracteristicas-del-gas-natural/), es decir:

$$R_E = \frac{\text{Volumen del gas a CNPT}}{\text{Volumen del gas comprimido o licuado}}. \quad (15)$$

También la ecuación se puede expresar de la forma siguiente:

$$R_E = \frac{\text{Densidad del gas comprimido o licuado}}{\text{Densidad del GN a CNPT}}. \quad (16)$$

Para ser más específicos, la relación de expansión indica las veces que se puede reducir el volumen del gas natural al ser licuado o comprimido.

CAPÍTULO II: HIPÓTESIS Y VARIABLES

2.1. Formulación de la hipótesis

a. Hipótesis general

Existen las ecuaciones entre la relación de expansión con la presión y la temperatura en los procesos de compresión y licuado del gas natural.

b. Hipótesis específicas

- Existe la ecuación entre la relación de expansión y la presión en la compresión del gas natural.
- Existe la ecuación entre la relación de expansión y la temperatura en el licuado del gas natural.

2.2. Variables y su operacionalización

Variables independientes: temperatura y presión.

Variable dependiente: relación de expansión.

Tabla 1. Operacionalización de las variables.

Variab les	Notación	Definición	Tipo por su naturaleza	Indicadores	Escala de medición	Medios de verificación
Independientes						
Temperatura	T	Temperatura que experimenta el licuado de gas natural a una presión constante de 1 atm	Cuantitativa continua	Grados Celcius (°C)	Intervalo	Simulaciones en Aspen HYSYS V11.0 y las hojas de cálculo de Excel.
Presión	P	Presión que experimenta la compresión de gas natural a una temperatura constante	Cuantitativa continua	bar	Razón	Simulaciones en Aspen HYSYS V11.0 y las hojas de cálculo de Excel.
Dependiente						
Relación de expansión	R_E	Indica la relación entre el volumen del gas a condiciones normales de presión y temperatura (CNPT) con el volumen del gas comprimido o licuado (www.nedgia.es/conocenos/caracteristicas-del-gas-natural/).	Cuantitativa continua	$\frac{\text{Densidad del gas comprimido o licuado}}{\text{Densidad del gas a CNPT}}$	Razón	Hojas de cálculo de Excel

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño

En la presente investigación, al inicio se explica detalladamente la ecuación de Peng-Robinson y el entorno del programa Aspen HYSYS V11.0. Posteriormente se realizaron múltiples simulaciones para obtener los datos que permitieron determinar las ecuaciones de la relación de expansión con la presión y la relación de expansión con la temperatura. Por último, se determinó las ecuaciones entre las mencionadas variables termodinámicas, en la compresión y licuado del gas natural. Por lo tanto, la investigación tiene **enfoque cuantitativo** con nivel de profundización explicativo. El esquema del diseño de investigación, se muestra en la figura 1.

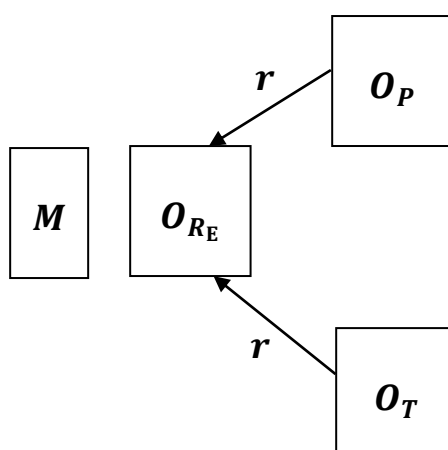


Figura 1. Esquema del diseño de investigación.

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

O_P , O_T y O_{RE} , son las observaciones obtenidas en cada una de las tres variables (P , T y R_E , respectivamente) distintas de la muestra.

P : presión (variable independiente).

T : temperatura (variable independiente).

R_E : relación de expansión (variable dependiente).

M : muestra.

r : relación entre las variables.

3.2. Diseño muestral

La población para la presente investigación, lo representan las múltiples simulaciones que se puedan realizar en la compresión y licuado del gas natural, lo cual indica que se tiene una población infinita. Es por eso que el tipo de muestreo en esta investigación fue el no probabilístico, a criterio de los investigadores, teniéndose en cuenta el siguiente **criterio de inclusión**:

- Treinta (30) simulaciones en la compresión del gas natural, haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, para determinar la relación entre la relación de expansión y la presión (variando de 1 a 250 bar), manteniendo la temperatura constante (20 °C).
- Treinta (30) simulaciones en el licuado del gas natural, haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, para determinar la relación entre la relación de expansión y la temperatura (variando de 0 a -180 °C), manteniendo la presión constante (1 atm).

Esto indica que el tamaño total de la muestra es igual a 60.

3.3. Procedimientos de recolección de datos

El procedimiento de recolección de datos se basó en simulaciones de la ecuación de Peng-Robinson, haciéndose uso del programa Aspen HYSYS V11.0, de donde se obtuvieron datos de la densidad del gas natural comprimido y licuado, para luego aplicarse la ecuación (16) y determinarse la relación de expansión.

A continuación, se indica en detalle los pasos seguidos en las simulaciones de la ecuación de Peng-Robinson, haciéndose uso del programa Aspen HYSYS.

Paso 1: se ingresan los componentes del gas natural (metano, etano y propano)

Paso 2: se selecciona el modelo termodinámico o paquete de fluido, en este caso es la ecuación de Peng-Robinson.

Paso 3: se crea una corriente de materia y se ingresa el valor de las siguientes condiciones: presión (250 bar = 2.5×10^4 kPa), temperatura (20°C), flujo (100 kmol/h) y composición (0.85 para el metano, 0.10 para el etano y 0.05 para el propano) (véase las figuras 4 y 5).

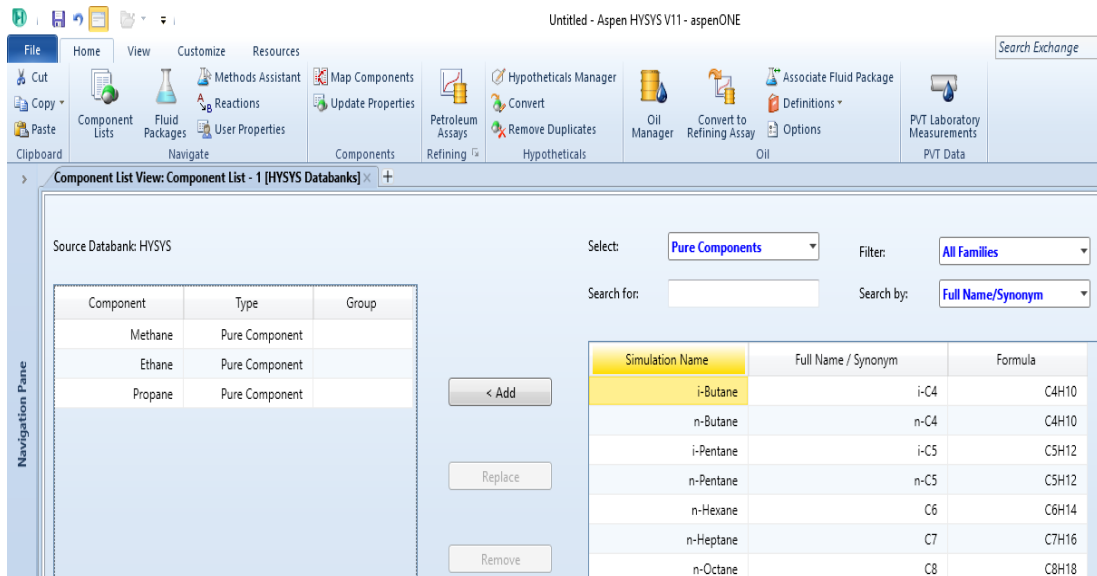


Figura 2. Ingreso de componentes a Aspen HYSYS V11.0.

Fuente: Elaboración propia.

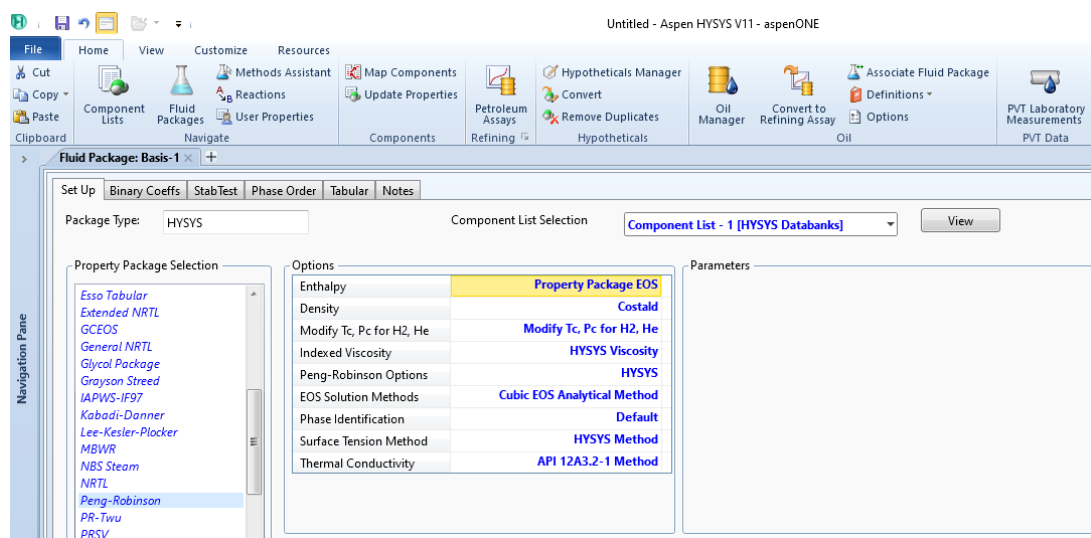


Figura 3. Selección de la ecuación de Peng-Robinson.

Fuente: Elaboración propia.

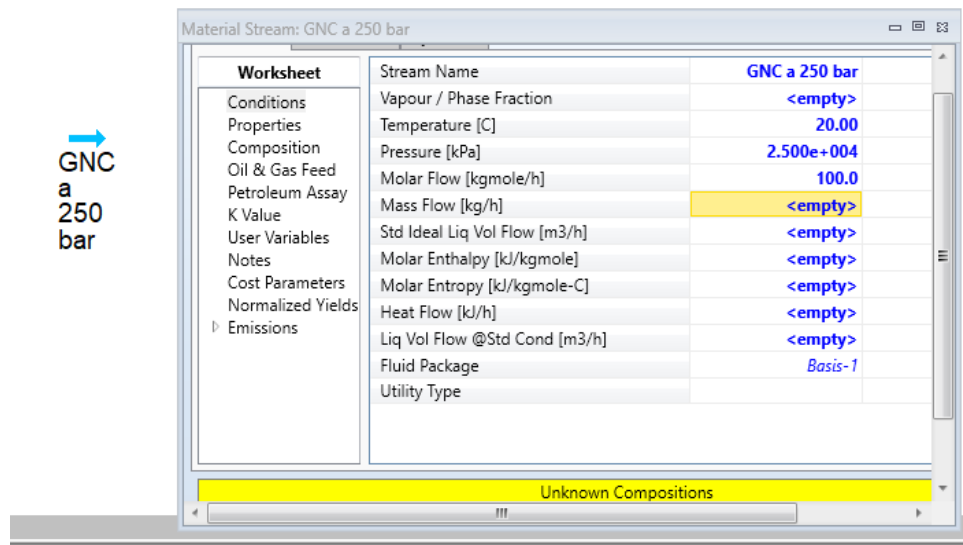


Figura 4. Ingreso del valor de las condiciones: presión, temperatura y flujo.
Fuente: Elaboración propia.

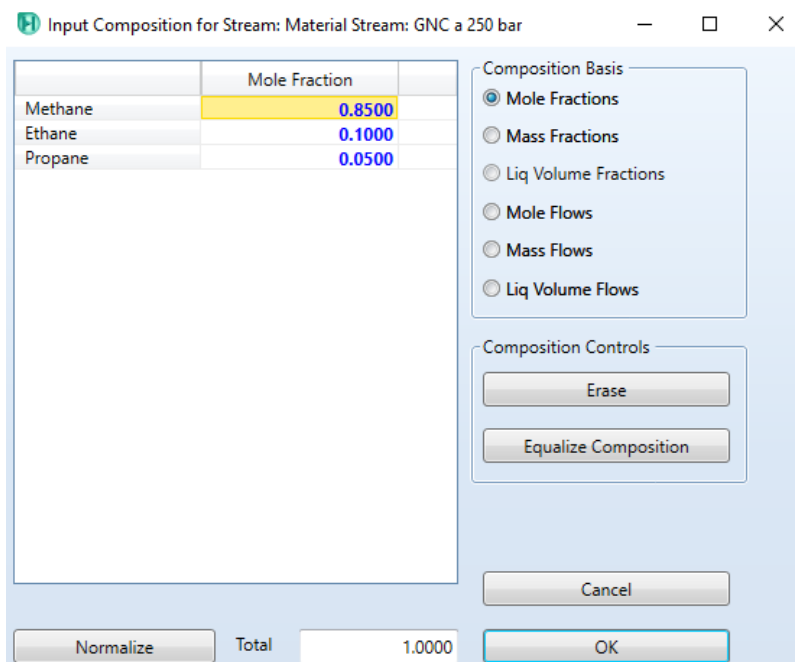
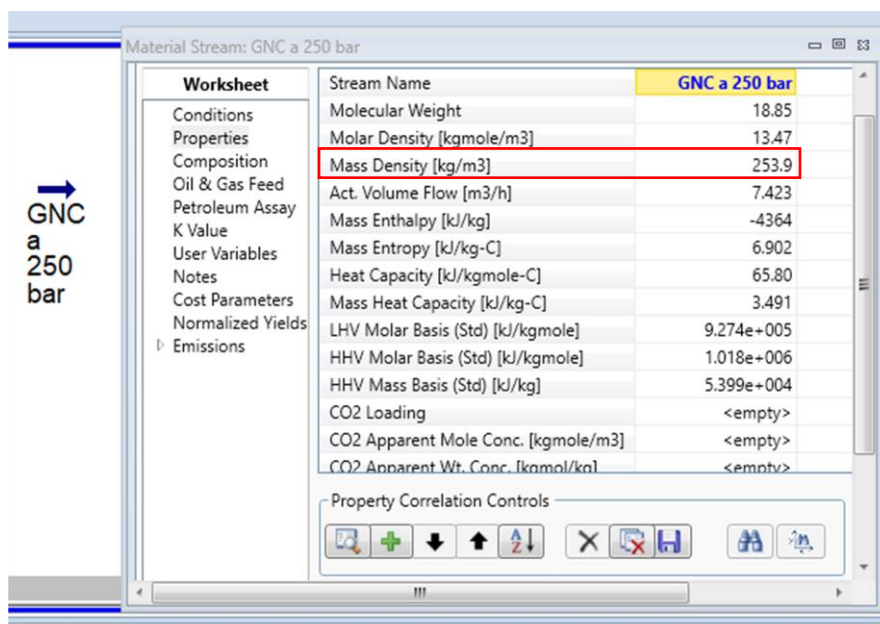


Figura 5. Ingreso del valor de la condición: fracción molar.
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se hace un clic en el botón propiedades, para visualizar el resultado de la densidad que el programa Aspen HYSYS ha calculado mediante la

simulación de la ecuación de Peng-Robinson (véase la figura 6). De la misma forma se procedió en las otras cincuenta y nueve (59) simulaciones, para recolectar los datos de la densidad del gas comprimido o licuado.



Worksheet	Stream Name	GNC a 250 bar
Conditions	Molecular Weight	18.85
Properties	Molar Density [kgmole/m3]	13.47
Composition	Mass Density [kg/m3]	253.9
Oil & Gas Feed	Act. Volume Flow [m3/h]	7.423
Petroleum Assay	Mass Enthalpy [kJ/kg]	-4364
K Value	Mass Entropy [kJ/kg-C]	6.902
User Variables	Heat Capacity [kJ/kgmole-C]	65.80
Notes	Mass Heat Capacity [kJ/kg-C]	3.491
Cost Parameters	LHV Molar Basis (Std) [kJ/kgmole]	9.274e+005
Normalized Yields	HHV Molar Basis (Std) [kJ/kgmole]	1.018e+006
Emissions	HHV Mass Basis (Std) [kJ/kg]	5.399e+004
	CO2 Loading	<empty>
	CO2 Apparent Mole Conc. [kgmole/m3]	<empty>
	CO2 Apparent Wt. Conc. [kgmol/ka]	<empty>

Figura 6. Resultado de la densidad.

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento y análisis de datos, se empleó las hojas de cálculo de Excel, en donde se realizaron diversas regresiones, obteniéndose de esta manera las ecuaciones que mejor representan a la relación de expansión con la presión y a la relación de expansión con la temperatura.

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 u artículo científico. Así mismo, nos comprometemos a respetar la veracidad de los resultados que se han obtenido al realizar el total de las 60 simulaciones.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

Tabla 2. Resultados de la densidad y la relación de expansión para el GNC.

P bar	ρ_{GNC} kg/m ³	R_E $\frac{\text{Densidad del GNC}}{\text{Densidad del GN a CNPT}}$	Fracción de vapor
1	0.7758	0.9868	1
9.3	7.415	9.4314	1
17.6	14.43	18.3541	1
25.9	21.84	27.7792	1
34.2	29.67	37.7385	1
42.5	37.93	48.2447	1
50.8	46.63	59.3106	1
59.1	55.78	70.9489	1
67.4	65.35	83.1213	1
75.7	75.31	95.7899	1
84	85.61	108.8909	1
92.3	96.16	122.3098	1
100.6	106.9	135.9705	1
108.9	117.6	149.5803	1
117.2	128.3	163.1900	1
125.5	138.9	176.6726	1
133.8	149.2	189.7736	1
142.1	159.1	202.3658	1
150.4	168.7	214.5764	1
158.7	177.8	226.1511	1
167	186.6	237.3442	1
175.3	194.9	247.9013	1
183.6	202.8	257.9496	1
191.9	210.4	267.6164	1
200.2	217.5	276.6472	1
208.5	224.3	285.2964	1
216.8	230.8	293.5640	1
225.1	237.0	301.4500	1
233.4	242.9	308.9545	1
241.7	248.5	316.0773	1
250	253.9	322.9458	1

Fuente: Elaboración propia y simulaciones en Aspen HYSYS V11.0.

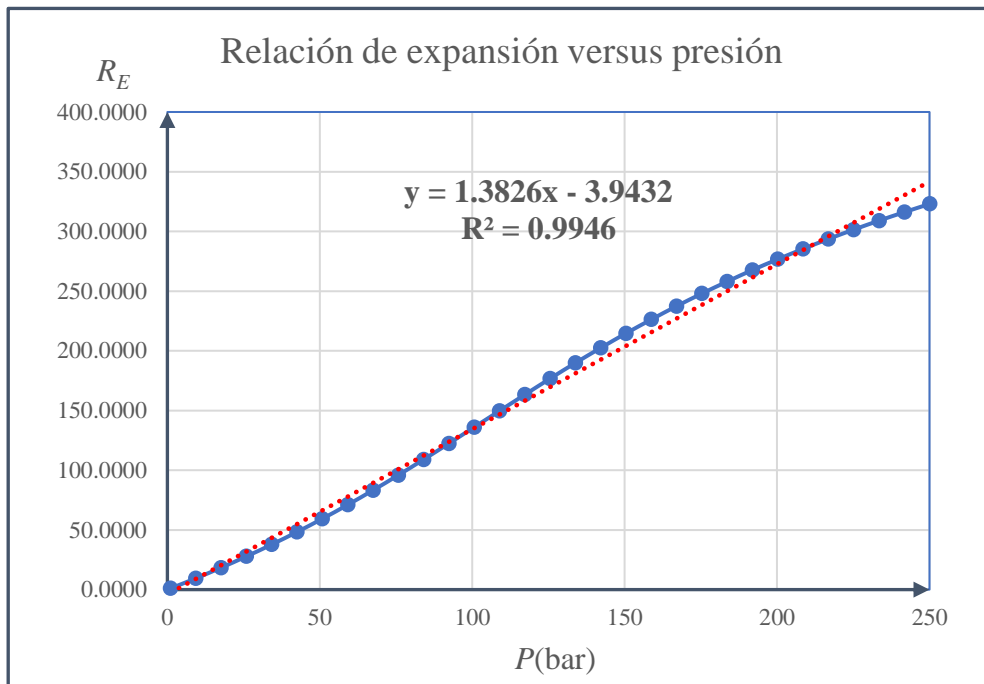


Figura 7. Primera regresión para obtener la relación entre R_E y P .

Fuente: Elaboración propia y las hojas de cálculo de Excel.

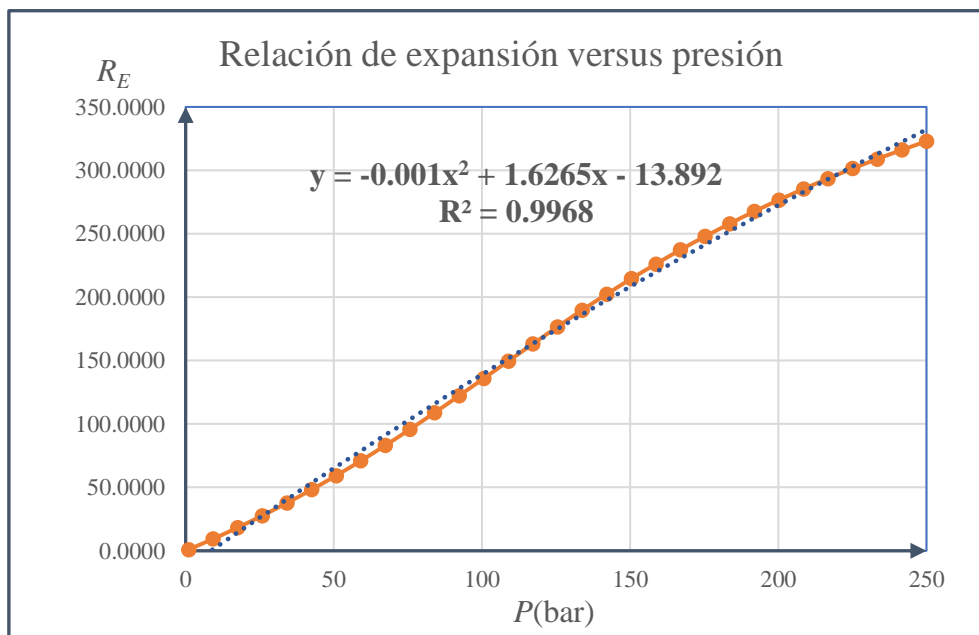


Figura 8. Segunda regresión para obtener la relación entre R_E y P .

Fuente: Elaboración propia y las hojas de cálculo de Excel.

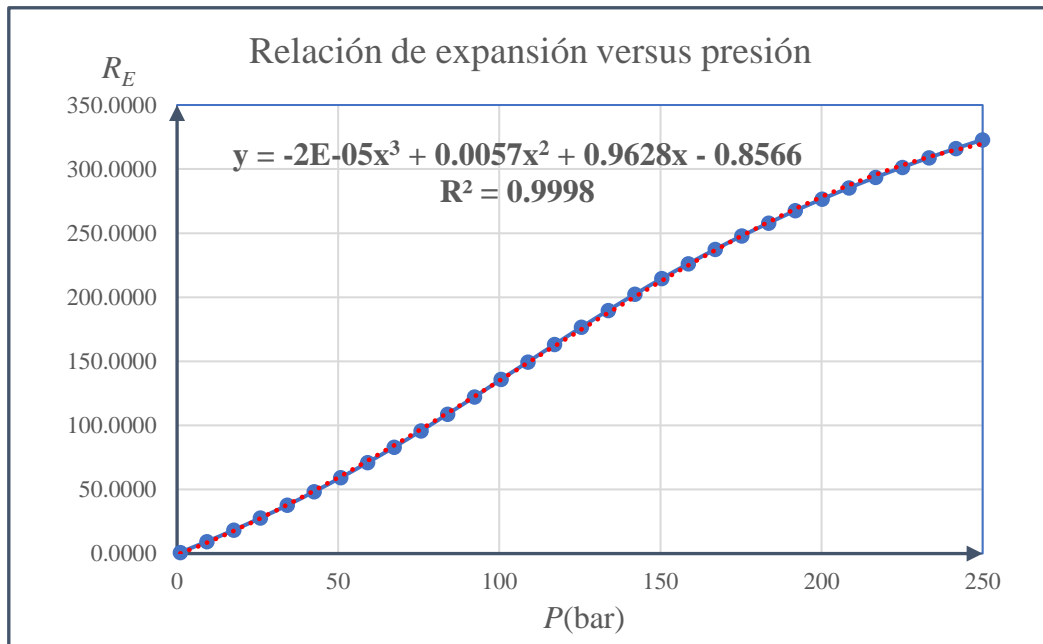


Figura 9. Tercera regresión para obtener la relación entre R_E y P .

Fuente: Elaboración propia y las hojas de cálculo de Excel.

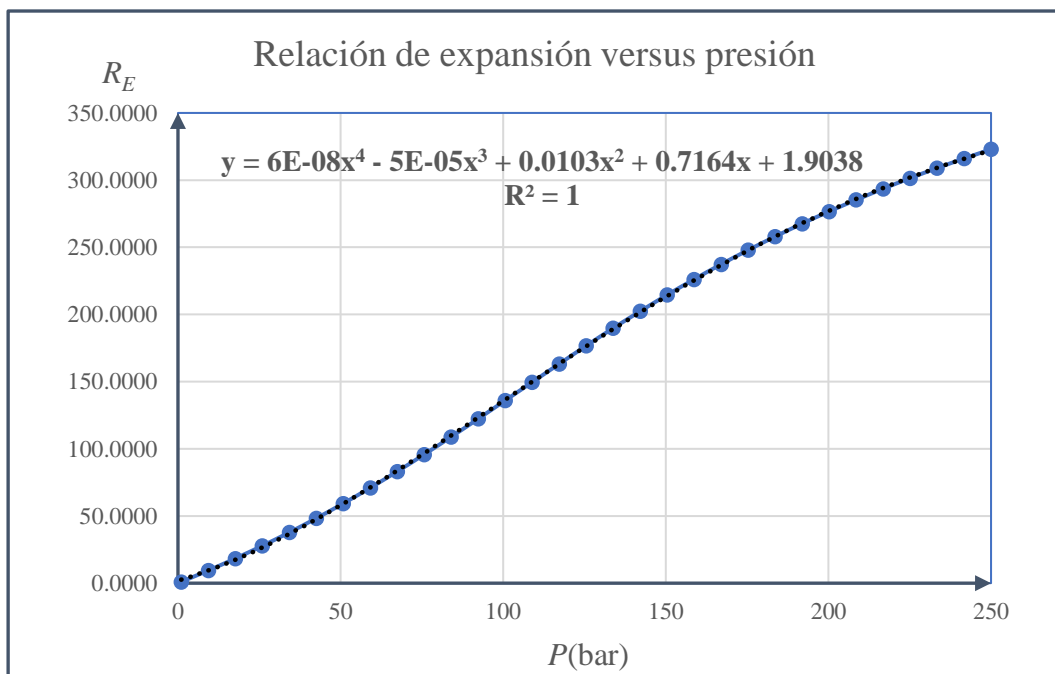


Figura 10. Cuarta regresión para obtener la relación entre R_E y P .

Fuente: Elaboración propia y las hojas de cálculo de Excel.

En la tabla 2, se muestra los resultados de la densidad (ρ_{GNC}) y la relación de expansión (R_E) para el GNC, variando la presión (P) desde 1 a 250 bar y manteniendo la temperatura (T) en 20°C. Los valores de R_E , se han calculado haciendo uso de la ecuación (16), pero previamente se tuvo que calcular la densidad del gas natural a CNPT (condiciones normales de presión y temperatura, en este caso 1 atm y 20°C), la cual resultó: $\rho_{\text{GN a CNPT}} = 0.7862 \text{ kg/m}^3$.

Para determinar la ecuación entre la relación de expansión y la presión, se graficó los valores de R_E y P que se muestran en la tabla 2 y luego se realizaron cuatro regresiones, las cuales se muestran desde la figura 7 hasta la figura 10. Otro resultado que también se puede observar en la tabla 2, es la fracción de vapor, la cual indica que al comprimirse el gas natural de 1 a 250 bar y manteniendo la temperatura a 20°C, no cambia de estado.

Tabla 3. Resumen de las regresiones para obtener la relación entre R_E y P .

Ecuación obtenida	Coefficiente de determinación
$R_E = 1.3826P - 3.9432$	$R^2 = 0.9946$
$R_E = -0.001P^2 + 1.6265P - 13.892$	$R^2 = 0.9968$
$R_E = -2 \times 10^{-5}P^3 + 0.0057P^2 + 0.9628P - 0.8566$	$R^2 = 0.9998$
$R_E = 6 \times 10^{-8}P^4 - 5 \times 10^{-5}P^3 + 0.0103P^2 + 0.7164P + 1.9038$	$R^2 = 1$

Fuente: Elaboración propia y las hojas de cálculo de Excel.

En la tabla 3, se puede observar el resumen de las regresiones para obtener la ecuación entre la relación de expansión y la presión. De esta tabla se puede observar las ecuaciones que relacionan a la relación de expansión en función de la presión, con su respectivo coeficiente de determinación (R^2).

Las 4 ecuaciones que se muestran en la tabla 3, indican que existe una relación casi perfecta entre la relación de expansión y la presión. De esta forma se cumple con el primer objetivo específico y se prueba la primera hipótesis específica.

Tabla 4. Resultados de la densidad y la relación de expansión para el GNL.

T °C	ρ_{GNL} kg/m ³	R_E	Fracción de vapor
		$\frac{\text{Densidad del GNL}}{\text{Densidad del GN a CNPT}}$	
0	0.7758	0.9868	1
-6	0.8444	1.0740	1
-12	0.8837	1.1240	1
-18	0.9048	1.1509	1
-24	0.9269	1.1790	1
-30	0.9501	1.2085	1
-36	0.9747	1.2398	1
-42	1.0000	1.2719	1
-48	1.028	1.3076	1
-54	1.056	1.3432	1
-60	1.087	1.3826	1
-66	1.119	1.4233	1
-72	1.153	1.4665	1
-78	1.190	1.5136	1
-84	1.228	1.5619	1
-90	1.270	1.6154	1
-96	1.337	1.7006	0.9827
-102	1.416	1.8011	0.9606
-108	1.498	1.9054	0.9417
-114	1.589	2.0211	0.9222
-120	1.694	2.1547	0.8998
-126	1.812	2.3048	0.8762
-132	1.940	2.4676	0.8544
-138	2.079	2.6444	0.8341
-144	2.243	2.8530	0.8107
-150	2.482	3.1570	0.7702
-156	3.155	4.0130	0.6384
-162	476.9	606.5887	0
-168	485.0	616.8914	0
-174	493.0	627.0669	0
-180	500.8	636.9880	0

Fuente: Elaboración propia y simulaciones en Aspen HYSYS V11.0.

En la tabla 4, se muestra los resultados de la densidad (ρ_{GNL}) y la relación de expansión (R_E) para el GNL, variando la temperatura (T) desde 0 a -180°C y

manteniendo la presión (P) a 1 atm. De la misma forma que para el GNC, los valores de R_E , se han calculado haciendo uso de la ecuación (16).

También se puede observar en la última columna de la tabla 4, que el valor de la fracción de vapor es cero (0) a partir de -162°C hasta -180°C . Esto indica que el gas natural está licuado en este intervalo de temperatura. Entonces, para determinar la relación entre la relación de expansión y la temperatura, se graficó los valores de R_E y T que se muestran en la tabla 4, desde -162°C hasta -180°C (véase la figura 11).

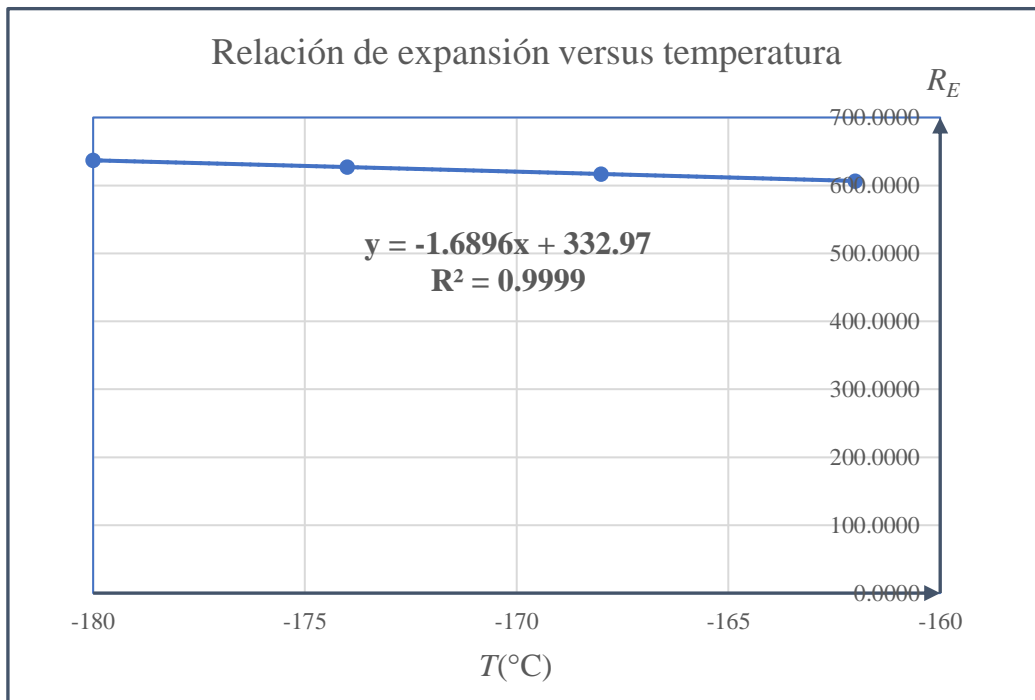


Figura 11. Regresión para obtener la relación entre R_E y T .

Fuente: Elaboración propia y las hojas de cálculo Excel.

En la figura 11, se muestra que el resultado de la regresión para obtener la relación entre R_E y T , es la ecuación: $R_E = -1.6896T + 332.97$, con un $R^2 = 0.9999$. Esto indica que existe una relación lineal casi perfecta entre la relación de expansión y la temperatura. De esta forma se cumple con el segundo objetivo específico y se prueba la segunda hipótesis específica.

CAPÍTULO V: DISCUSIÓN

Para el caso del GNC, la fracción de vapor mantiene su valor igual a 1, esto indica que el gas natural al ser comprimido de 1 a 250 bar, manteniendo la temperatura a 20°C, no sufre ningún cambio de estado.

Debido a que los coeficientes de determinación de las 4 ecuaciones que se muestran en la tabla 3, son muy cercanos a 1 ($0.9946 \leq R^2 \leq 1$), cualquiera de estas ecuaciones puede predecir con gran exactitud el valor de la relación de expansión para un valor determinado de la presión. Sin embargo, se ha elegido a la ecuación: $R_E = 6 \times 10^{-8}P^4 - 5 \times 10^{-5}P^3 + 0.0103P^2 + 0.7164P + 1.9038$, la que mejor puede predecir el valor de la relación de expansión para un valor determinado de la presión, debido a que en esta ecuación el coeficiente de determinación es igual a 1 ($R^2 = 1$).

Para el caso del GNL, la fracción de vapor mantiene su valor igual a 1, en el intervalo de temperatura de 0 a -90°C , manteniendo la presión a 1 atm, lo cual indica que, en el gas natural, sólo se produce un enfriamiento sin cambio de estado. De -96 a -156°C , manteniendo la presión a 1 atm, la fracción de vapor cambia su valor de 0.9827 a 0.6384, esto indica que parte del gas natural se ha licuado. Entonces, se puede decir que a -156°C y 1 atm, 36.16% del gas natural se ha licuado, es decir:

$$(1 - 0.6384) \times 100\% = 36.16\%.$$

En masminermetal.com/es/glosario/54-gnl-gas-natural-licuado, se menciona que el GNL es gas natural licuado a -162°C y a presión atmosférica, esto valida los resultados obtenidos en la presente investigación, porque mediante las simulaciones realizadas haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, se ha podido demostrar que exactamente a partir de esta temperatura, el 100% del gas natural se encuentra en estado líquido. El valor de $R_E = 616.8914$ a $T = -168^\circ\text{C}$ y $P = 1$ atm, indica que 616.8914 L de gas natural que se encuentra a (CNPT, 1 atm y 20°C), con sólo cambiar la temperatura a -168°C , su volumen se redujera a 1 L. De la misma forma, si $R_E = 308.9545$ a $T = 20^\circ\text{C}$ y $P = 233.4$ bar, indica que 308.9545 L de gas natural que se encuentra a (CNPT, 1 atm y 20°C), con sólo cambiar la presión a 233.4 bar, su volumen se redujera a 1 L. De esta forma se puede interpretar los demás valores de la relación de expansión.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

- La mejor relación entre la relación de expansión y la presión es una ecuación polinómica de grado 4, en la cual la relación de expansión es la variable dependiente y la presión la variable independiente, dicha ecuación es:

$$R_E = 6 \times 10^{-8}P^4 - 5 \times 10^{-5}P^3 + 0.0103P^2 + 0.7164P + 1.9038, \quad R^2 = 1$$

- La ecuación entre la relación de expansión y la temperatura es una línea recta, en la cual la relación de expansión es la variable dependiente y la temperatura la variable independiente, esta ecuación es:

$$R_E = -1.6896T + 332.97, \quad R^2 = 0.9999$$

- Para el caso del GNC, en la ecuación: $R_E = 6 \times 10^{-8}P^4 - 5 \times 10^{-5}P^3 + 0.0103P^2 + 0.7164P + 1.9038$, el valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 1$), indica que existe una relación perfecta entre la relación de expansión y la presión. Esto prueba la primera hipótesis específica: “existe la ecuación entre la relación de expansión y la presión en la compresión del gas natural”
- Para el caso del GNL, en la ecuación: $R_E = -1.6896T + 332.97$, el valor del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.9999$), indica que existe una relación casi perfecta entre la relación de expansión y la temperatura. Esto prueba la segunda hipótesis específica: “existe la ecuación entre la relación de expansión y la temperatura en el licuado del gas natural”
- Se concluye el presente trabajo de investigación, probando cada una de las hipótesis específicas y la hipótesis general y además cumpliendo con cada uno de los objetivos específicos y el objetivo general.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar un estudio, donde se determine la relación entre la fracción de vapor y la presión para el GNC y la relación entre la fracción de vapor y la temperatura para el GNL.
- Se recomienda el uso del simulador Aspen HYSYS V11.0, a todos los egresados y profesionales que decidan hacer investigación en temas de ingeniería, ya que se ha demostrado que este simulador es una excelente herramienta que nos permite realizar cálculos complejos, prediciendo con gran exactitud el comportamiento de diversas variables de procesos.
- Se recomienda tomar como referencia la presente investigación, para hacer otras investigaciones donde se apliquen los balances de materia y energía y así poder optimizar la capacidad de los equipos utilizados en los procesos de compresión y licuado del gas natural.

CAPÍTULO VIII: FUENTES DE INFORMACIÓN

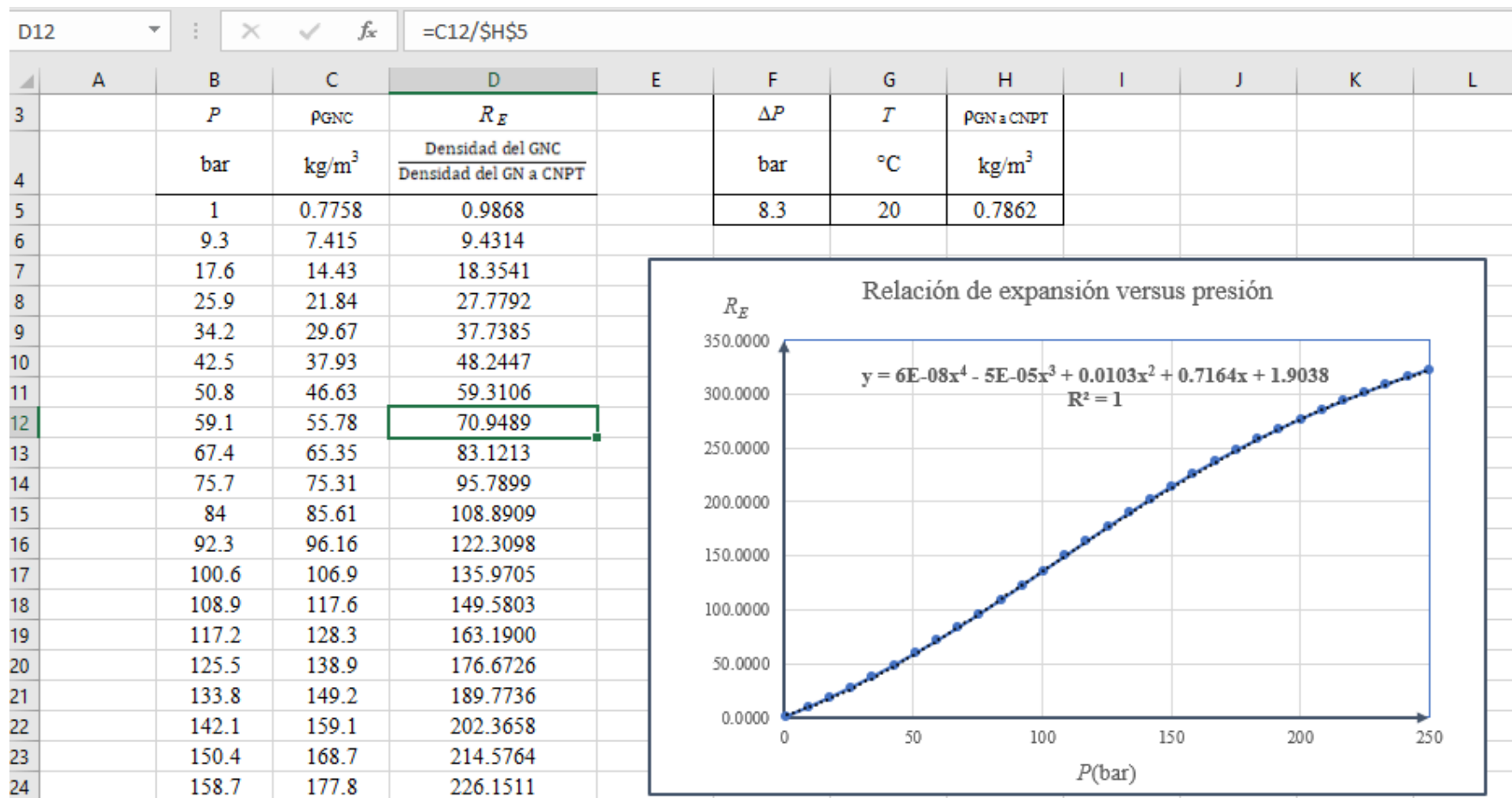
- https://es.wikipedia.org/wiki/Gas_natural_comprimido
- <https://masminermetal.com/es/glosario/54-gnl-gas-natural-licuado>
- <https://www.nedgia.es/conocenos/caracteristicas-del-gas-natural/>
- SMITH, J. M., VAN NESS, H. C. y ABBOTT, M. M. Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química. 7a. ed. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V., 2007. pp. 5-7, 225.
ISBN-13: 978-970-10-6147-3.
ISBN-10: 970-10-6147-0.
- RÍOS, Ítalo y MONTALVÁN, Félix. “Determinación y simulación de variables termodinámicas en reactores CSTR y PFR mediante software HYSYS V8.0”. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2015. pp. viii, 45-81.
- SANDOVAL, Diana y CAMPOS, Gabriela. “Modelamiento y simulación del proceso de obtención del Gas de Síntesis Mejorado mediante el Método Modular Simultáneo”. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Trujillo, Perú: Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ingeniería Química, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Química, 2019. XIII p.
- URQUIAGA, Roberto y PÉREZ, Mario. “Simulación de una columna de destilación para la separación de propano-propileno usando Aspen HYSYS 8.0”. Tesis para optar el título de ingeniero químico. Iquitos, Perú: Universidad Nacional de la Amazonía Peruana, Facultad de Ingeniería Química, 2015. pp. 1, 42-69.
- VÁSQUEZ, S. A. “Termodinámica para Ingeniería Química con el Simulador HYSYS”. Lambayeque, Perú: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, Facultad de Ingeniería Química e Industrias Alimentarias, 2013. pp. 1, 53.

ANEXOS

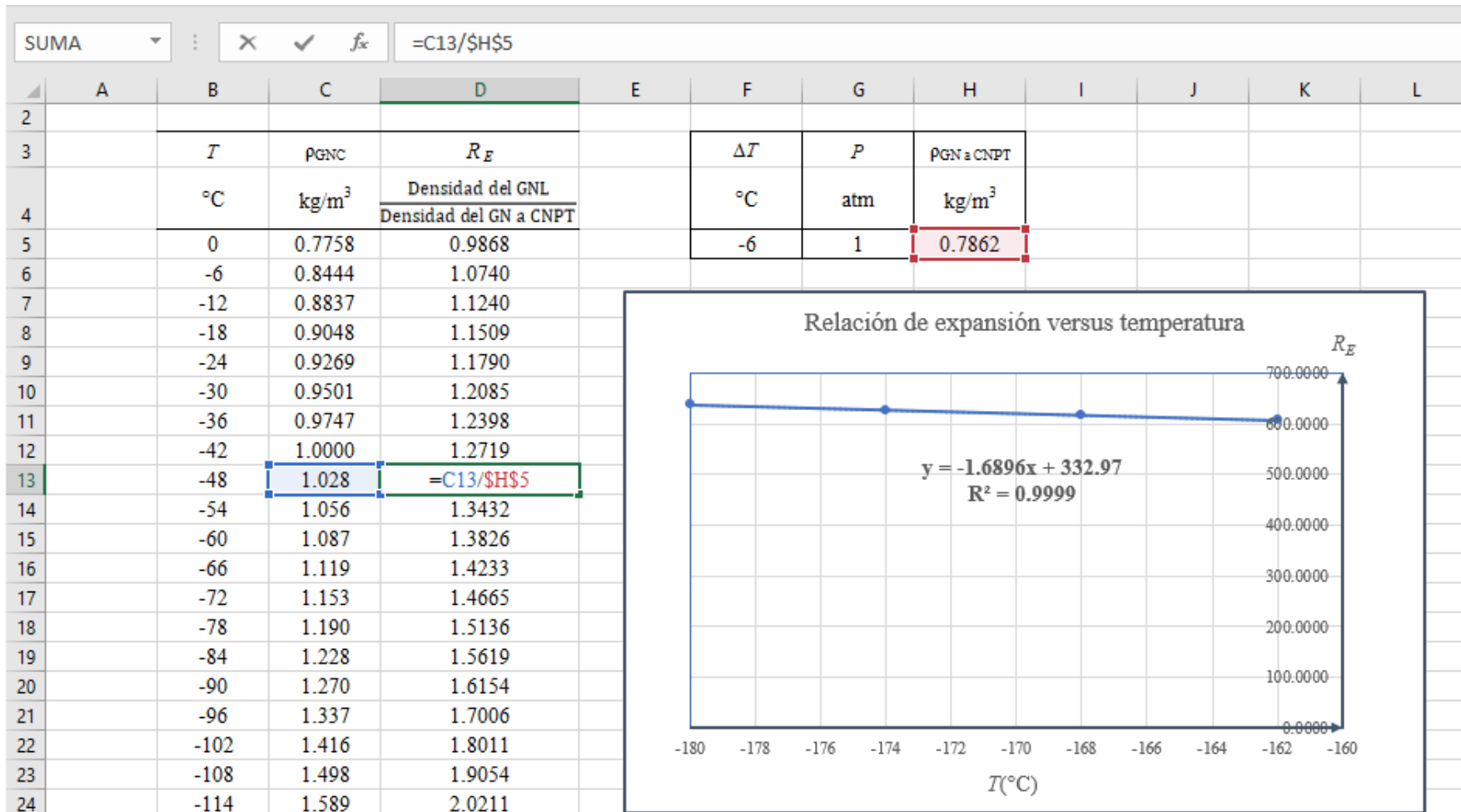
Anexo 1. Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>Problema general</p> <p>¿Cuáles son las ecuaciones entre la relación de expansión con la presión y la temperatura en los procesos de compresión y licuado del gas natural?</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Determinar las ecuaciones entre la relación de expansión con la presión y la temperatura en los procesos de compresión y licuado del gas natural.</p>	<p>Hipótesis general</p> <p>Existen las ecuaciones entre la relación de expansión con la presión y la temperatura en los procesos de compresión y licuado del gas natural.</p>	<p>Variables independientes</p> <p>T: temperatura</p>	<p>Grados Celcius (°C)</p> <p>atm</p>	<p>Tipo de investigación</p> <p>El enfoque es cuantitativo con nivel de profundización explicativo correlacional.</p> <p>Población</p> <p>Lo representan las múltiples simulaciones que se puedan realizar en la compresión y licuado del gas natural, lo cual indica que se tiene una población infinita.</p> <p>Muestra</p> <p>Criterio de inclusión:</p> <ul style="list-style-type: none"> Treinta (30) simulaciones en la compresión del gas natural, haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, para determinar la ecuación entre la relación de expansión y la presión (variando de 1 a 250 bar), manteniendo la temperatura constante (20°C). Treinta (30) simulaciones en el licuado del gas natural, haciendo uso del programa Aspen HYSYS V11.0, para determinar la ecuación entre la relación de expansión y la temperatura (variando de 0 a -180 °C), manteniendo la presión constante (1 atm). Esto indica que el tamaño total de la muestra será igual a 60.
<p>Problemas específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> ¿Cuál es la ecuación entre la relación de expansión y la presión en la compresión del gas natural? ¿Cuál es la ecuación entre la relación de expansión y la temperatura en el licuado del gas natural? 	<p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> Determinar la ecuación entre la relación de expansión y la presión en la compresión del gas natural. Determinar la ecuación entre la relación de expansión y la temperatura en el licuado del gas natural. 	<p>Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> Existe la ecuación entre relación de expansión y la presión en la compresión del gas natural. Existe la ecuación entre la relación de expansión y la temperatura en el licuado del gas natural. 	<p>Variable dependiente</p> <p>R_E: Relación de expansión.</p>		

Anexo 2. Hoja de cálculo de Excel para el GNC.



Anexo 3. Hoja de cálculo de Excel para el GNL.



Anexo 4. Esquema de las simulaciones realizadas en Aspen HYSYS V11.0 para el GNC.

The screenshot displays the Aspen HYSYS V11.0 software interface. The top menu bar includes File, Home, Economics, Dynamics, Plant Data, Equation Oriented, View, Customize, and Resources. The main toolbar contains various simulation tools like Utility Manager, Adjust Manager, Fluid Packages, Workbook, Reports, Input, Model, Flowsheet, Variable Manager, Case Studies, Stream Analysis, Pressure Relief, Emissions, and Datasheets. The status bar shows simulation parameters: Capital: ___USD, Utilities: ___USD/Year, Energy Savings: ___MW (___%), and Exchangers - Unknown: 0, OK: 0, Risk: 0.

The left sidebar shows a tree view of the simulation case, including Workbook, UnitOps, Streams, Stream Analysis, Equipment Design, Model Analysis, Data Tables, Strip Charts, Case Studies, Data Fits, Plant Data, Properties, Simulation, and Safety Analysis.

The central window displays the 'Material Stream: GNC a 167 bar' properties table. The table is organized into three tabs: Worksheet, Attachments, and Dynamics. The 'Worksheet' tab is active, showing the following data:

Worksheet	Stream Name	GNC a 167 bar
Conditions	Vapour / Phase Fraction	1.0000
Properties	Temperature [C]	20.00
Composition	Pressure [kPa]	1.670e+004
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	100.0
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	1885
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	5.835
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-8.150e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	135.1
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	-8.150e+006
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	2356
Emissions	Fluid Package	Basis-1
	Utility Type	

To the right of the table, a diagram shows a series of arrows representing material streams at different pressures: GNC a 142.1 bar, GNC a 150.4 bar, GNC a 158.7 bar, GNC a 175.3 bar, GNC a 183.6 bar, GNC a 191.9 bar, GNC a 200.2 bar, GNC a 208.5 bar, GNC a 216.8 bar, GNC a 225.1 bar, GNC a 233.4 bar, GNC a 241.7 bar, and GNC a 250 bar. The final stream is labeled GNC a 167 bar.

Anexo 5. Esquema de las simulaciones realizadas en Aspen HYSYS V11.0 para el GNL.

The screenshot displays the Aspen HYSYS V11.0 software interface. The main window shows a material stream properties window for 'GNL a -150°C'. The properties are as follows:

Worksheet	Stream Name	GNL a -150°C
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.7702
Properties	Temperature [C]	-150.0
Composition	Pressure [kPa]	101.3
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	100.0
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	1885
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	5.835
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-8.708e+004
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	134.0
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	-8.708e+006
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	2356
Emissions	Fluid Package	Basis-1
	Utility Type	

Below the properties window, a process flow diagram is visible, showing several streams of GNL a at different temperatures:

- GNL a -126°C
- GNL a -150°C (highlighted in orange)
- GNL a -174°C
- GNL a -132°C
- GNL a -156°C
- GNL a -180°C
- GNL a -138°C
- GNL a -162°C
- GNL a -144°C
- GNL a -168°C