



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Química e Ingeniería Química

Escuela Profesional de Ingeniería Química

**Determinación de una composición adecuada de la
mezcla Hidrógeno – Gas Natural para su transporte
seguro y eficiente por el ducto principal de distribución
de Lima**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniera Química

AUTOR

Lizbeth Jakelin ALFARO QUISPE

ASESOR

Dr. Raymundo ERAZO ERAZO

Lima, Perú

2024



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Alfaro L. Determinación de una composición adecuada de la mezcla Hidrógeno – Gas Natural para su transporte seguro y eficiente por el ducto principal de distribución de Lima [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Química]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Lizbeth Jakelin Alfaro Quispe
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	77711638
URL de ORCID	
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Raymundo Erazo Erazo
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	08439329
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-003-1480-7641
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Roberto Robles Calderón
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06078749
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Eliana Jara Morante
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	23860280
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.2.2. Tecnologías para mitigar los impactos ambientales de las actividades industriales.
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Facultad de Química e Ingeniería Química - Universidad Nacional Mayor de San Marcos País: Perú

	Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Cercado de Lima Latitud: -12.05586 Longitud: -77.08466
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2024 – Agosto 2024
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería Química http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.01 Ingeniería de Procesos http://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.04.02



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE

SAN MARCOS

Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, RAYMUNDO ERAZO ERAZO en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N° 000656-2024-D-FQIQ/UNMSM de la tesis, cuyo título es **Determinación de una composición adecuada de la mezcla Hidrógeno – Gas Natural para su transporte seguro y eficiente por el ducto principal de distribución de Lima**, presentada por la bachiller **Lizbeth Jakelin Alfaro Quispe** para optar el título Profesional de Ingeniería Química, CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 11% de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 22 de agosto de 2024

Firma del Asesor

Nombres y Apellidos del asesor: Raymundo Erazo Erazo

DNI: 8439329

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central Telefónica: 619-7000

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos miembros del Jurado Calificador nombrados por el señor Presidente del Comité Ejecutivo del "II Programa Ciclo Taller de Titulación Profesional por la Modalidad de Tesis y Trabajo de Suficiencia Profesional para la Facultad de Química e Ingeniería Química 2024-I", bajo la Presidencia del **Mg. ROBERTO ROBLES CALDERÓN**; la **Dra. ELIANA JARA MORANTE (Miembro)** y el **Dr. RAYMUNDO ERAZO ERAZO (Asesor)**; habiendo presentado para tal efecto la **TESIS**, titulada "**Determinación de una composición adecuada de la mezcla Hidrógeno – Gas Natural para su transporte seguro y eficiente por el ducto principal de distribución de Lima**" después de **SUSTENTADA Y APROBADA** la tesis elaborado por la bachiller en Ingeniería Química: **ALFARO QUISPE, LIZBETH JAKELIN**; para optar el **TÍTULO PROFESIONAL** de **INGENIERA QUÍMICA**, acordaron calificarlo con la **NOTA** de:

DIECISIETE

(LETRAS)

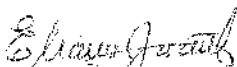
17

(NÚMEROS)

Ciudad Universitaria, 17 de agosto del 2024



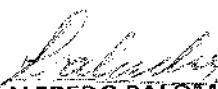
Mg. ROBERTO ROBLES CALDERÓN
Presidente



Dra. ELIANA JARA MORANTE
Miembro



Dr. RAYMUNDO ERAZO ERAZO
Asesor



Dr. RUBÉN ALFREDO PALOMINO INFANTE
Director de la E.P. de Ingeniería Química



DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mis padres Agustin Alfaro e Hilda Quispe, así como a mis hermanos Roberto Alfaro y Cintya Alfaro quienes me brindaron su apoyo incondicional y han sido mis principales guías que me han llevado hasta aquí, son fuente de mi fortaleza para poder cumplir todas las metas que me propongo.

Con gratitud, dedico este trabajo a ustedes

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, mi alma máter, por brindarme las herramientas necesarias para poder formarme como profesional y como persona. Agradezco a los docentes por contribuir a mi formación académica y compartir su conocimiento que ha sido clave en mi desarrollo.

Índice de contenido

I. RESUMEN	9
II. INTRODUCCIÓN.....	10
II.1. Introducción	10
II.2. Planteamiento del problema	12
Determinación del problema	12
Formulación del problema.....	14
II.3. Objetivos	14
II.4. Importancia y alcance de la investigación.....	15
II.5 Limitaciones de la investigación	15
III. REVISIÓN DE LITERATURA.....	17
III.1. Marco teórico	17
Redes de distribución de gas natural	17
III.2. Antecedentes del estudio.....	19
III.3 Bases teóricas.....	25
Hidrógeno	25
Gas natural	25
Metano	28
Modelo termodinámico Peng Robinson	29
Poder calorífico.....	31
III.4 Definición de términos.....	32

IV. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	33
IV.1 Hipótesis.....	33
Hipótesis específicas.....	33
Variable independiente.....	33
Variables dependientes.....	33
V. MATERIALES Y MÉTODOS	34
V.1 Área de estudio	34
V.2 Diseño de investigación.....	34
V.3 Población y muestra	40
V.4 Procedimientos, Técnicas e instrumento de recolección de información.....	40
V.5 Análisis estadístico	41
VI. RESULTADOS.....	45
VI.1 Presentación y análisis de los resultados	45
VII. DISCUSIÓN.....	61
VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	66
X. ANEXOS	68

Índice de tablas

Tabla 1	Composición Estándar del Gas Natural de Camisea	26
Tabla 2	Composición del gas natural	26
Tabla 3	Propiedades del Gas Natural	27
Tabla 4	Propiedades principales del Hidrógeno y Metano.....	29
Tabla 5	Coordenadas UTM de los tramos del ducto principal de Lima.....	34
Tabla 6	Descripción Técnica del Ducto Principal de Distribución de Lima.....	35
Tabla 7	Composición de Gas Natural en el ingreso de Cálidda.....	37
Tabla 8	Parámetros de Estudio y Límites de Operación	38
Tabla 9	Análisis estadístico de la Temperatura (°C)	42
Tabla 10	Análisis estadístico de la P entrada (barg).....	42
Tabla 11	Análisis estadístico descriptivo de la P salida (barg).....	43
Tabla 12	Coeficiente de correlación R^2	47
Tabla 13	Coeficiente de correlación r	47
Tabla 14	Tipo de relación entre el modelo termodinámico y las variables dependientes	47
Tabla 15	Nivel de significancia por cada variable dependiente	50
Tabla 16	Límites inferiores y superiores de las variables dependientes en la estación de Etevenza por Peng Robinson y considerando solo gas natural.	51
Tabla 17	Diseño factorial	71
Tabla 18	Resultados de Z, T rocío, Pc de acuerdo con la fracción molar de H_2	110
Tabla 19	Resultados del Análisis estadístico de Peng Robinson.....	115
Tabla 20	Comparación de porcentajes de error entre resultados por Visual Basic y Hysys para el método Peng Robinson	116

Índice de figuras

Figura 1	City Gate de Lurín.....	13
Figura 2	Construcción de los ductos para el transporte de gas natural y derivados.	17
Figura 3	Recorrido del Sistema de Transporte por ductos de GN y LNG	18
Figura 4	Flujo comercial de GN y LNG en el mercado interno	19
Figura 5	Representación molecular de Hidrógeno (H_2).....	25
Figura 6	Representación molecular de metano (CH_4)	28
Figura 7	Red principal de distribución de gas natural desde el City Gate de Lurín hasta la Central Térmica de Ventanilla.....	35
Figura 8	Simulación del ducto principal del transporte de gas natural.....	45
Figura 9	Relación del Fracción mol de H_2 y el factor de compresibilidad (Z).....	49
Figura 10	Relación de la Fracción mol de H_2 y la temperatura de rocío ($^{\circ}C$).....	49
Figura 11	Relación del Fracción mol de H_2 y poder calorífico(Kcal/m ³)	50
Figura 12	Fracción mol de H_2 vs Z a Pcte= 26.91 barg	53
Figura 13	Fracción mol de H_2 vs Z a Pcte= 27.03 barg.....	53
Figura 14	Fracción mol de H_2 vs Z a Pcte= 27.15 barg.....	54
Figura 15	Fracción mol de H_2 vs Z a Tcte=16.44 $^{\circ}C$	55
Figura 16	Fracción mol de H_2 vs Z a Tcte= 18.26 $^{\circ}C$	55
Figura 17	Fracción mol de H_2 vs Z a Tcte=20.07 $^{\circ}C$	56
Figura 18	P (barg) vs Z a diferentes composiciones molares de H_2	57
Figura 19	T($^{\circ}C$) vs Z a diferentes composiciones molares de H_2	58
Figura 20	Fracción mol de H_2 vs T rocío a diferentes presiones de operación.....	59

Figura 21	Fracción mol de H ₂ vs Poder calorífico a diferentes presiones de operación	59
Figura 22	Fracción mol de H ₂ vs Poder calorífico a diferentes temperaturas de operación..	60
Figura 23	Z vs Poder calorífico	60
Figura 24	Histograma de Temperatura (°C).....	68
Figura 25	Gráfica de caja de Temperatura (°C)	69
Figura 26	Histograma de P entrada (barg)	69
Figura 27	Gráfica de caja de P entrada (barg)	70
Figura 28	Histograma de P salida (barg)	70
Figura 29	Gráfica de caja de P salida (barg)	71
Figura 30	Diagrama de flujo para el cálculo de temperatura de burbuja.....	76
Figura 31	Diagrama de flujo para el cálculo de presión de burbuja	77
Figura 32	Diagrama de flujo para el cálculo de la presión de rocío	78
Figura 33	Diagrama de flujo para el cálculo de temperatura de rocío.....	79
Figura 34	Diagrama de flujo para el cálculo del factor de compresibilidad en fase vapor ...	80
Figura 35	Diagrama de flujo para el cálculo del poder calorífico	105
Figura 36	Cálculo de temperatura de rocío en Aspen Hysys.....	108
Figura 37	Cálculo de Z en Aspen Hysys.....	109

I. RESUMEN

El objetivo del presente trabajo de investigación es determinar una composición adecuada de la mezcla Hidrógeno – Gas Natural para su transporte seguro y eficiente por el ducto principal de distribución de Lima. El uso de hidrógeno producido por electrólisis a partir de energías renovables representa ser una práctica eco amigable con el medio ambiente, esta materia prima reconocida mundialmente como limpia no emite emisiones de carbono por lo tanto la inyección de este hidrógeno en el ducto principal de gas natural aporta con disminuir las emisiones de carbono hasta en un 20%. Sin embargo, la mezcla Hidrógeno - Gas natural conlleva a un análisis técnico más profundo por su seguridad en su transporte. Además, esta mezcla de Hidrógeno – Gas Natural debe de tener la misma eficiencia con respecto a su contenido energético que los clientes como generadoras eléctricas necesitan para sus procesos de conversión. Las variables de operación en el ducto tienen un rango de presión de salida de (26.9 a 27.1 barg), temperatura (20- 22°C), y su composición tiene un contenido de (0-20% mol de H₂) en mezcla con el gas natural, las cuales nos permitirán tener como resultado el factor de compresibilidad, temperatura de rocío y poder calorífico. El factor de compresibilidad es una variable de gran importancia ya que está directamente relacionado con el volumen que puede ocupar el gas a diferentes condiciones de presión y temperatura, la temperatura de rocío permite conocer la temperatura a la cual se condensarán líquidos del gas natural en el ducto y el poder calorífico es una medida que indica cuanta energía podrá producir por unidad de masa. Los modelos termodinámicos aplicados son Peng Robinson y Soave Redlich Kwong, estos modelos termodinámicos se desarrollarán en el programa Microsoft Visual Basic y Aspen Hysys (Process Simulation Software) respectivamente, y los resultados obtenidos de estos modelos tienen un coeficiente de correlación mayor a 0.9 brindándonos la seguridad y eficiencia de los resultados que buscamos en esta nueva mezcla de Hidrógeno-Gas natural.

II. INTRODUCCIÓN

II.1. Introducción

En la actualidad, la búsqueda del uso de energías renovables tiene como objetivo suplir las necesidades del constante crecimiento poblacional mundial, entonces en este contexto, el hidrógeno es una materia prima cuyo potencial indica ser una alternativa debido a su carácter no contaminante en su combustión, pero es necesario realizar mayor investigación para poder integrarlo en las actuales infraestructuras energéticas. En Lima, el caso de la red de distribución de gas natural es un buen objeto de estudio en la cual se puede plantear la necesidad de garantizar que este nuevo recurso en mezcla con el gas natural pueda tener un transporte seguro y eficiente.

La ciudad de Lima tiene una gran red de distribución que provechosamente se podría utilizar para poder evaluar cómo se comporta el hidrógeno en combinación con el gas natural en su actual infraestructura y así evitar costosas modificaciones o la implementación de nuevas instalaciones. El presente estudio, titulado “Determinación de una composición adecuada de la mezcla Hidrógeno – Gas Natural para su transporte seguro y eficiente por el ducto principal de distribución de Lima” tiene como objetivo analizar qué porcentaje del mol hidrógeno sería el adecuado para poder transportarlo en mezcla con el gas natural sin modificar al actual ducto principal, evaluando el cumplimiento de los parámetros operativos históricos y la fiabilidad de que la nueva mezcla hidrógeno – gas natural cumpla con valores de poder calorífico requeridos por el cliente.

Este presente estudio tiene como iniciativa el uso del hidrógeno como una variable para promover una transición energética más sostenible y así proporcionar información aplicable a otras situaciones de diferentes ciudades o países que tiene el mismo interés por integrar el hidrógeno en mezcla con el gas natural en sus actuales infraestructuras de redes de distribución.

En este sentido, la estructura de la investigación consiste en varios capítulos. En el **Capítulo II** se trata del planteamiento del problema presentando el contexto actual de transporte del gas natural y el efecto que el hidrógeno puede ejercer en su aplicación a nuestro actual sistema de distribución; en el **Capítulo III** se considera la revisión de la literatura analizando estudios previos y teoría con respecto al modelo termodinámico aplicable a la mezcla de hidrógeno – gas natural; en el **Capítulo IV** se plantea la hipótesis y variables a evaluar, en el **Capítulo V** se revisa el material y métodos de los procesos que se van a aplicar como el uso de del método Peng Robinson (PR) en Visual Basic y el método Soave Redlich Kwong (SRK) en el programa Aspen Hysys, en el **Capítulo VI** se tiene los resultados obtenidos los cuales responden a las hipótesis planteadas anteriormente, en el **Capítulo VII** se confirma que las hipótesis planteadas tienen validez y que es posible encontrar una composición adecuada de hidrógeno que pueda permitirse mezclarse con el gas natural en el ducto principal de Lima. En el **Capítulo VIII** se resumirá los hallazgos importantes sobre las relaciones entre el % mol de H₂ con el factor de compresibilidad, temperatura de rocío y poder calorífico. Así mismo la implicancia que estas variables tienen en la red de distribución.

II.2. Planteamiento del problema

Determinación del problema

La creación del Tratado de Kyoto nace como una respuesta al cambio climático, es aquí donde se contempla el compromiso de los países en desarrollo e industrializados a limitar y reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (ONU, 1997). Así mismo las Naciones Unidas en 2015 establecen los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la cuál buscan garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna. En el 2021, las Naciones Unidas reconocen el potencial del hidrógeno verde como agente para la descarbonización que se alinea a los propósitos de un desarrollo industrial sostenible. (ONU, 2024)

En el Perú, el sector energético emite en un 30.1% emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), a la vez dentro de esta categoría la industria dedicada a la generación eléctrica emite un 20.12% de GEI. Según el INGEI 2019, las emisiones de GEI en el Perú presenta un aumento constante de aproximadamente 3.5% cada año (MINEM, 2019), es por ello por lo que es necesario que en el Perú se incentive el uso de fuentes energéticas renovables. En la ciudad de Lima, la empresa que abastece las principales generadoras eléctricas es Cálidda, este a su vez tiene como uno de sus principales consumidores a la empresa generadora eléctrica de Ventanilla, el cual se convierte en uno de los principales contribuyentes de las emisiones de GEI en la región.

En nuestra búsqueda por contribuir con el desarrollo de energías alternativas sostenibles para disminuir las emisiones de huella de carbono, y al ser la generadora eléctrica de Ventanilla uno de los principales consumidores de gas natural en Lima; introducir el hidrógeno en mezcla con el gas natural tiene el potencial de disminuir la huella de carbono hasta en un 20%. La generadora eléctrica de ventanilla se alimenta de la empresa Cálidda a través de su ducto

principal desde el City Gate de Lurín, entonces inyectar el hidrógeno en el ducto supone evaluar qué porcentaje en mezcla con el gas natural sería el adecuado para que puedan tener un transporte seguro y la mezcla sea eficiente sin afectar el poder calorífico que necesita el cliente.

La presión y temperatura son variables operativas que están bajo supervisión del centro de control de Cálidda de forma continua, esto se debe principalmente a que estamos tratando con gases que presentan alto poder de inflamabilidad y explosividad, por ende, la mezcla gaseosa de Hidrógeno – Gas Natural, necesita aún más atención, ya que el hidrógeno tiene un mayor nivel de peligrosidad que el Gas Natural, y necesita de un estudio técnico para evaluar a qué condiciones operativas esta mezcla tendría un transporte seguro y eficiente.



Figura 1

City Gate de Lurín

Formulación del problema

Problema general

¿Qué porcentaje en mezcla de hidrógeno y gas natural es segura y eficiente para su transporte seguro por el ducto principal de distribución de Lima?

Problemas específicos

¿Cuál es la influencia del porcentaje en mezcla de hidrógeno y gas natural en el factor de compresibilidad para que su transporte sea seguro?

¿Cuál es la influencia del porcentaje en mezcla de hidrógeno y gas natural en la temperatura de rocío para que su transporte sea seguro?

¿Cómo evidenciar que la mezcla de hidrógeno y gas natural no afectará el valor del poder calorífico suministrado a los clientes finales?

II.3. Objetivos

Objetivo general

Determinar una composición adecuada de la mezcla Hidrógeno – Gas Natural para su transporte seguro y eficiente por el ducto principal de distribución de Lima.

Objetivos específicos

1. Determinar el factor de compresibilidad de la mezcla hidrógeno-gas natural con el fin de asegurar la prevención de posibles accidentes en su transporte.
2. Determinar la temperatura de rocío de la mezcla hidrógeno-gas natural sin comprometer su seguridad operativa.
3. Garantizar que el poder calorífico no afecte su capacidad energética por la inyección de hidrógeno al gas natural en la red.

II.4. Importancia y alcance de la investigación

El principio de la investigación es contribuir al desarrollo intelectual del país, el uso de la materia prima de hidrógeno se considera como una forma de incentivar y apostar por el uso de fuentes renovables para solventar las necesidades del estado peruano y no depender en su totalidad de recursos no renovables como lo es el gas natural. La aplicación de este trabajo de investigación que se realiza por programación y simulación resultará en datos aplicables a la situación actual de la red de distribución de Lima. Al mismo tiempo se incentiva el uso de materias primas provenientes de fuentes renovables como una medida de contribución a la descarbonización del medio ambiente.

El alcance de la investigación busca promover proyectos de uso de energías limpias y así poder apoyar con la transición energética. La investigación es de forma correlacional, y se realizará la interacción de la Presión, Temperatura y la composición de la mezcla hidrógeno-gas natural con el factor de compresibilidad, temperatura de rocío y poder calorífico que resultará en la viabilidad en su transporte y eficiencia energética de esta nueva mezcla para su cliente Etevensa.

II.5 Limitaciones de la investigación

El modelo termodinámico para estudiar la presente investigación será Peng-Robinson, este modelo es empleado principalmente en la industria de procesos de hidrocarburos. Sin embargo según Alkhatib et al, 2022, el análisis realizado valida que el modelo es aplicable a la mezcla hidrógeno-gas natural siempre y cuando las presiones en que se trabajen no sean bajas. En el presente trabajo se considerarán presiones que se encuentran por encima de los 25 bares por lo cual la aplicabilidad de este modelo no se verá afectado por sus limitaciones. En caso contrario, si la presente investigación se quiera aplicar a otras situaciones en la cual las

presiones se encuentran por debajo de 10 bares, el modelo no tendrá un resultado fiable y se deberán considerar otros modelos alternativos más adecuados para esas condiciones de operación.

En esta investigación como medida de validación de los resultados se usará el programa de simulación Aspen Hysys, que permitirá realizar el análisis de las propiedades fisicoquímicas de nuestra variable independiente en estudio y simular el proceso de investigación. Aunque el programa Aspen Hysys no tenga un modelo especializado en el estudio de la interacción de la mezcla hidrógeno y gas natural, representa ser una herramienta especializada en el rubro de hidrocarburos y que por sus resultados se ha destacado comercialmente como uno de los mejores en esta área.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

III.1. Marco teórico

Redes de distribución de gas natural

El transporte del gas natural por ductos es una actividad que forma parte de la cadena de valor del gas natural, y tiene como finalidad su transporte desde Cusco (Proyecto Camisea) a Lima (City Gate de Lurín). Este gas natural transportado por ductos tiene como finalidad alimentar a residencias, comercios, industria de pequeña y gran escala como materia prima de combustión. (Cálidda, Gas Natural de Lima y Callao, 2024)



Figura 2

Construcción de los ductos para el transporte de gas natural y derivados.

(OSIGNERMIN, La industria del gas natural en el Perú, Mirando al bicentenario y perspectivas recientes, 2021)

El gas natural que se extrae de los yacimientos de Camisea, en la Selva de la Región Cusco, se procesa en la Planta Malvinas donde se realiza la separación del gas natural en gas natural seco y líquido de gas natural.

En la **Figura 2** se muestra la actividad esencial de la cadena de valor del gas natural en el Perú que es la construcción de los ductos para el transporte del gas natural permitiendo que de forma continua y segura con un presupuesto menos costoso se pueda transportar el gas natural hacia la ciudad de Lima. (OSIGNERMIN, La industria del gas natural en el Perú, Mirando al bicentenario y perspectivas recientes, 2021)

El material de interés para la presente investigación es el gas natural seco, que es transportado por el gasoducto visualizable en la **Figura 3**, cuyo operador es la empresa Transportadora de Gas del Perú S.A. (TGP), que distribuye a Ayacucho, Ica y Lima cruzando las tres regiones del Perú. (OSIGNERMIN, La industria del gas natural en el Perú, Mirando al bicentenario y perspectivas recientes, 2021)

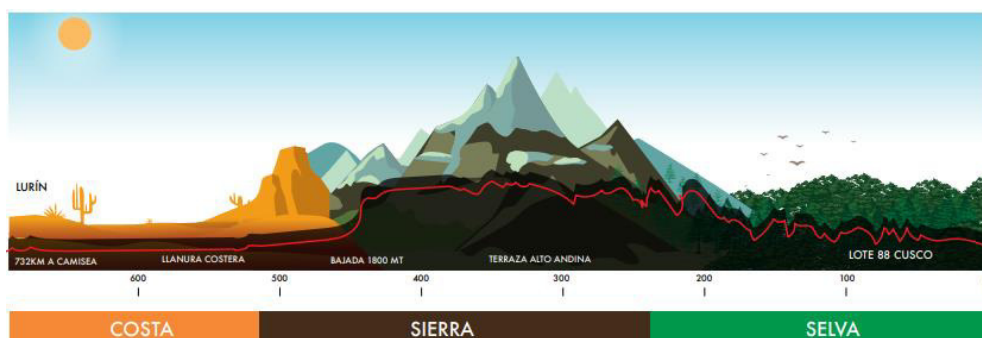


Figura 3

Recorrido del Sistema de Transporte por ductos de GN y LNG (OSIGNERMIN, La industria del gas natural en el Perú, Mirando al bicentenario y perspectivas recientes, 2021)

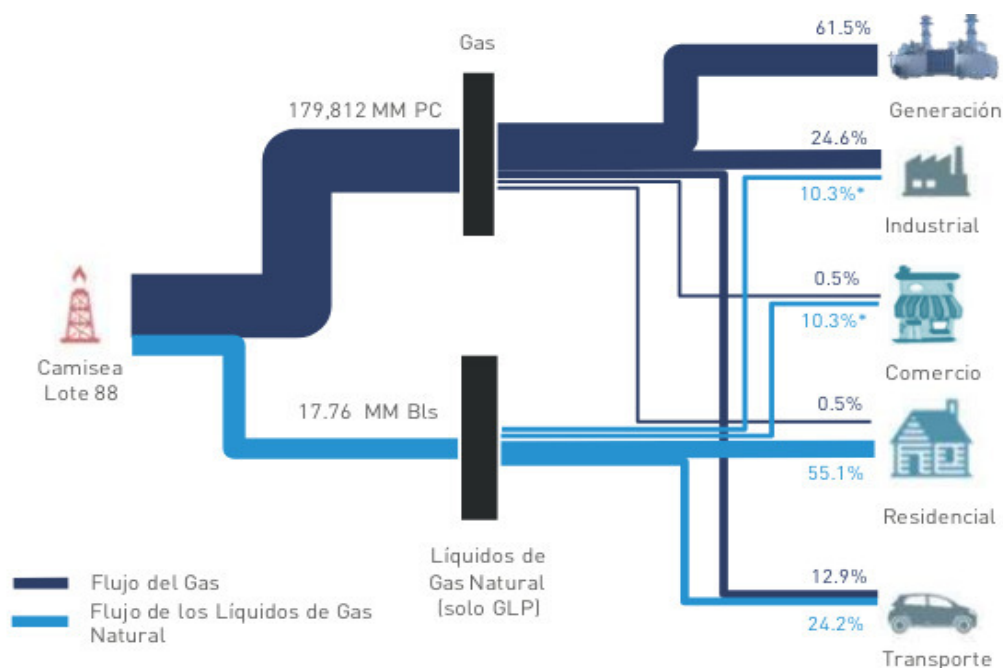


Figura 4

Flujo comercial de GN y LNG en el mercado interno (OSIGNERMIN, Huellas de energía limpia. Impactos del proyecto Camisea, 2023)

De acuerdo con el flujo comercial del gas natural en el Perú visible en la **Figura 4**, el 61.5% de esta materia prima es destinada al sector eléctrico. Este valor significativo se debe a la transición histórica de los recursos utilizados, donde inicialmente se empleaba carbón y diésel, posteriormente se adoptó por el gas natural, y actualmente se busca promover el uso de hidrógeno como recurso energético. (OSIGNERMIN, Huellas de energía limpia. Impactos del proyecto Camisea, 2023)

III.2. Antecedentes del estudio

Ismail Alkhatib et al. (2022) analizó “*Accurate Predictions of the Effect of Hydrogen Composition on the Thermodynamics and Transport Properties of Natural Gas*” [Predicciones precisas del efecto de la composición del hidrógeno en la termodinámica y las propiedades de transporte del gas natural]. El objetivo del estudio fue realizar una comparación de los modelos

termodinámicos para evaluar los cambios de las propiedades termofísicas del hidrógeno en mezcla con el gas natural. Su metodología de trabajo es realizar una comparación de tres modelos termodinámicos, las ecuaciones de estado de Peng- Robinson, el modelo empírico multiparamétrico GERG-2008 y las ecuaciones de estado polar soft-SAFT, y estos modelos fueron aplicados considerando los componentes más conocidos de la mezcla del hidrógeno y gas natural. Las propiedades halladas fueron la composición en equilibrio de la fase vapor y líquido del hidrógeno, loci críticos (aplicable a solo mezclas binarias), propiedades derivadas de segundo orden, y viscosidad. En el caso de la composición en fase vapor de H_2 , fase líquida H_2 , y presión crítica de mezclas binarias, los modelos PR EoS, GERG-2008 y soft-SAFT presentaron un error promedio de 8.29%, 13.31% y 5.79% con respecto a datos experimentales. Sin embargo fue necesario la precisión de los modelos en sus fases de equilibrio en mezcla con el gas natural el cual incluye metano, etano, n-propano, N_2 ; CO_2 . En la evaluación de las ecuaciones de estado considerando el carácter multicomponente de la mezcla Hidrógeno-Gas Natural para hallar sus composiciones fase vapor y líquida tienen un resultado de error promedio de 2.73%, 3.48% y 1.8% para el modelo PR EoS, GERG-2008 y soft-SAFT respectivamente. Por otro lado las propiedades de densidad, capacidad calorífica isobárica y viscosidad fueron evaluados en una mezcla binaria dando como resultado un error de 1.15%, 1.03% y 1.41% con respecto a su densidad; en 0.45%, 0.46%, 0.49% de error con respecto a su capacidad calorífica, y en 1.98%, 1.08%, 1.18% de error con respecto a su viscosidad para los modelos PR EoS, GERG-2008 y soft-SAFT respectivamente. Todos estos resultados fueron obtenidos considerando una presión por encima del 60% de la presión crítica de las isothermas de las mezclas en estudio. A condiciones de operación del ducto en estudio ($T= 293K$ y $P=3-18$ MPa) el incremento de hidrógeno disminuyó la densidad en un 5% por cada 5mol % de H_2 incluido en la mezcla. En el caso del factor de compresibilidad aumentó en un 2.5% por cada

5% mol de H_2 , lo que resulta en la reducción del volumen disponible en el ducto. En el caso de la viscosidad se reduce en 0.4% por 5% mol de H_2 y en el caso de la velocidad de sonido aumenta en un 5% por cada 5% mol de H_2 . El método GERG-2008 fue más predictivo seguido del método Peng Robinson y so- SAFT. Sin embargo la inexactitud que presentó para determinar las fases de equilibrio que se calcularon inicialmente tiene un impacto en los cálculos posteriores a ellos, por consiguiente tendría un resultado engañoso para el cálculo del factor de compresibilidad, densidad, etc. Adicionalmente, los datos experimentales que fueron utilizados para la comparación pueden presentar carencias de precisión o confiabilidad debido a falta de repetibilidad en los resultados.

Zemite et al. (2023) analizó “*Blending Hydrogen with Natural Gas/ Biomethane and Transportation in existing gas networks*” [Mezcla de Hidrógeno con Gas Natural/Biometano y Transporte en redes de gas existentes]. El objetivo de su investigación es el estudio de la mezcla de hidrógeno y biometano en la infraestructura de redes en Estados Unidos, en la cual se analizó la necesidad de cómo plantear el proceso de la inyección de hidrógeno siendo el equipo de mezcla crucial para el proceso, pasada esta etapa se evalúa el comportamiento de la mezcla con el hidrógeno en el ducto de transporte de gas natural y se evalúa su compatibilidad con las condiciones operativas de la red de distribución verificando su seguridad e integridad. El estudio reveló que el contenido porcentual del hidrógeno en mezcla con el gas natural tiene una fracción molar de hidrógeno que varía desde 0 a 12% dependiendo de la calidad de gas natural que se tiene en cada país. Sin embargo, existen limitaciones en su transporte de esta mezcla debido a la cantidad de hidrógeno presente, lo que podría dificultar la distribución del Hidrógeno-Gas Natural a instalaciones con ubicaciones lejanas. El uso de polietileno en las redes de gas surge como una respuesta a la demanda de inyectar el hidrógeno en la mezcla, ya

que este material presenta una notable resistencia a la corrosión, y el mantenimiento de este material es menos costoso. En conclusión, la mezcla y el transporte de Hidrógeno – Gas natural en la red de gas existente en Estados Unidos sigue siendo un tema por discutir, la falta de un marco normativo, el porcentaje aceptable de H_2 en la red, la necesidad del usuario final en cuanto a la materia prima que prefieren es aún tema de debate.

Según Xiao Tian y Jingjing Pei (2023) analizó “*Study progres on the pipeline transportation safety of hydrogen – blended natural gas*” [El estudio de la seguridad en el transporte por ductos del hidrógeno en mezcla con el gas natural]. El objetivo de su investigación es analizar la influencia del hidrógeno en mezcla con gas natural en los ductos existentes considerando la compatibilidad de su tubería y la relación de la mezcla de hidrógeno. Analiza la compatibilidad de la tubería existente para la mezcla de hidrógeno en gas natural evaluando sus propiedades mecánicas de dureza, plasticidad, tenacidad los cuales son factores que afectan a la seguridad de la tubería. Así mismo, analiza la seguridad del transporte por ductos de gas natural mezclado con hidrógeno respecto a dos aspectos fuga y acumulación, así como combustión y explosión. El resultado de la compatibilidad de la tubería con respecto a sus propiedades mecánicas si se vieron afectadas cuando el porcentaje en composición del hidrógeno se vio en aumento. Sin embargo debido a la continua investigación en universidades chinas se han encontrado maneras de prevenir y formas de controlar las posibles afecciones por el contenido de hidrógeno en la mezcla. El resultado de la mezcla en su densidad tiene una tendencia a bajar conforme el porcentaje de hidrógeno sea mayor entonces la ocurrencia de reacciones de combustión al nivel de suelo es menos propenso a darse. Sin embargo debido a estudios por la Universidad de Waterloo esta premisa se ve afectada en cuanto llega al 20% en composición de hidrógeno y gas natural ya que conforma aumente el contenido de hidrógeno

a partir de esa cantidad la velocidad del gas de mezcla en fuga se verá duplicado y por ende su capacidad de combustión puede darse en menor tiempo. En conclusión, el porcentaje en composición de hidrógeno en mezcla tienen una influencia directa para evaluar su tipo de infraestructura de transporte correcta, así como también su seguridad durante su transporte.

Ana Bella Galyas et al. (2023) analizó “Effect of hydrogen blending on the energy capacity of natural gas transmission networks” [Efecto de la mezcla de hidrógeno sobre la capacidad energética de las redes de transporte de gas natural]. El objetivo del presente estudio es determinar el cambio en el contenido de energía transferible debido a la mezcla de hidrógeno en la red de transmisión de gas natural a alta presión. Para la evaluación del efecto de energía de la mezcla Hidrógeno y Gas Natural consideraron que la mejor ecuación de estado era Soave – Redlich -Kwong (SRK) Eos , el cual es un modelo termodinámico usado para evaluar el comportamiento del gas natural e hidrocarburos pesados y utiliza el software Aspen Hysys para graficar las tendencias del factor de compresibilidad, capacidad calorífica, factor de transmisión de energía con respecto a la composición del hidrógeno en mezcla con el gas natural considerando cantidades porcentuales desde el 0% a 100% de hidrógeno en composición. El primer resultado es el factor de compresibilidad del gas natural e hidrógeno como componentes puros, en el caso del gas natural a diferentes presiones que varían desde 0 a 75 bara y a diferentes temperaturas, se tiene que el factor de compresibilidad disminuye conforme la presión aumenta, en el caso del hidrógeno tiene una tendencia inversa, el factor de compresibilidad es mayor a 1 y tiene una tendencia a incrementar en caso la presión incremente. Con el 20% mol de Hidrógeno en la mezcla se tiene que el factor de compresibilidad disminuye notablemente conforme avanza la presión y a la vez el factor de compresibilidad es menor conforme la temperatura decrece. El resultado del factor de transmisión de energía (FTE)

señala que conforme mayor sea la fracción molar, el FTE será menor. En la investigación de Ana Belgas, se realizó un análisis de hasta 100% de hidrógeno en la mezcla, posterior al 80% de hidrógeno en mezcla el FTE aumenta conforme el porcentaje de Hidrógeno en mezcla sea mayoritaria, por debajo del 80% su comportamiento es liderado por las propiedades del gas natural, es decir el FTE decrece. El resultado del requerimiento de poder de compresión se basa en que si se mantiene las operaciones actuales de operación, para mantener el flujo de gas actual se tendrá que incrementar el poder de compresión neto. El resultado obtenido es que el consumidor final al recibir la mezcla de hidrógeno y gas natural conforme tenga mayor contenido en hidrógeno necesitará mayor potencia de compresión y esta aumenta hasta un 260% en caso el hidrógeno sea puro. En conclusión el factor de compresibilidad es necesario para el cálculo energético del contenido de energía transferible disminuye conforme aumente el hidrógeno y aumenta la necesidad de compresión requerida.

III.3 Bases teóricas

Hidrógeno

El hidrógeno es una molécula compuesta por dos átomos de hidrógeno (H_2), que puede clasificarse según su forma de obtención. En el presente trabajo de investigación se tomará como principal recurso el hidrógeno verde que es obtenido mediante fuentes renovables. (Rigas & Amyotte, 2013)

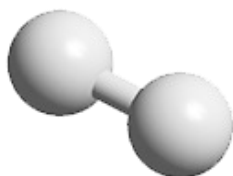


Figura 5

Representación molecular de Hidrógeno (H_2)

El método ideal para la producción de hidrógeno verde es por electrólisis, un proceso electroquímico donde se obtiene hidrógeno y oxígeno descomponiendo el agua. Esta forma de obtención es un proceso verde considerando que la energía que implica en la ecuación química sea proveniente de fuentes renovables. (Alkhatib et al., 2022)

Gas natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos principalmente compuesto por el metano (CH_4) seguido por el etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}) y componentes más pesados, o también conocido como hidrocarburos más complejos. (Ikoku, 1992)

En la siguiente **Tabla 1**, **Tabla 2**, y **Tabla 3** se puede visualizar la composición estándar por cromatografía, y las propiedades fisicoquímicas del Gas Natural de Camisea, registrada en

los análisis de calidad evaluado por la empresa Cálidda.

Tabla 1

Composición Estándar del Gas Natural de Camisea

Componentes	Fracción molar
Metano	0.8854
Etano	0.1032
Propano	0.0002
i-Butano	0.0000
n-Butano	0.0000
N2	0.0054
CO2	0.0058
H2O	0.0000

Fuente: OSIGNERMIN

Tabla 2

Composición del gas natural

Componentes	Unidad	Valor
Azufre total	mg/Sm3	15
H ₂ S	mg/Sm3	3
CO ₂	%v/v	2
Inertes totales	%v/v	4
Vapor de agua	mg/Sm3	65
Punto de rocío de	°C	-4

hidrocarburos a 5500

kPa

Partículas sólidas

u

6

Fuente: Gas Natural de Lima y Callao SA (Calidda)

Tabla 3

Propiedades del Gas Natural

Propiedad	Condición	Unidad	Valor
Peso molecular		g/mol	17.7
Gravedad específica			0.61
Factor de compres. Z	A 15.6°C, 1.013 bar(a)		0.9971
Factor de compres. Z	A 15.6°C, 100 bar(a)		0.7644
Factor de compres. Z	A 15.6°C, 150 bar(a)		0.7262
Viscosidad dinámica	A 15.6°C, 1.013 bar(a)	cp	0.0109
Calor específico	A 15.6°C, 1.013 bar(a)	kJ/(kg°C)	2.1
Poder calorífico superior		MJ/m ³	39.93
Poder calorífico inferior		MJ/m ³	36.04
Índice de Wobbe		HHV/SG ^{0.5}	46 a 56
Punto de rocío para hidrocarburos de 1 a 35 MPa		°C	-10

Fuente: Gas Natural de Lima y Callao SA (Calidda)

Metano

El metano es el hidrocarburo más simple, que proviene de la descomposición de materia orgánica. El metano es incoloro e inodoro y se considera un gas de gran potencial al producir más energía calorífica y luminoso por masa que otro hidrocarburo más pesado.

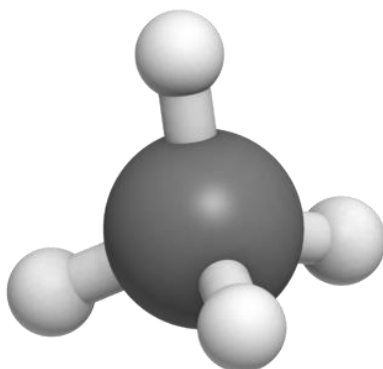


Figura 6

Representación molecular de metano (CH₄)

A continuación se realizará un cuadro comparativo de las propiedades principales del hidrógeno y metano

En la siguiente **Tabla 4** permite visualizar y realizar una comparación de las propiedades principales del Hidrógeno y Metano (Componente principal del gas natural).

Tabla 4

Propiedades principales del Hidrógeno y Metano

Propiedad	Unidad	Hidrógeno (H ₂)	Metano (CH ₄)
Peso molecular	g/mol	2.016	16.04
Presión crítica	barg	12.1418	45.3936
Temperatura crítica	barg	-239.710	-82.4510
Factor de compres. Z a 15.6°C, 100 bar(a)		1.040	0.8071
Fracción vapor a 15.6°C, 100 bar(a)		1	1
Temperatura de rocío a 1 MPa	°C	-241.9	-124.2

Fuente: Elaboración propia

Según la Red Europea de Operadores de sistemas de transporte de gas (ENTSOG), el transporte del gas natural e hidrógeno en mezcla es posible sin ejercer ninguna modificación de la tubería, siempre que la masa de hidrógeno sea baja.

Modelo termodinámico Peng Robinson

Este modelo es uno de los usados para la industria de hidrocarburos y gas, debido a su simplicidad y su precisión para poder encontrar las propiedades termodinámicas. (Alkhatib et al., 2022)

Ecuación de estado Peng Robinson

$$P = \frac{RT}{V - B} - \frac{A}{V(V + B) + b(V - B)}$$

Expresión cúbica de la ecuación de estado

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0$$

Donde:

P es presión

T es temperatura

V es volumen molar

R es la constante universal de los gases

a y b son parámetros empíricos específicos de interacción de los componentes.

Las constantes A y B son calculadas mediante las siguientes ecuaciones

$$w_1 < 0.49$$

$$m_i = 0.37464 + 1.54226 \times w_1 - 0.26992 \times w_1^2$$

$$w_2 \geq 0.49$$

$$m_i = 0.379642 + 1.48503 - (0.164423 - 0.016666 \times w_1) \times w_1$$

$$\alpha_i^{0.5} = \left(1 + m_i \times (1 - T_{ri}^{0.5}) \right)$$

$$a_{ci} = 0.457235 \times \frac{(R \times T_{ci})^2}{P_{ci}}$$

El parámetro a_c

$$a_i = a_{ci} \alpha_i$$

$$a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_i x_j (a_i a_j)^{0.5} (1 - k_{ij})$$

$$b_i = 0.077796 \times \frac{R \times T_{ci}}{P_{ci}}$$

$$b = \sum_{i=1}^N x_i b_i$$

$$A = \frac{a \times P}{(R \times T)^2}$$

$$B = \frac{b \times P}{R \times T}$$

Las ecuaciones utilizadas así como los parámetros en la programación para el cálculo de temperatura de rocío, factor de compresibilidad fueron obtenidas del Perry's Chemical Engineers's Handbook (2007).

Poder calorífico

Es la cantidad de calor liberada en la combustión completa en aire de la unidad de masa de un combustible. En el caso de hallar el poder calorífico de los gases, este se mide tomando como referencia 15°C y 1 atm teniendo como unidad k cal/ m³ st o BTU/ft³ st. El poder calorífico se clasifica en poder calorífico superior (PCS), que incluye al calor de condensación del vapor de agua de los gases de la combustión y el poder calorífico inferior (PCI) que no incluye el calor absorbido por el agua producida en la combustión, que es caracterizado por ser 10% menor al PCS. (Viloche, 2023)

Poder calorífico ideal

$$H = \sum_{i=0}^n x_i \times H_i$$

En el caso se quiere hallar el poder calorífico real este debe ser multiplicado por su factor de compresibilidad (Z), este factor es generalmente menor a uno por lo cual en un recipiente dado contendría mayor cantidad de gas real en comparación con un gas ideal. (Viloche, 2023)

III.4 Definición de términos

Energía Renovables: Son fuentes energéticas que se basan en recursos como el sol, viento, agua, biomasa vegetal o animal, son consideradas limpias y ecológica ya que no contribuye a la reducción de emisiones de carbono.

Combustión: Es una reacción química exotérmica de oxidación, que generalmente en presencia de oxígeno desprende grandes cantidades de energía.

Huella de carbono: Representa una medida de impacto mundial, es el volumen total de los gases de efecto invernadero (GEI) que produce el crecimiento industrial del ser humano

Gases de efecto invernadero (GEI): Es un conjunto de gases industriales que atrapan calor en la atmosfera y mantiene la temperatura a un nivel adecuado para la vida. Sin embargo, un incremento de la concentración de estos gases puede llevar al calentamiento global y al cambio climático.

Descarbonización: Un proceso de reducción de la cantidad de carbono, especialmente de CO₂, que involucra múltiples estrategias para reducir las emisiones y mitigar el cambio climático.

Simulación: Técnica de modelamiento computacional para replicar o estudiar el posible comportamiento de mis variables reales, sujetos a diferentes condiciones sin la necesidad de experimentar con un sistema real.

Capacidad calorífica: Es la relación entre la cantidad de energía calorífica transferida a un cuerpo y el increment

IV. HIPÓTESIS Y VARIABLES

IV.1 Hipótesis

El actual ducto principal de distribución de Lima permitirá inyectar un porcentaje de hidrógeno en mezcla con gas natural para poder transportarse de forma segura y eficiente.

Hipótesis específicas

1. El factor de compresibilidad de la mezcla hidrógeno – gas natural disminuirá el nivel de peligrosidad por concentración del gas natural a nivel del suelo.
2. La nueva temperatura de rocío de mezcla hidrógeno – gas natural va a ayudar en la prevención de formación de líquidos y garantizará el proceso de transporte seguro.
3. El poder calorífico de mezcla hidrógeno – gas natural va a garantizar la eficiencia energética de los procesos de combustión en las instalaciones de destino.

IV.2 Variables

Variable independiente

1. Concentración de hidrógeno en mezcla con el gas natural para un transporte seguro.

Variables dependientes

1. Poder calorífico de la mezcla hidrógeno-gas natural
2. Factor de compresibilidad de la mezcla hidrógeno-gas natural
3. Punto de rocío de la mezcla hidrógeno-gas natural

V. MATERIALES Y MÉTODOS

V.1 Área de estudio

La ubicación analizada en este trabajo se extiende desde el City gate de Lurín hasta la estación de medición del cliente de generación eléctrica Enel (Central térmica de ventanilla). Este tramo abarca el tramo principal de la red de distribución de Lima y la infraestructura relacionada con la generación de energía eléctrica.

Tabla 5

Coordenadas UTM de los tramos del ducto principal de Lima.

Vértice del gasoducto	Coordenadas UTM- zona 18L	
	Este	Norte
City Gate -Lurin		
Villa el Salvador	301092.58	8645109.22
San Juan de Miraflores	291937.81	8647353.61
Santa Anita	285438.86	8656167.37
El Agustino	282576.97	8668765.02
C. de la Legua	268470.29	8667550.79
Estación Terminal de Ventanilla	268691.64	8579370.47

V.2 Diseño de investigación

El enfoque por realizar en la presente investigación es cuantitativo y el alcance de la investigación es correlacional. Realizaremos interacciones entre la Presión, Temperatura y la composición de la mezcla hidrógeno-gas natural con el factor de compresibilidad, temperatura de rocío y poder calorífico.

Para la presente investigación, se tuvo en consideración que la industria con mayor consumo de gas natural son las generadoras eléctricas al nivel de ciudad de Lima, es por ello por lo que el análisis se evaluará en el ducto principal de distribución (red principal) de Lima que dista desde el City Gate de Lurín hasta la generadora eléctrica de Ventanilla (Enel), teniendo un recorrido de 62 km de longitud (OSIGNERMIN, Proyecto: Sistema de distribución de gas natural en Lima y Callao, 2008)

Tabla 6

Descripción Técnica del Ducto Principal de Distribución de Lima

Descripción	Valor
Material	Acero inoxidable
Diámetro	20"
Longitud	62 km

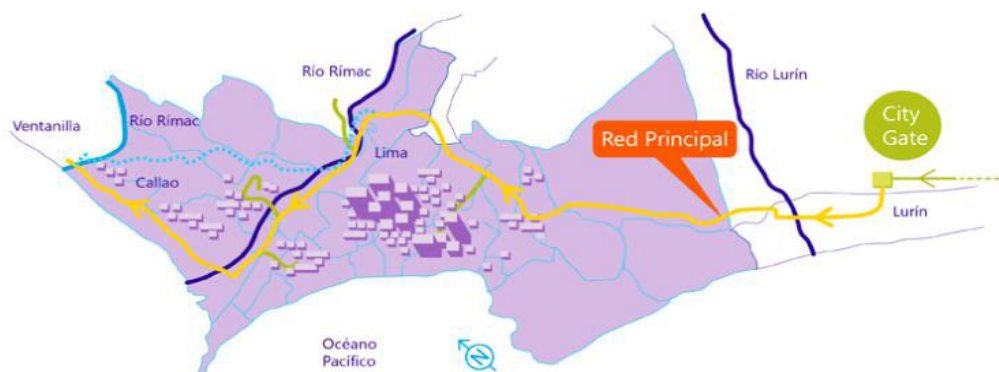


Figura 7

Red principal de distribución de gas natural desde el City Gate de Lurín hasta la Central Térmica de Ventanilla

En el reglamento de distribución de gas natural por red de ductos (Decreto Supremo N° 042-99-EM), capítulo 3 (Obligaciones del Concesionario) indica lo siguiente:

- En el artículo 43° menciona que el volumen del gas natural debe ser corregido a condiciones estándar de presión y temperatura las cuales son a 1013.25 mbar y 15.5°C respectivamente.
- En el artículo 44° menciona que no contendrá más de 3 mg /m³ (st) de Sulfuro de Hidrógeno, ni más de 15 mg/m³(st) de azufre total.
- En el artículo 44° menciona que no contendrá Dióxido de Carbono en más de 3.5 % de su volumen y una cantidad de inertes totales no más de 6% de su volumen, que se entiende como gases inertes al contenido de nitrógeno y/o otros gases diferentes al dióxido de carbono.
- En el artículo 44° menciona que la composición del gas natural transportada deberá estar libre de agua en estado líquido y contendrá como máximo 65 mg/m³(st) de vapor de agua.
- En el artículo 44° menciona que la temperatura no puede superar una cantidad de 50°C
- En el artículo 44° menciona que el contenido calorífico bruto debe estar comprendido entre 8450 y 10 300 kcal/m³(st)

Según el análisis realizado por la empresa Cálidda; la composición de gas natural no presenta sulfuro de hidrógeno ni azufre. El nitrógeno tiene un porcentaje molar de 1.06%, el dióxido de carbono en 0.32% y el vapor de agua en 0%, estos valores cumplen con los límites impuestos en el reglamento de distribución de gas natural por red de ductos anteriormente explicado. (OSIGNERMIN, Reglamento de distribución de gas natural por red de ductos, 2005)

En la **Tabla 7** se visualiza la composición del gas natural analizado por la empresa Cálidda, el cual nos servirá como composición base para la incorporación de hidrógeno en su mezcla.

Tabla 7

Composición de Gas Natural en el ingreso de Cálidda

Componentes	Fracción molar
Metano	0.8937
Etano	0.0857
Propano	0.0065
i-Butano	0.0002
n-Butano	0.0001
N ₂	0.0106
CO ₂	0.0032
H ₂ O	0.0000

Las variables necesarias para poder encontrar el resultado del factor de compresibilidad, la temperatura de rocío y el poder calorífico son la presión, temperatura y composición del gas en estudio.

Se analiza la presión y temperatura en la estación de medición de la empresa generadora eléctrica de Ventanilla desde el día operativo 01 de enero de 2022 hasta el término del día operativo 30 de abril del 2024, esto es debido a que mi interés principal es que cuando sea transportado de forma segura y eficiente, el cliente debe tener todas las condiciones operativas que ellos necesitan.

En el City Gate se tiene como presión máxima de entrada 140 barg y la presión de salida tiene un rango de 40 a 50 barg después de ser regulado. (Pacific S.A., 2002). Este rango vendría a ser la presión operativa mínima y máxima permitida. Sin embargo, para la presente investigación se utilizarán los datos operativos de la estación de medición de la empresa generadora eléctrica ventanilla donde su presión operativa no excede los 30 bar

Los datos obtenidos para realizar la evaluación son extraídos de los reportes operativos volumétricos publicados por la empresa Cálidda, se analizó la presión y temperatura en la estación de medición de la empresa generadora eléctrica de Ventanilla

El rango de concentración molar de la mezcla hidrógeno-gas natural se considera un 0% hasta 20% en composición de hidrógeno.

Para proceder a calcular el número de experimentos a tratar en la presente investigación, usaremos el método de diseño factorial. La cantidad de factores a evaluar son 3 y el total de corridas tiene un resultado de 99.

Tabla 8

Parámetros de Estudio y Límites de Operación

Variable	Unidad	Límite inferior	Límite superior	Niveles
% mol de H ₂ en Gas natural	-	0%	20%	11
Presión	barg	26.91	27.15	3
Temperatura	°C	16.44	20.07	3

En la sección de ANEXOS se encuentra el análisis descriptivo de la presión y temperatura. Así mismo los datos obtenidos del diseño factorial considerando el porcentaje mol de hidrógeno en mezcla con el gas natural.

El presente trabajo es realizado mediante el uso de modelos termodinámicos para evaluar sus propiedades termofísicas en el transporte del hidrógeno-gas natural por el ducto principal, este estudio permitirá garantizar su seguridad y eficiencia de la materia prima en diferentes escenarios y condiciones operativas.

La implementación de pruebas prácticas en la red podría causar interrupciones en el suministro y afectar la calidad del servicio; es por ello que modelar el comportamiento de la mezcla hidrógeno-gas natural mediante simulación nos permitirá tener un mayor alcance técnico evaluable.

Los modelos escogidos a evaluar son Peng Robinson (PR) y Soave – Redlich-Kwong (SRK). El modelo Peng Robinson será realizado en el programa Microsoft Visual Basic permitiéndonos la comprensión profunda de los fundamentos termodinámicos detrás del modelo que a la vez permitirá realizar ajustes específicos considerando la composición de mezcla en estudio hidrógeno-gas natural, lo cual no puede ser fácilmente realizables en el programa de Simulación Aspen Hysys. Por otro lado el uso del modelo Soave – Redlich-Kwong se realizará en el programa de simulación Aspen Hysys el cual permitirá validar la confiabilidad de los resultados obtenidos, y así proporcionar credibilidad en esta investigación.

El diseño factorial completo son considerando 3 factores, con 1 réplica

El factor A, el % de mol de H_2 en Gas Natural tiene 11 niveles

El factor B, la Presión tiene 3 niveles

El factor C, la Temperatura tiene 3 niveles

El número de interacciones que existen entre 3 factores da un resultado de 99 corridas. La visualización de cada corrida establecida para la presente investigación se encuentra en la sección de anexos en la **Tabla 17**.

Los datos arrojados por estos dos programas se evaluarán mediante una gráfica de correlación en la cual se podrá relacionar la interacción entre las tres variables de respuesta y los métodos utilizados en los dos programas.

V.3 Población y muestra

El presente trabajo es aplicable al transporte del gas natural desde el city gate de Lurin hacia su principal generador eléctrico de Ventanilla donde se evaluará el % mol de H_2 desde 0 a 20%, la Presión desde 26.1 a 27.15 barg, y la Temperatura desde 16.44 a 20.07 °C.

La muestra de estudio se determinó mediante un análisis descriptivo en el software R studio. A partir de histogramas, y gráfica de caja se tuvo como resultado que los rangos de trabajo se verían reflejados en proporciones de 11, 3, 3 niveles con respecto al % mol de H_2 , Presión, y Temperatura , respectivamente.

V.4 Procedimientos, Técnicas e instrumento de recolección de información

Mediante el programa R Studio se diseñó factorialmente la cantidad de corridas que se realizará para el estudio, se mantendrá una tabla fija de la composición del gas natural de Cálidda, y el único valor que incrementará en cada corrida es el porcentaje de hidrógeno en la mezcla, con el fin de poder tener una visión completa sobre el comportamiento del Hidrógeno – Gas Natural. Se hará una evaluación de las caídas de presión en el programa Aspen Hysys por cada tramo desde el city gate de Lurín hasta la generadora eléctrica Etevensa, las propiedades termodinámicas son propiamente de la fuente de Aspen Hysys lo cual asegura que los valores empleados como P y T reflejen las condiciones realistas de la simulación de las

propiedades.

La recolección de la información se hizo principalmente de fuentes como OSIGNERMIN, la cual cuenta con el documento oficial del proyecto inicial del City Gate, también con las especificaciones técnicas correspondientes a la calidad del gas natural y los rangos de poder calorífico aceptado por el cliente son encontrados en el Reglamento de distribución de Gas Natural por Red de Ductos.

Con respecto a los datos inicialmente estudiados para establecer los actuales parámetros en las cuales está operando Cálidda se consiguió a través de los reportes operativos subidos en la web de Cálidda en la cual brindan los valores del volumen sin corregir, volumen corregido, energía, poder calorífico, presión y temperatura de operación.

V.5 Análisis estadístico

En el presente análisis estadístico se utilizó los datos obtenidos de los reportes operativos que se publican en la web de Cálidda, de la cual se consideró la recolección de más de 132,069 datos. Dado el volumen significativo de la información recolectada, no es posible incluir la totalidad de esta base de datos en la publicación de esta tesis. Sin embargo, cabe resaltar que la información es real y la necesidad del uso de la magnitud de cantidad de datos es para brindar robustez y validez a la investigación. Los parámetros recolectados de la fuente de Cálidda, brindan el acceso a la evaluación de la temperatura (°C), presión de entrada y presión de salida (bar) en la estación de medición ubicado en el sistema de regulación de la empresa Etevensa.

El análisis descriptivo de las 3 variables se realiza mediante el programa R Studio, de acuerdo con este análisis se establecerá el rango operativo de análisis para la presente investigación.

Tabla 9*Análisis estadístico de la Temperatura (°C)*

Variable	Valor numérico
Conteo total	18867
Mínimo	12.15
1er Cuartil	16.44
Mediana	18.49
Media	18.37
3 er Cuartil	20.07
Máximo	35.56
Varianza	7.52
Desviación Estándar	2.74

Tabla 10*Análisis estadístico de la P entrada (barg)*

Variable	Valor numérico
Conteo total	18867
Mínimo	33.06
1er Cuartil	39.02
Mediana	40.53
Media	40.58
3 er Cuartil	42.36

Máximo	48.33
Varianza	6.14
Desviación Estándar	2.48

Tabla 11

Análisis estadístico descriptivo de la P salida (barg)

Variable	Valor numérico
Conteo total	18867
Mínimo	26.23
1er Cuartil	26.91
Mediana	27.03
Media	27.05
3 er Cuartil	27.15
Máximo	30.55
Varianza	0.06
Desviación Estándar	0.25

De acuerdo con el análisis de los parámetros de presión y temperatura se tienen se tienen los siguientes rangos de operación:

- La temperatura varia desde 12.15°C hasta 35.56°C
- La presión de entrada varia desde 33.06 barg y 48.33 barg
- La presión de salida varía desde 26.33 a 33.55 barg.

El valor mínimo y máximo de cada estudio podrían haberse visto influenciado por actividades de mantenimientos correctivos, preventivos o fallas de operación repentinos. Por esta razón, la investigación se enfocó en usar los rangos obtenidos de 1 er cuartil y 3 er cuartil donde se encuentran la mayoría de los datos sin alteraciones significativas por actividades que difieren de la operación normal.

En base al análisis estadístico se establece la **Tabla 8** Parámetros de estudio y Operación en la cual se tiene que los rangos de análisis son pequeños ($\Delta P = 0.24$ barg, $\Delta T = 3.63^{\circ}\text{C}$), a partir de ello se deduce la importancia de las pequeñas fluctuaciones de presión y temperatura, siendo este un sistema sensible de operación.

Un cambio relativamente pequeño puede afectar y crear fluctuaciones que afecten la integridad del sistema. Por lo tanto, mantener el rango de presión dentro de estos límites de operación es crucial para asegurar un transporte adecuado.

VI. RESULTADOS

VI.1 Presentación y análisis de los resultados

A través de los parámetros establecidos se crea la simulación del ducto principal que conforma desde el City Gate de Lurín hasta la estación de medición de la generadora eléctrica de Etevensa.

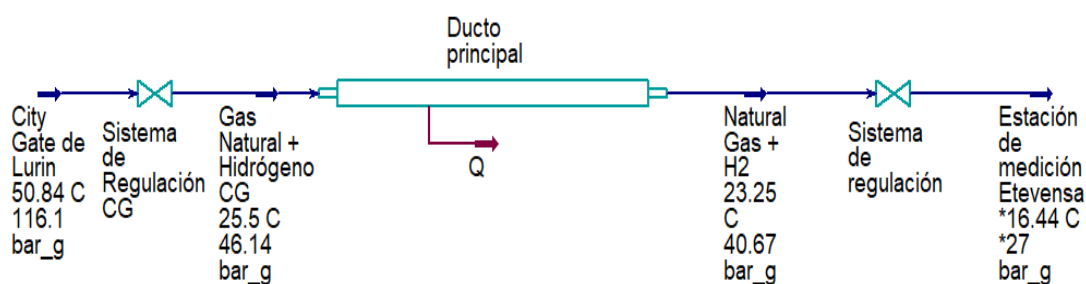


Figura 8

Simulación del ducto principal del transporte de gas natural

En la **Figura 8**

Simulación del ducto principal del transporte de gas natural consiste en la simulación del trayecto del gas natural a partir del City Gate de Lurín hasta la estación de la generadora eléctrica Etevensa.

La empresa Transportadora del Gas del Perú (TGP) nos brinda una presión de ingreso de 116.1 barg aproximadamente, el cual es regularizado hasta 46.14 barg, en el City Gate de Lurín. La distancia entre la estación de regulación del City Gate hasta la estación Etevensa es de 62 km. En la actualidad, en el recorrido encontramos varias estaciones de regulación para

alimentar la demanda de las industrias y comercios que usan el gas natural. Sin embargo, en el presente trabajo solo se está considerando como único cliente a la empresa generadora eléctrica, por lo que no es necesario involucrar las pérdidas de presión por parte del consumo de clientes como industrias y comercios, y solo se incorporará a la simulación la pérdida de presión por el recorrido de 62 km desde el City gate de Lurín hasta la estación Etevensa.

A partir del presente trabajo de investigación, se pueden estudiar muchos más modelos de alimentación de gas natural a otras empresas, el cual necesitará involucrar estaciones de regulación adicionales de acuerdo con la presión requerida por los clientes nuevos.

La presión deseada por Etevensa debe ser superior a los 30 barg, entonces la presión de 40.67 barg obtenida por la simulación es suficiente. Recibido el gas natural a esa presión, pasa por el sistema de regulación de la propia empresa Etevensa y llega a una presión de hasta 27 barg.

En la simulación realizada y de acuerdo al material del ducto principal se tiene un coeficiente de rugosidad por defecto de $4.572 \times 10^{-5} \text{m}$ típico de aceros comerciales, este valor indica que las pérdidas por fricción son relativamente bajas lo que no afecta al proceso de transporte por el ducto principal de Lima.

En la **Tabla 18** de la sección ANEXOS, se tienen los resultados del factor de compresibilidad, temperatura de rocío y poder calorífico los cuales fueron desarrollados mediante programación en Visual Basic y mediante la herramienta Aspen Simulation Workbook de Aspen Hysys.

El coeficiente de correlación R^2 a partir de los datos de la **Tabla 18** muestra la relación existente entre la composición molar de hidrógeno con respecto al factor de compresibilidad,

temperatura de rocío y poder calorífico, lo cual es visualizable en la siguiente tabla.

Tabla 12

Coeficiente de correlación R^2

Coeficiente R^2	Z	T rocío (°C)	Poder calorífico (Kcal/m³)
Peng Robinson	0.9034	0.9571	0.9895
Soave Redlich Kwong	0.9878	0.9986	0.9994

El valor por encima de 0.90 indica que presenta una correlación significativa.

Tabla 13

Coeficiente de correlación r

Coeficiente r Pearson	Z	T rocío (°C)	Poder calorífico (Kcal/m³)
Peng Robinson	0.9504	-0.9783	-0.9947
Soave Redlich Kwong	0.9939	-0.9993	-0.9997

De acuerdo con el análisis realizado todas las variables dependientes guardan estrecho alcance correlacional con respecto a la composición de H₂.

Tabla 14

Tipo de relación entre el modelo termodinámico y las variables dependientes

Tipo de relación	Z	T rocío (°C)	Poder calorífico (Kcal/m³)
Peng Robinson	Directa	Inversa	Inversa
Soave Redlich Kwong	Directa	Inversa	Inversa

A continuación se tienen las figuras correspondientes a la interacción de cada una de las variables dependientes con respecto al incremento en la composición molar de H₂ en la mezcla con gas natural ubicados en la **Tabla 18**.

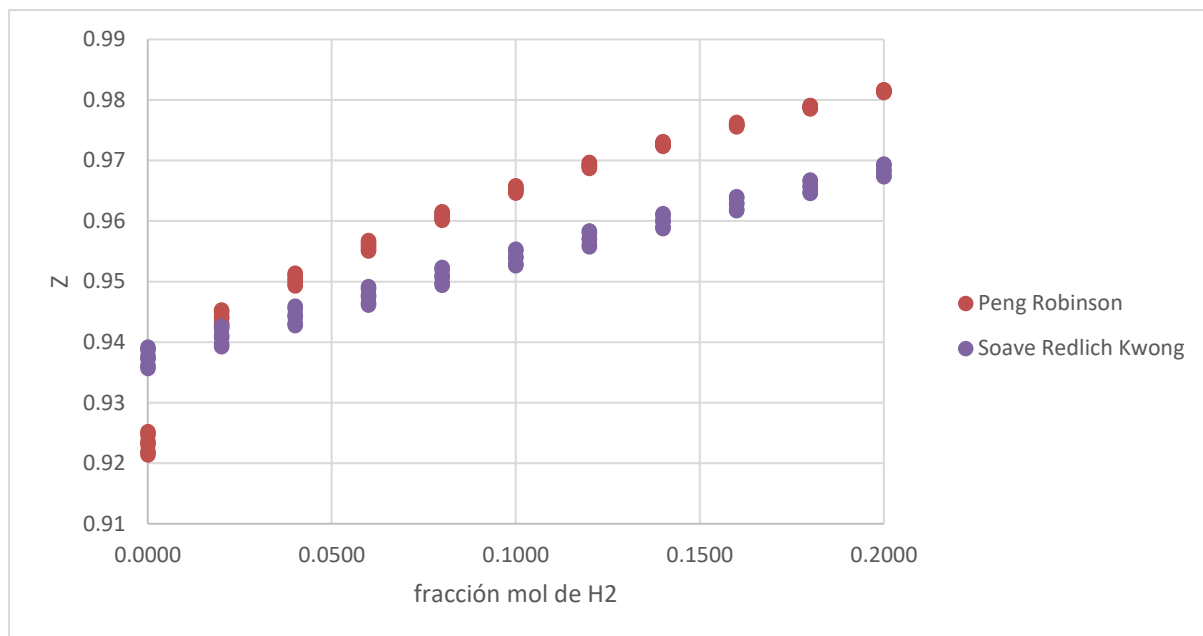


Figura 9

Relación del Fracción mol de H_2 y el factor de compresibilidad (Z)

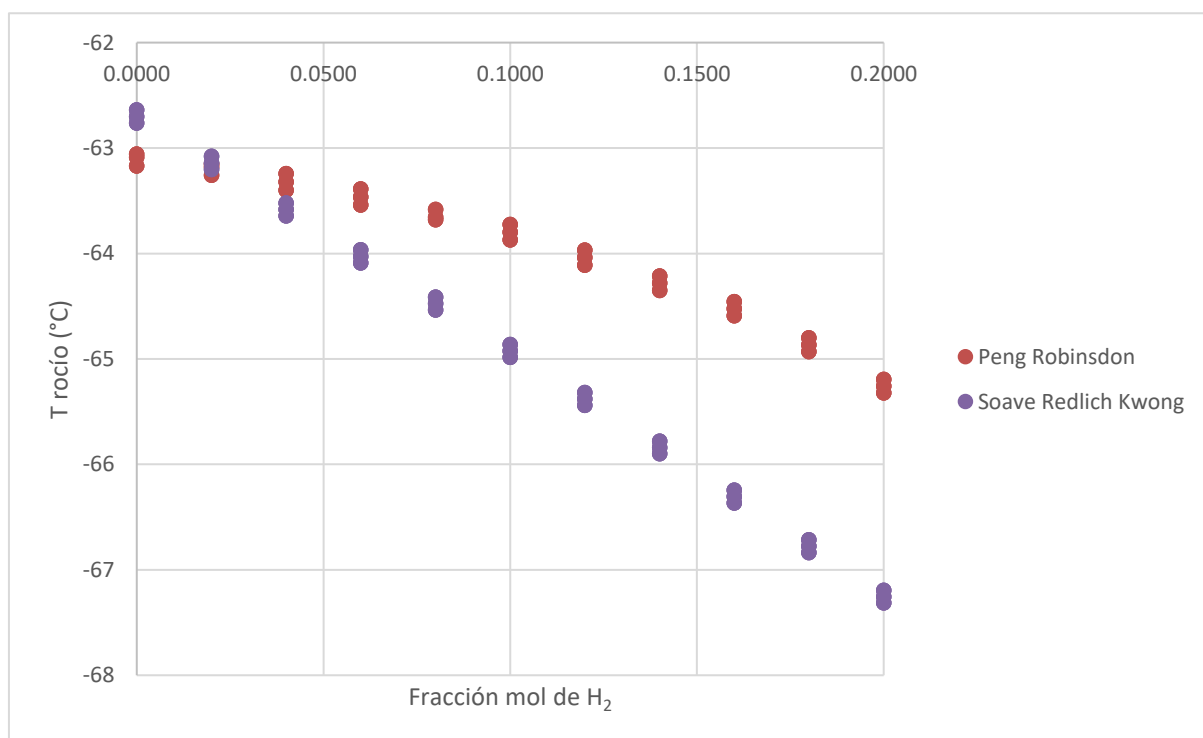


Figura 10

Relación de la Fracción mol de H_2 y la temperatura de rocío ($^{\circ}\text{C}$)

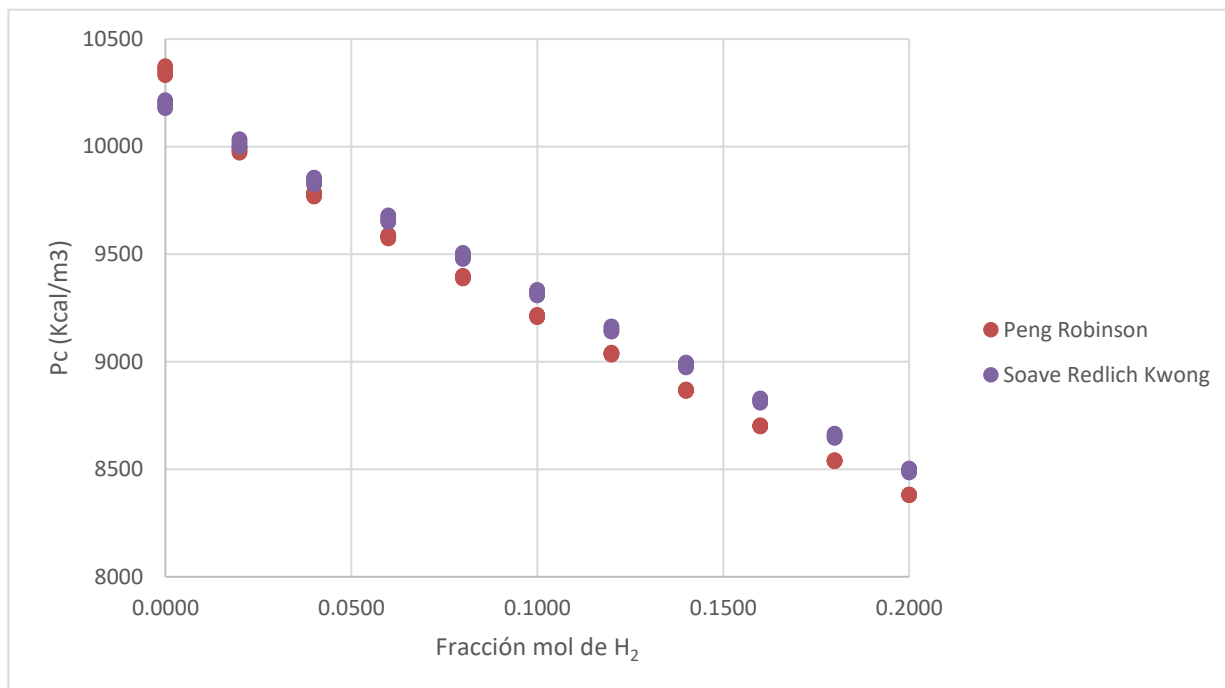


Figura 11

Relación del Fracción mol de H₂ y poder calorífico(Kcal/m³)

El nivel de significancia (α) propuesto es de 0.05 y de acuerdo con el análisis realizado en los resultados en la **Figura 9**, **Figura 10**, y **Figura 11** para cada variable dependiente, el factor de compresibilidad, temperatura de rocío y poder calorífico, da como resultado que las hipótesis planteadas son aceptadas. Sin embargo, aunque ambas ecuaciones presentan la misma tendencia general, existe una leve diferencia en los resultados que principalmente se deben a los parámetros de ajustes empírico que se utilizan para cada modelo termodinámico.

Tabla 15

Nivel de significancia por cada variable dependiente

Variable dependiente	Valor de p	Significancia
Factor de compresibilidad	2.20×10^{-16}	Significativo

Temperatura de rocío (°C)	2.20×10^{-16}	Significativo
Poder calorífico (Kcal/g)	2.20×10^{-16}	Significativo

El análisis estadístico realizado para cada variable se encuentra en la **Tabla 19** en la sección de Anexos. Sin embargo como conclusión se tiene que todas las variables dependientes guardan relación con respecto a la presencia del incremento de hidrógeno en la mezcla con gas natural.

El error entre los modelos termodinámicos Peng Robinson, y Soave Redlich Kwong para el factor de compresibilidad, temperatura de rocío y poder calorífico son 0.84%, 1.50% y 0.83% respectivamente. El error dado se debe principalmente a que ambos modelos tienen diferentes valores de aproximación de las interacciones moleculares, en la cual intervienen las fuerzas de atracción y repulsión de las moléculas.

Tabla 16

Límites inferiores y superiores de las variables dependientes en la estación de Etevensa por Peng Robinson y considerando solo gas natural.

Variable	Unidad	Límite inferior	Límite superior
Factor de compresibilidad (Z)	barg	0.92138	0.92526
Temperatura de rocío	°C	-65.320	-63.056

Poder calorífico	Kcal/m3	8450.0	10,300,00
------------------	---------	--------	-----------

En los siguientes gráficos obtenidos de la **Tabla 18**, se evaluará el factor de compresibilidad considerando las presiones constantes de 26.91, 27.03 y 27.15 barg y temperaturas constantes de 16.44°C, 18.26°C y 20.07°C.

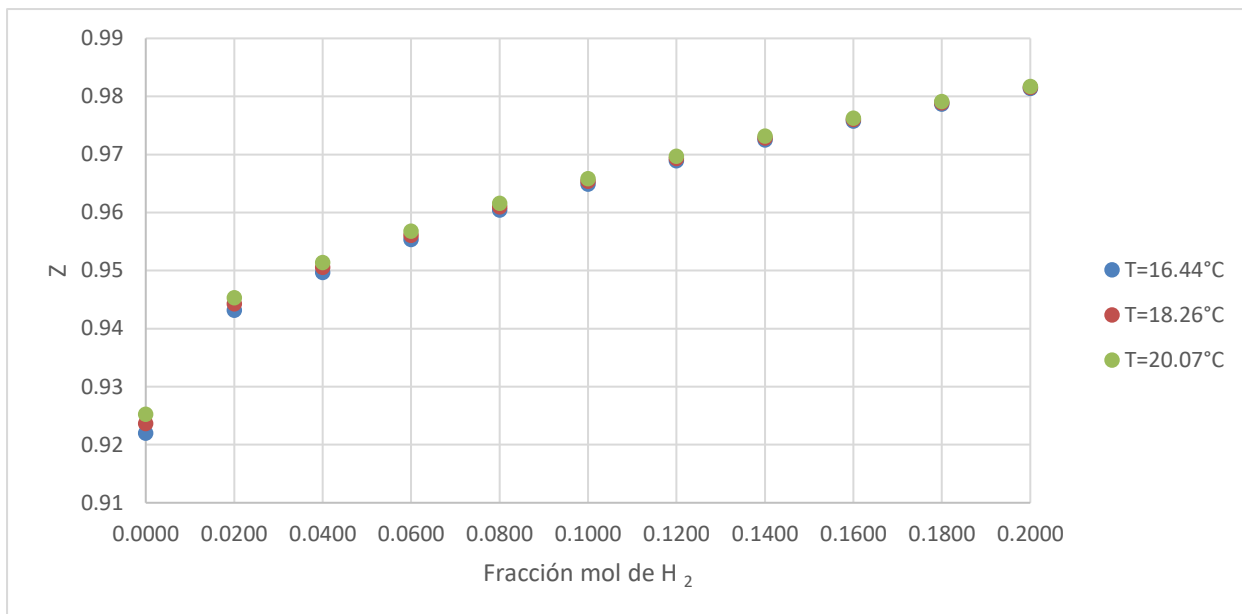


Figura 12

Fracción mol de H_2 vs Z a $P_{cte} = 26.91$ barg

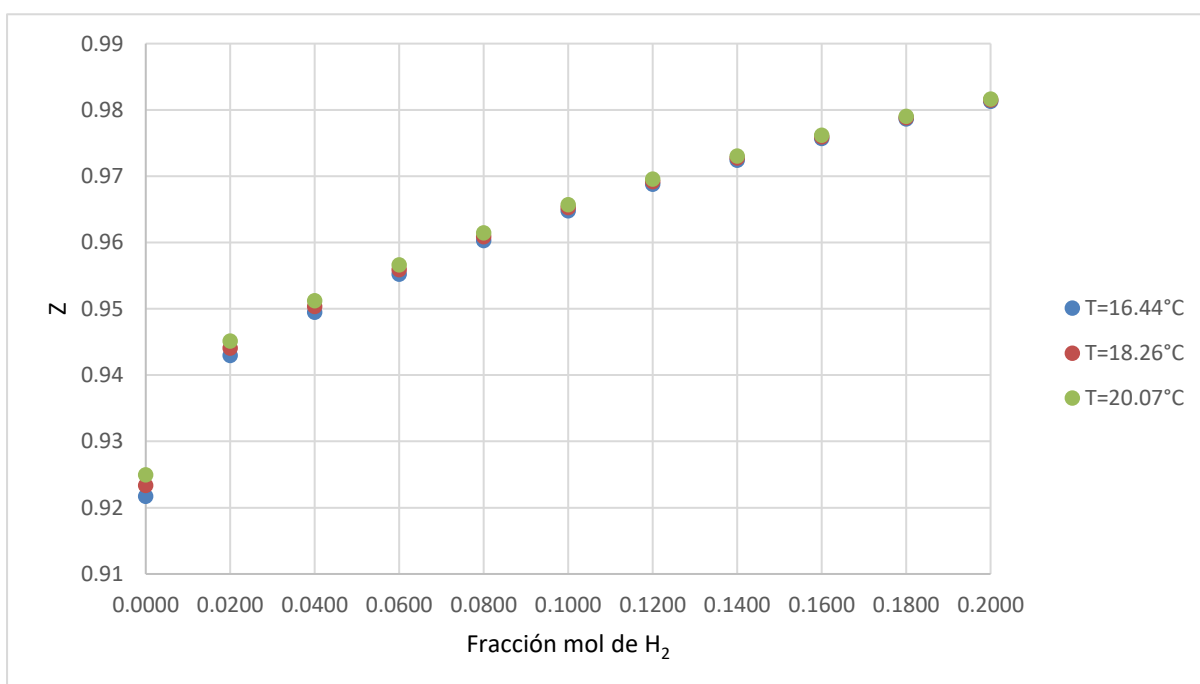


Figura 13

Fracción mol de H_2 vs Z a $P_{cte} = 27.03$ barg

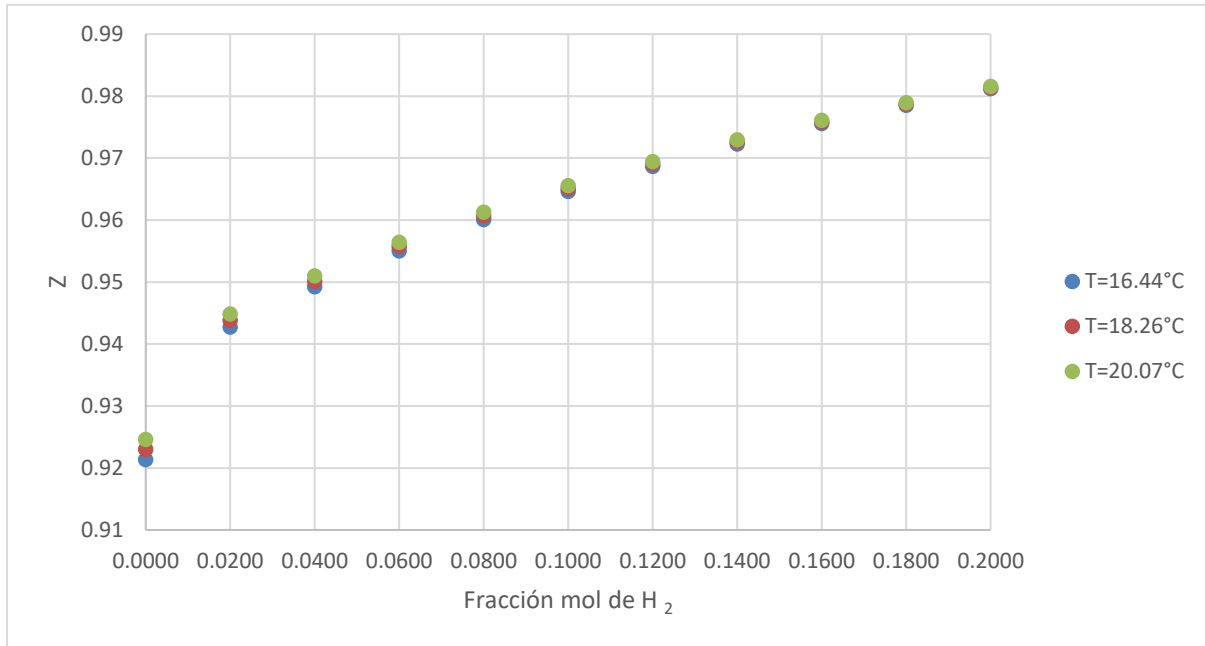


Figura 12

Fracción mol de H_2 vs Z a $P_{cte} = 27.15$ barg

En la **Figura** , **Figura** , y **Figura 12**, cuando la presencia de hidrógeno es nula en el gas natural, el factor de compresibilidad se ve afectado en mayor medida por la temperatura que cuando el hidrógeno tiene mayor presencia en mezcla con el gas natural. Esta diferencia es debido principalmente a las propiedades físicoquímicas de ambos gases. A partir de las figuras anteriormente vistas se puede deducir que el hidrógeno tiene una menor sensibilidad al cambio de temperatura que el gas natural y modera su influencia sobre el resultado del factor de compresibilidad.

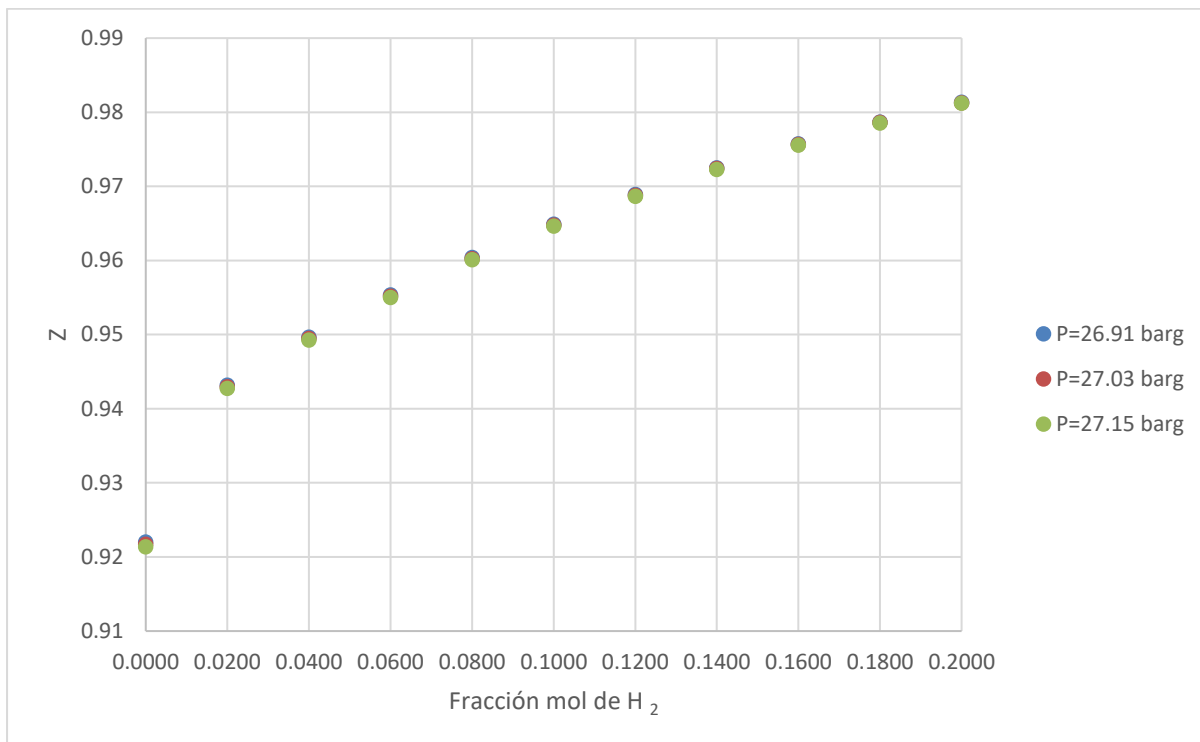


Figura 13

Fracción mol de H_2 vs Z a $T_{cte} = 16.44\text{ }^{\circ}\text{C}$

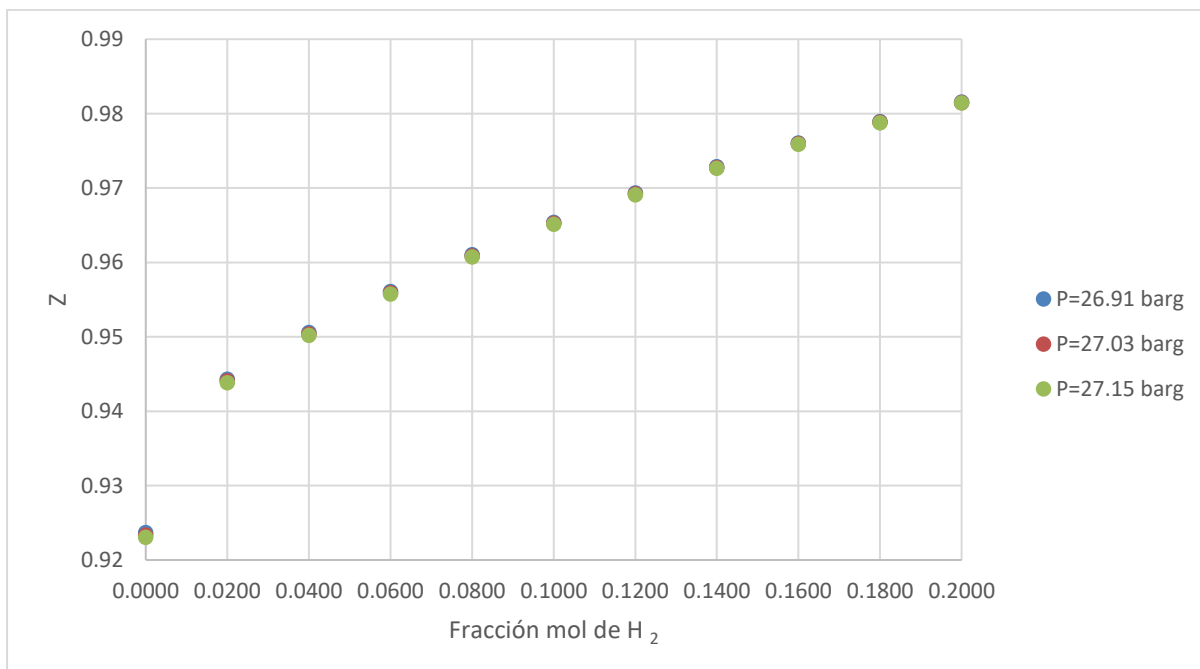


Figura 14

Fracción mol de H_2 vs Z a $T_{cte} = 18.26\text{ }^{\circ}\text{C}$

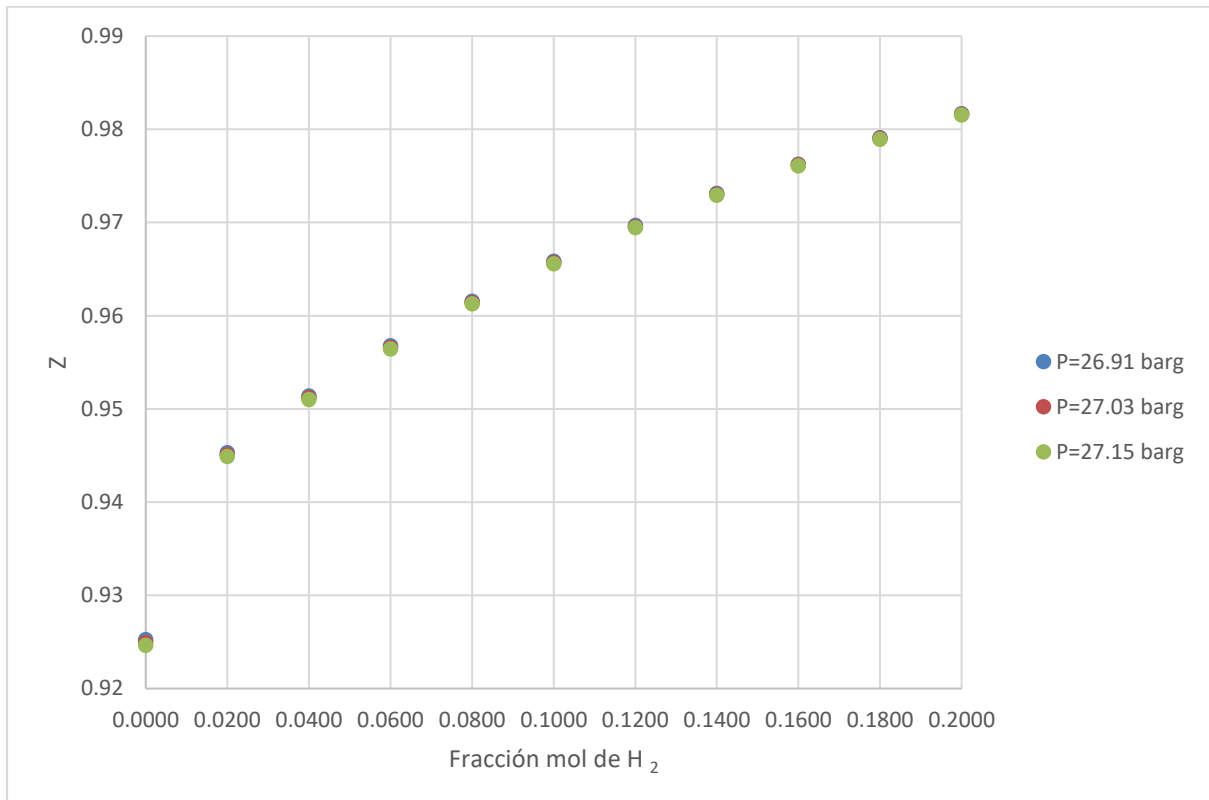


Figura 15

Fracción mol de H_2 vs Z a $T_{cte}=20.07^\circ C$

En la **Figura 13**, **Figura 14** y **Figura 15**, cuando la presencia de hidrógeno es nula en el gas natural, el factor de compresibilidad se ve afectado en mayor medida por la presión que cuando el hidrógeno tiene mayor presencia en mezcla con el gas natural. Sin embargo, la influencia de la presión a cualquier temperatura es casi nula. Se deduce que la presión no sería una variable determinante que impida que el transporte de mi mezcla sea seguro.

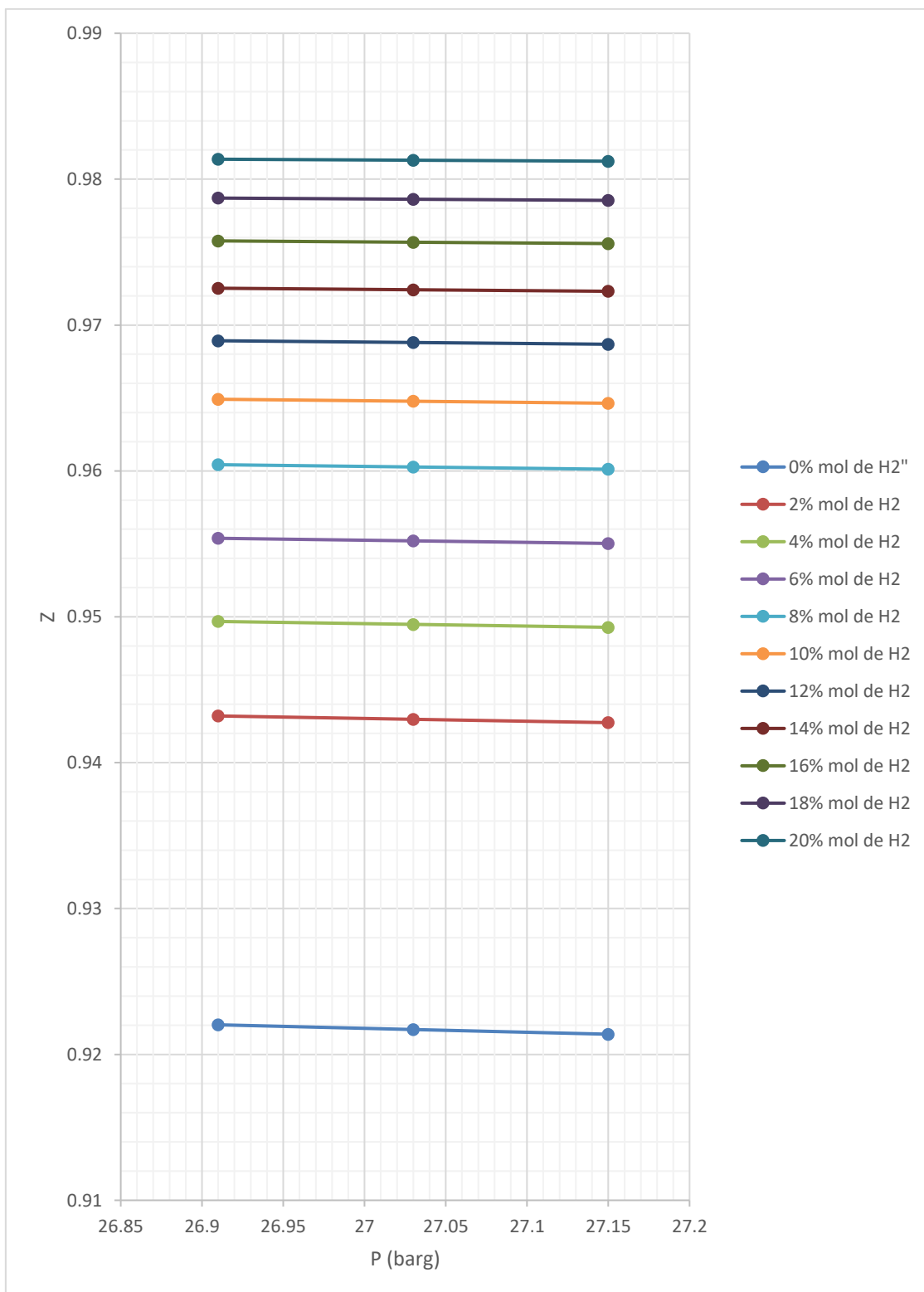


Figura 16

P (barg) vs Z a diferentes composiciones molares de H_2

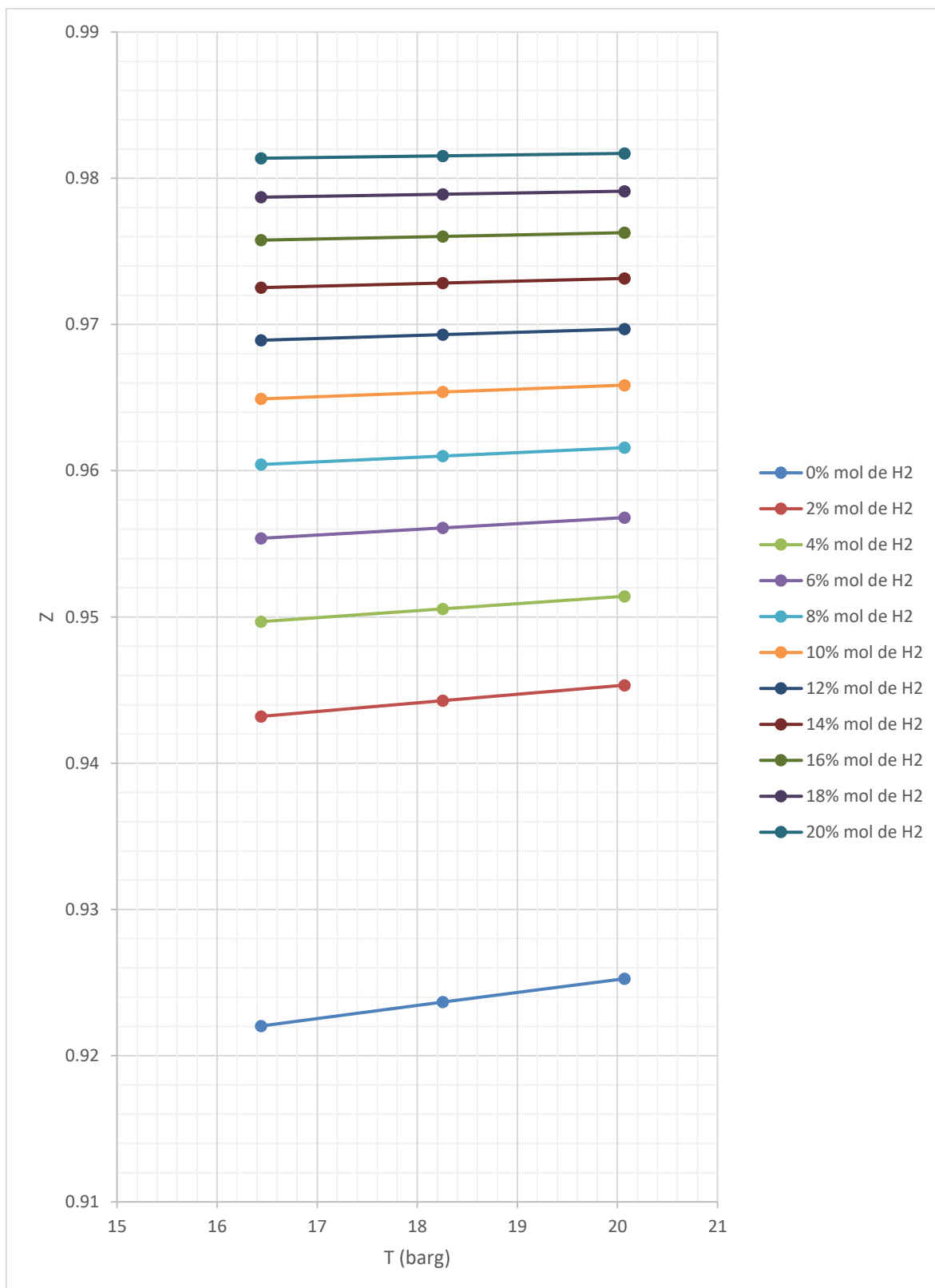


Figura 17

T(°C) vs Z a diferentes composiciones molares de H₂

En los siguientes gráficos obtenidos de la **Tabla 18**, se evaluará el comportamiento de la temperatura de rocío y el poder calorífico de acuerdo con el incremento de la fracción molar de hidrógeno en la mezcla

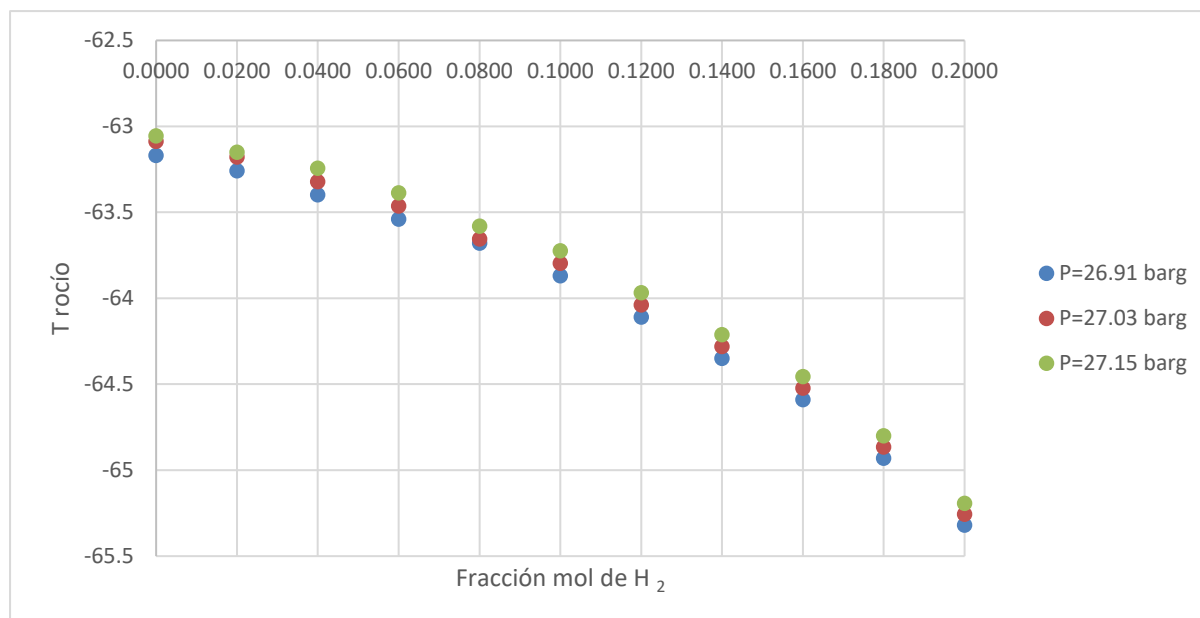


Figura 18

Fracción mol de H_2 vs $T_{\text{rocío}}$ a diferentes presiones de operación

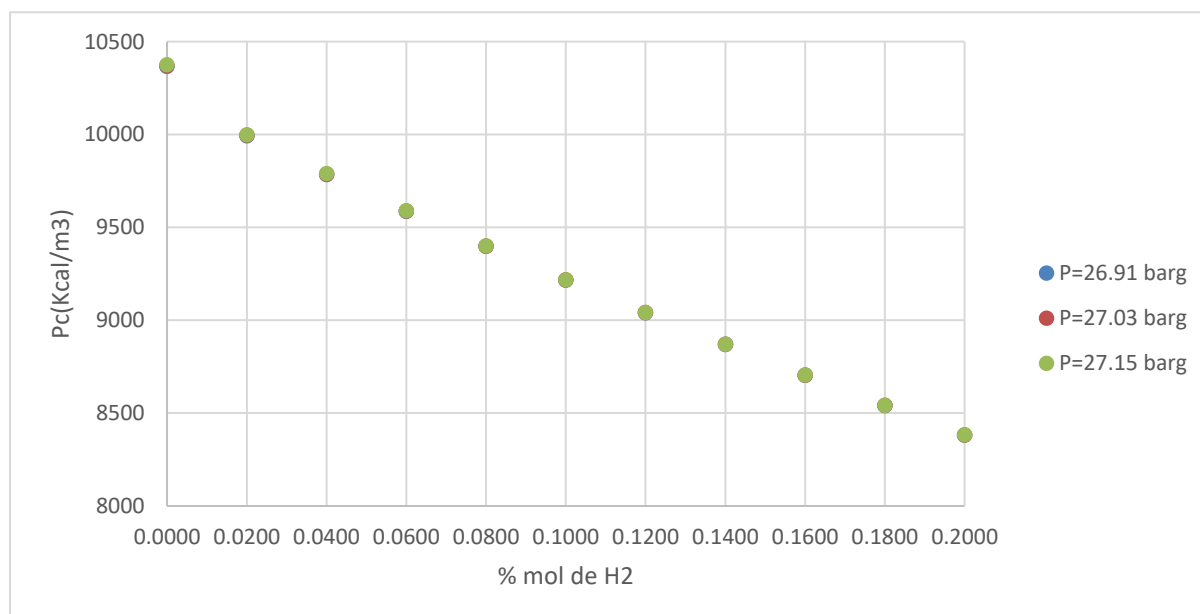


Figura 19

Fracción mol de H_2 vs Poder calorífico a diferentes presiones de operación

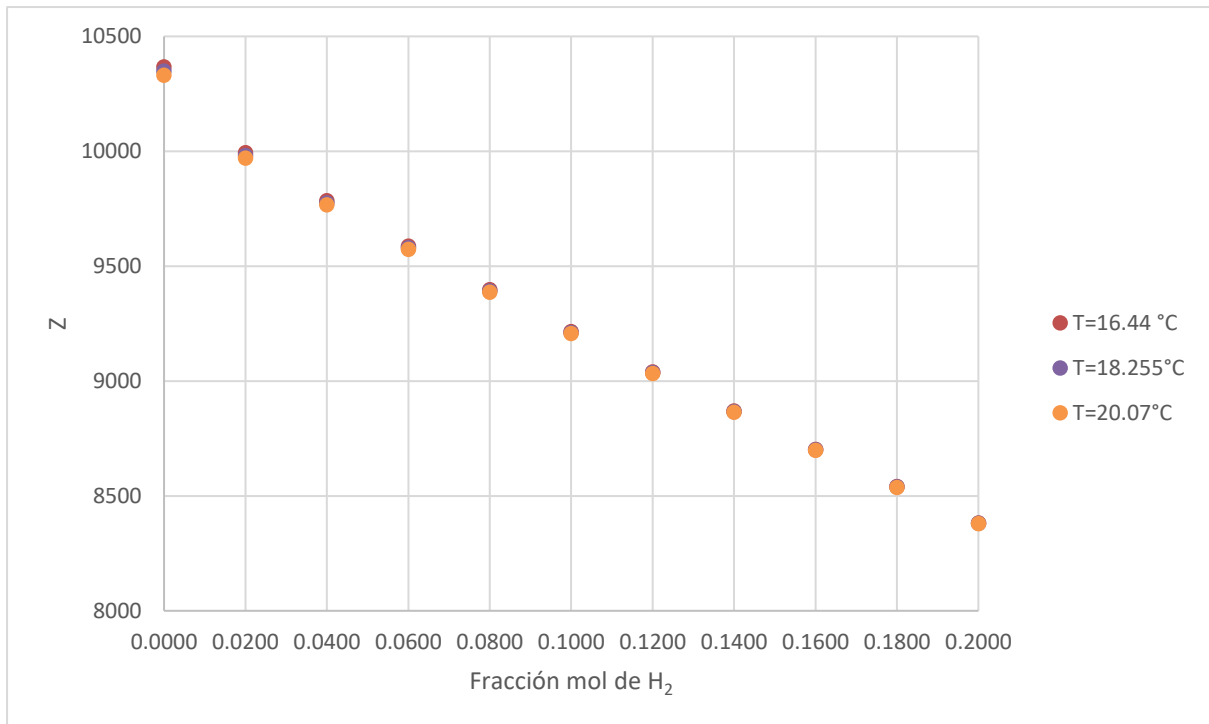


Figura 20

Fracción mol de H_2 vs Poder calorífico a diferentes temperaturas de operación

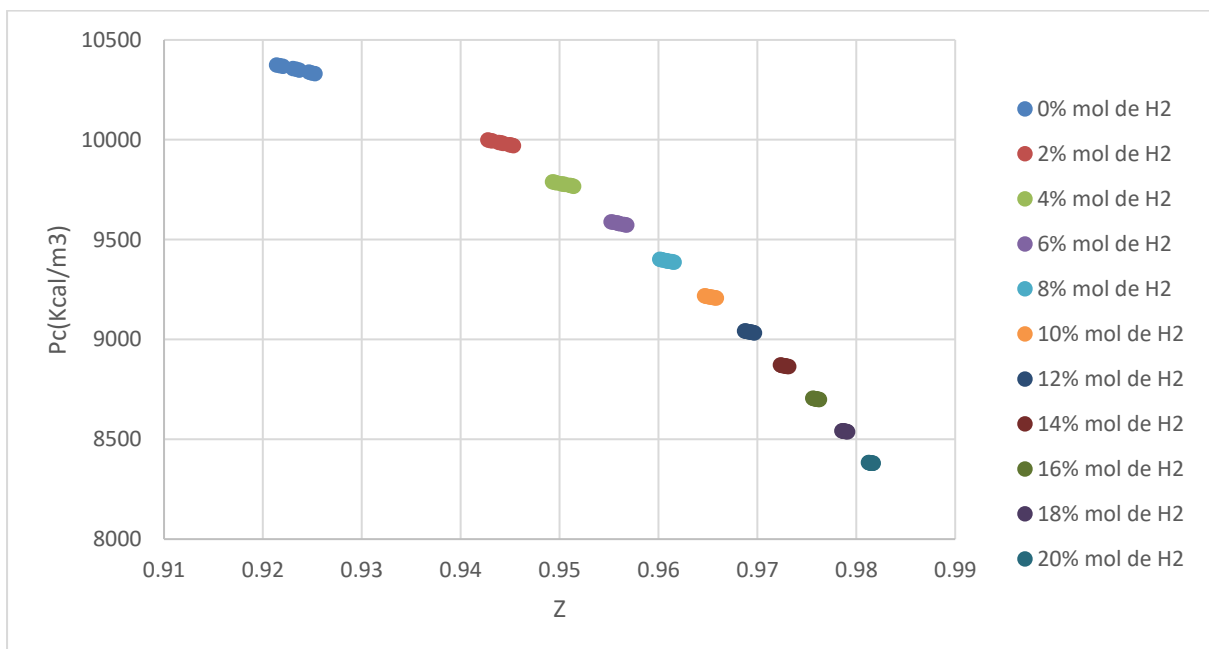


Figura 21

Z vs Poder calorífico

VII. DISCUSIÓN

Mediante el R de correlación ubicado en la **Tabla 12**, el resultado entre la composición de Hidrógeno, el factor de compresibilidad, temperatura de rocío y poder calorífico de dos modelos termodinámicos Peng Robinson y Soave Redlich Kwong , confirman que los modelos utilizados son adecuados para las condiciones estudiadas mostrando la existencia de una relación ya sea directa o indirecta. Estos modelos termodinámicos resultaron ser consistentes para hallar la composición adecuada en el cual el hidrógeno tenga un transporte seguro en conjunto con el gas natural y no presente deficiencia energética para el cliente. El modelo termodinámico Peng Robinson es aplicado de forma predictiva para encontrar el efecto del contenido de H_2 en las propiedades del gas natural a condiciones típicas de operación descritas en la **Tabla 8**, aplicado a un rango de presión (26.9 a 27.1 bar), temperatura (20- 22°C).

Según Ismael Alkhatib en su investigación “Accurate Predictions of the Effect of Hydrogen Composition on the Thermodynamics and Transport Properties of Natural Gas”, el modelo termodinámico Peng Robinson presenta valores de 2.73%, 1.15%, y 1.98% de error para propiedades como densidad, capacidad calorífica y viscosidad respectivamente. Estas magnitudes de error están por debajo del 5% argumentando fiabilidad en sus resultados. Adicionalmente a ello, este modelo termodinámico es ampliamente aceptado en la industria del gas.

Según Ismael Alkhatib, en su análisis de ver la interacción de hidrógeno y metano se tiene que conforme aumenta el porcentaje mol de hidrógeno, y conforme aumenta la presión, el factor de compresibilidad tiene una tendencia a aumentar cuando el porcentaje de hidrógeno es superior a 45% mol de H_2 . Por debajo del valor del 45% mol de H_2 , conforme aumenta la presión, disminuye el factor de compresibilidad.

El trabajo brindado por Ismael Alkhatib acredita el comportamiento de la mezcla actual que se ve en esta investigación en la cual se estudia hasta en un 20% mol de H_2 . En la Figura 9 se puede visualizar que a mayor porcentaje mol de presencia de hidrógeno, aumenta el factor de compresibilidad (por cada 2% de incremento de Hidrógeno en la mezcla, aumenta 0.44% el factor de compresibilidad), y en la Figura 16 y Figura 17, el factor de compresibilidad presenta relación con la P y T respectivamente. En el caso que la temperatura aumente, el factor de compresibilidad se comportará de forma semejante y es en las más bajas temperaturas en donde se visualiza que el decrecimiento del factor de compresibilidad es más notable. Por el contrario, si la presión aumenta, el factor de compresibilidad se reduce. El incremento de Hidrógeno en la mezcla con gas natural tiene una relación directa con el factor de compresibilidad como ya se explicó, esto es debido a factores como su tamaño molecular, masa, comportamiento intermolecular que influyen en la interacción de los componentes en mezcla visualizable en el código de programación en la sección de ANEXOS.

El factor de compresibilidad permite conocer que debido al incremento del hidrógeno en la mezcla, la capacidad en la tubería será en menor proporción que cuando solo se circula solo gas natural. Sin embargo, debido a que esta mezcla se acerca cada vez a un comportamiento ideal, también presenta beneficios como en su viscosidad, que al tener una menor magnitud, permitirá que reduzca los procesos de recompresión. El significado del incremento del hidrógeno en la mezcla con gas natural influencia a la densidad del gas en la misma proporción que influye al factor de compresibilidad. Por lo tanto, en caso el factor de compresibilidad incremente, la densidad de esta nueva mezcla será menor y con ello en caso presente fugas en su transporte, su rapidez de dispersión será mayor evitando que se generen concentraciones peligrosas en un área en específica.

En la **Figura 18**, el incremento de Hidrógeno en la mezcla con gas natural tiene una

relación indirecta con la temperatura de rocío (por cada 2% de hidrógeno más, la temperatura rocío disminuye en 0.001%) , esto es debido que cuando el hidrógeno incrementa disminuye la concentración de los hidrocarburos más pesado, por ende, estos componentes más pesados comenzarán a condensarse a una temperatura más baja en la mezcla.

La temperatura de rocío está relacionada de forma directa con la presión; por lo tanto si la presión disminuye, la temperatura rocío actuará de la misma manera. Tener una temperatura tan baja como los mostrados en el resultado, nos permite decir con seguridad que no se producirá ningún tipo de condensados en la tubería. No tener líquidos de gas natural, permite reducir la posibilidad de dañar equipos del cliente, mejora la eficiencia del transporte así como también se previene la formación de obstrucciones en la tubería lo que puede sobrellevar a una sobre presurización o fugas en el sistema.

En la **Figura 19** y **Figura 20**, el incremento de Hidrógeno en la mezcla con el gas natural tiene una relación indirecta con el poder calorífico. Al incrementar el contenido de hidrógeno en la mezcla se tiene que perderá aproximadamente cerca del 1.11% de poder calorífico por cada 2% mol de hidrógeno en mezcla.

Según Ana Bella en el análisis del trabajo “Effect of hydrogen blending on the energy capacity of natural gas transmission networks” ella establece el factor de transmisión de energía como un valor cuantificable para poder hallar su relación el hidrógeno, este factor es el cociente de la energía de la mezcla y la energía del gas natural presentando una relación indirecta al igual que en la presente investigación. El poder calorífico al ser hallado a sus condiciones estándar depende de forma indirecta con la fracción molar de H_2 en la mezcla y de su factor de compresibilidad, y por ello brinda la relación indirecta. En la **Figura 21** se ve la relación indirecta que existe entre el factor compresibilidad y el poder calorífico, esto significa que mientras el factor de compresibilidad aumente, el poder calorífico resultará en un menor valor.

Este variable es de gran importancia ya que de acuerdo con el reglamento de distribución de gas natural de Lima, el poder calorífico no puede ser menor 8450 kcal/m³. Un bajo poder calorífico puede perjudicar su reacción de combustión y tener implicancias ambientales. Por esa razón, es necesario encontrar un equilibrio adecuado de Hidrógeno para no comprometer la seguridad en su transporte ni afectar los requisitos energéticos propuestos por el Estado Peruano.

VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La composición adecuada de Hidrógeno en mezcla con el gas natural tiene como máximo el valor de 18% mol de H₂ teniendo en consideración que su temperatura de operación debe estar por encima de 16.44°C y su presión de operación debe ser por encima de 26.91 barg. Evaluando el factor de compresibilidad, al este tener un acercamiento al comportamiento ideal en cuanto el hidrógeno aumenta su composición no afecta a su transporte. De igual manera al tener la temperatura de rocío por debajo de las condiciones operativas se sigue teniendo en consideración que su seguridad no se verá afectada. Sin embargo, en el caso del poder calorífico, considerar a partir del 20% mol de H₂ en mezcla con el gas natural da un resultado 8,381.24 kcal/ m³(st) en promedio y según el reglamento de distribución de gas natural en Lima (artículo 44) el valor mínimo de contenido calorífico debe ser de 8, 450 kcal/ m³(st), entonces a un 20% nuestro resultado obtenido se encuentra por debajo del poder calorífico señalado en el reglamento de distribución. Después de realizar el análisis en un 20% de Hidrógeno en mezcla, se evalúa para el caso del 18% y se tiene un resultado de 8,540.01 kcal/ m³(st) cuyo valor cumple con lo requerido por el estado peruano y sería el resultado de nuestra investigación.

Implementar esta propuesta mediante pruebas piloto en segmentos específicos de la red de distribución permitirá su implementación a gran escala, incentivará el uso de energías renovables y se promoverá la reducción de la huella de carbono mediante el uso de nuevas fuentes de energía renovables. La implementación de esta propuesta promoverá la inversión en la investigación en mejorar las tecnologías de mezcla y de transporte del Hidrógeno- Gas natural, así como permitirá el desarrollo de nuevos métodos de optimización y mitigación de posibles riesgos evaluando otros posibles parámetros como propiedades mecánicas en las cuales encontramos su tenacidad, dureza, resistencia a corrosión, etc.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- Alkhatib, I. I., AlHajaj, A., Ali, A., & Vega, L. F. (2022). Accurate Predictions of the Effect of Hydrogen Composition on the Thermodynamics and Transport Properties of Natural Gas [Predicciones del efecto de la composición del hidrógeno sobre la termodinámica y las propiedades de transporte del gas natural]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c00363>
- Anna Bella Galyas, L. K. (18 de Enero de 2023). Effect of hydrogen blending on the energy capacity of natural gas transmission networks [Efecto de la mezcla de hidrógeno sobre la capacidad energética de las redes de transporte de gas natural]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.198>
- Aspentech. (1996). *Aspen Hysys Process Simulation Software Versión 14*. [Software]: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-hysys>
- Cálidda. (2024). *Gas Natural de Lima y Callao*. Cómo se distribuye el Gas Natural y el Sistema de distribución en Lima y Callao de Cálidda: <https://www.calidda.com.pe/gas-natural/como-se-distribuye-el-gas-natural/>
- Cálidda. (Mayo de 2024). *Reportes*. Reportes Operativos Volumétricos: <https://appadmin.calidda.com.pe/ReportesOsinermin/Reportes/documentos>
- Green, R. H. (2007). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. McGraw Hill LLC..
- Ikoku, C. U. (1992). *Natural Gas Production Engineering*. Florida: Krieger Publishing Company.
- L. Zemite, L. J. (2023). Blending Hydrogen with Natural Gas / Biomethane and transportation in existing gas networks [Mezcla de Hidrógeno con Gas Natural / Biometano y transporte en redes de gas existentes]. *Sciend*, 13. <https://doi.org/10.2478/lpts-2023-0030>
- MINEM. (2019). *Infocarbono*. Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Perú: <https://infocarbono.minam.gob.pe/inventarios-nacionales-gei/>
- ONU. (1997). Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Kioto. https://unfccc.int/es/kyoto_protocol#:~:text=En%20concreto%2C%20el%20Protocolo%20de,con%20las%20metas%20individuales%20acordadas.
- ONU. (2024). *United Nations Industrial Development Organization - Progress by innovation*. <https://www.unido.org/green-hydrogen>
- OSIGNERMIN. (2005). *Reglamento de distribución de gas natural por red de ductos*. Lima, Perú.
- OSIGNERMIN. (2008). *Proyecto: Sistema de distribución de gas natural en Lima y Callao*. Organismo Supervisor de la Inversión de Energía y Minería, Lima, Lima. http://gasnatural.osinerg.gob.pe/contenidos/empresas_sector/avance_proyectos_sistema_distribucion_gn_lima_callao.html

- OSIGNERMIN. (2021). *La industria del gas natural en el Perú, Mirando al bicentenario y perspectivas recientes*.
- OSIGNERMIN. (2023). *Boletín Estadístico - Procesamiento, Producción, Transporte y Consumo de Gas Natural 4to trimestre*. Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, División de Supervisión de Gas Natural . <https://portalestadistico.aurora.gob.pe/boletines/>
- OSIGNERMIN. (2023). *Huellas de energía limpia. Impactos del proyecto Camisea*.
- Pacific S.A. (2002). *Estudio de Impacto Ambiental (EIA) de la Distribución de Gas Natural por Red de Ductos en Lima y Callao*. Lima.
- Rigas, F., & Amyotte, P. (2013). *Hydrogen Safety - Green chemistry and Chemical Engineering*. (S. Lee, Ed.) USA: CRC Press.
- Tian, X., & Pei, J. (29 de October de 2023). Study progress on the pipeline transportation safety of hydrogen-blenden natural gas. *Heliyon*, 10.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21454>
- Viloche, J. (2023). *OSIGNERMIN*. Gas natural propiedades y usos:
<https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/OficinaComunicaciones/Eventos Realizados/ForoTacna/3/1-Propiedades%20y%20usos%20del%20GN-Juan%20Viloche.pdf>

X. ANEXOS

Gráficas provenientes obtenidos de un análisis descriptivo de cada variable en estudio
Presión, y Temperatura. (Cálidda, 2024)

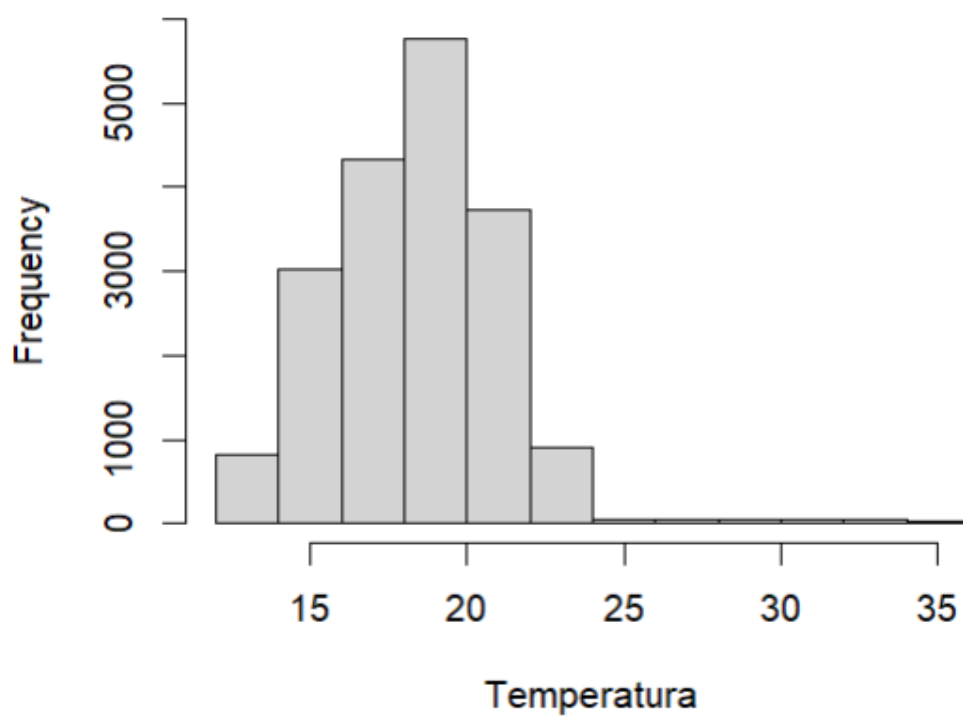


Figura 22

Histograma de Temperatura (°C)

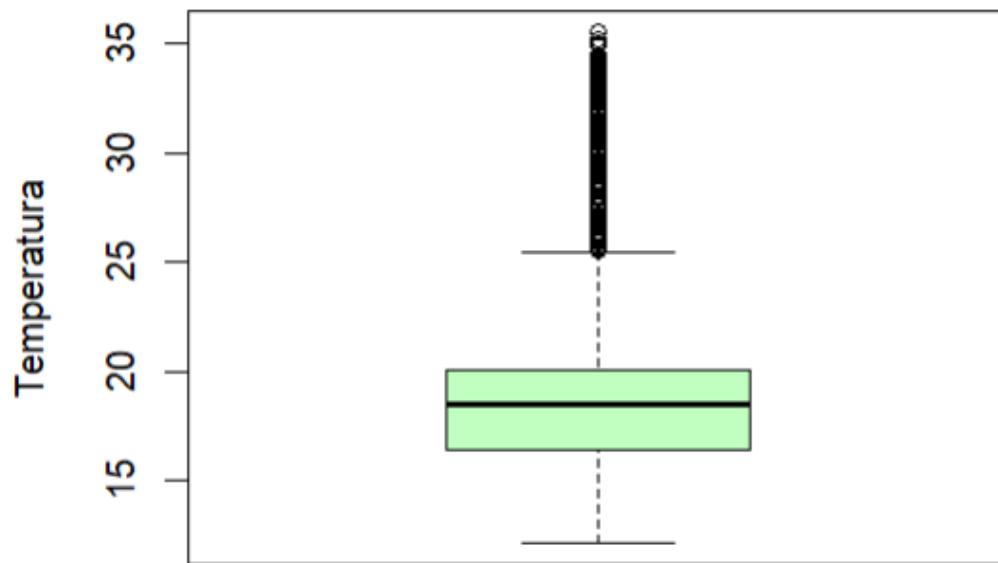


Figura 23

Gráfica de caja de Temperatura (°C)

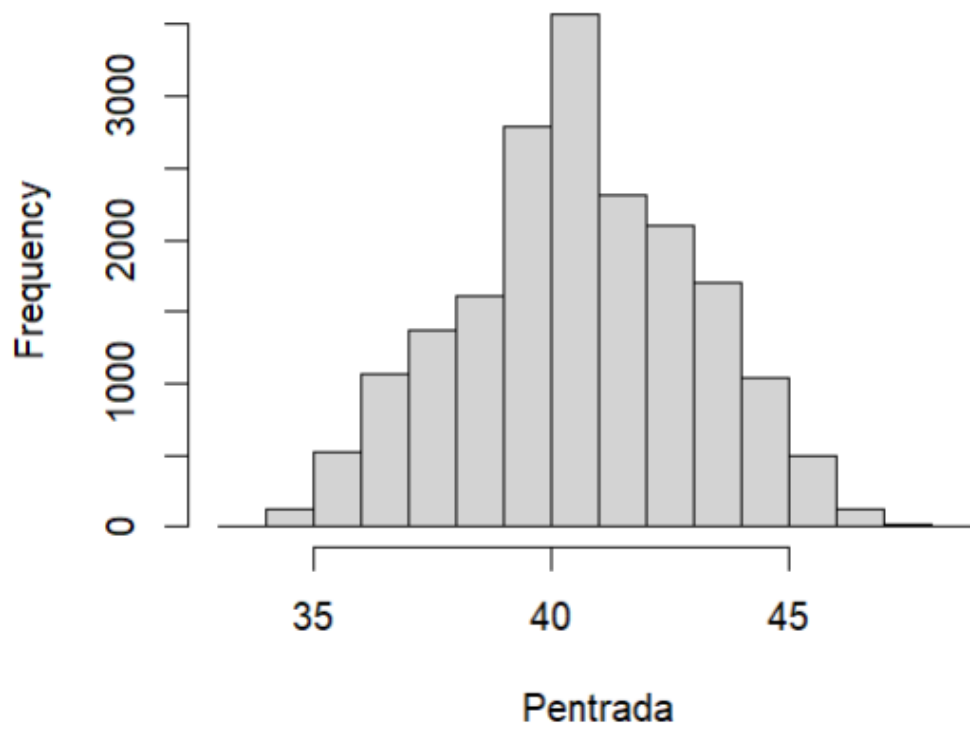


Figura 24

Histograma de P entrada (barg)

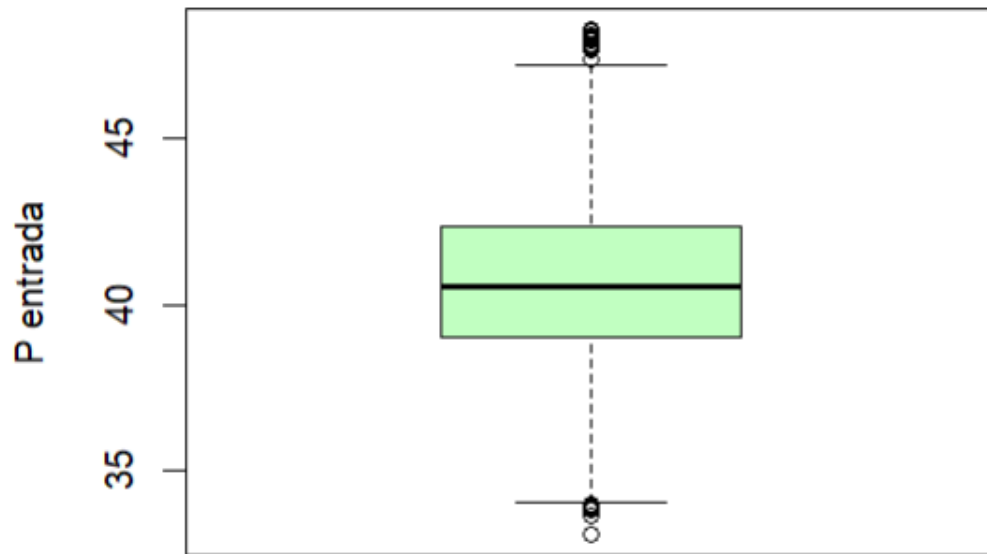


Figura 25

Gráfica de caja de P entrada (barg)

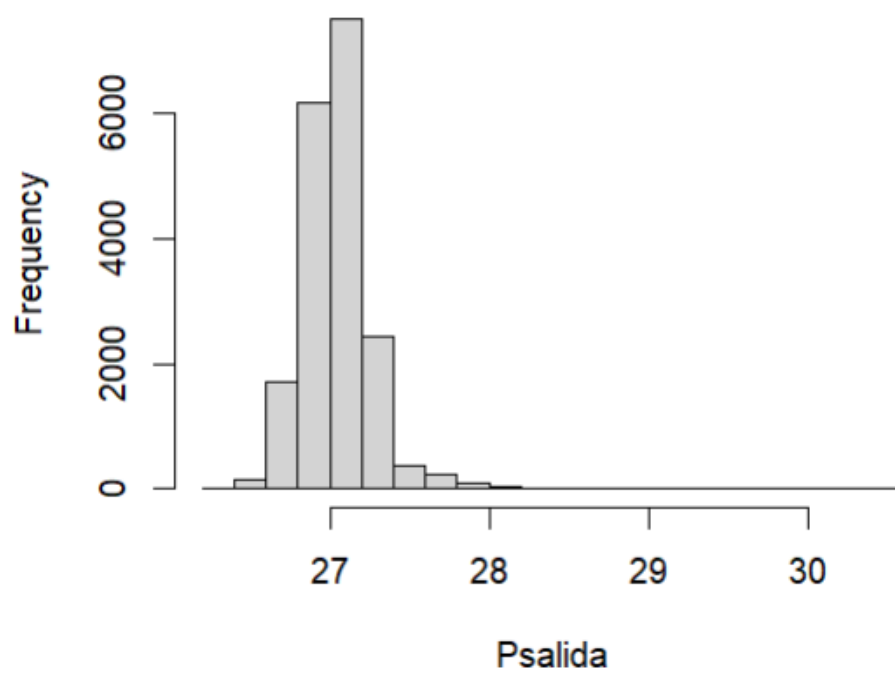


Figura 26

Histograma de P salida (barg)

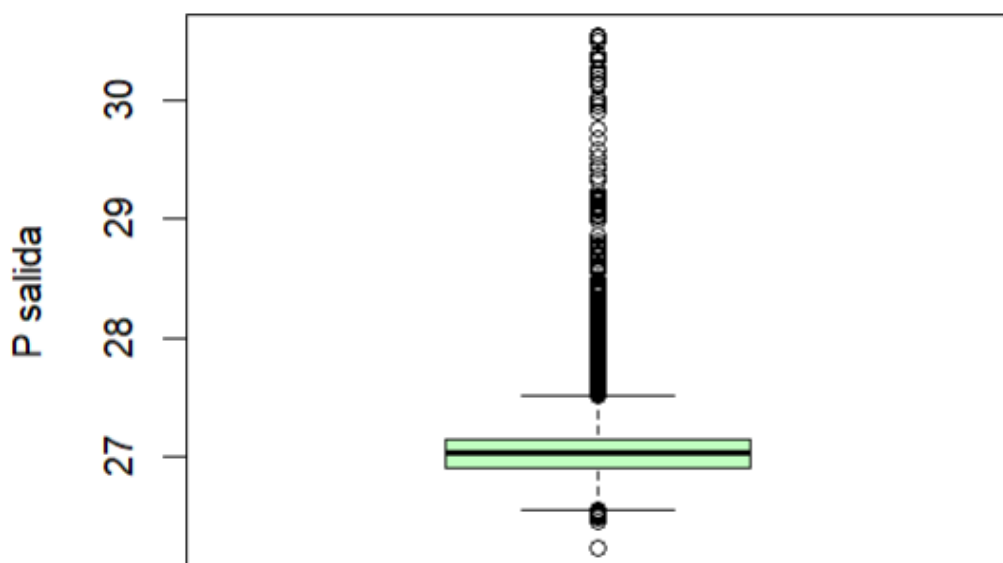


Figura 27

Gráfica de caja de P salida (barg)

Tabla 17

Diseño factorial

N°	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	i- C ₄ H ₁₀	n- C ₄ H ₁₀	N ₂	CO ₂	H ₂ O	P (barg)	T (°C)
1	0.0000	0.8937	0.0857	0.0065	0.0002	0.0001	0.0106	0.0032	0.0000	26.91	16.44
2	0.0200	0.8758	0.0840	0.0064	0.0002	0.0001	0.0104	0.0031	0.0000	26.91	16.44
3	0.0400	0.8580	0.0823	0.0062	0.0002	0.0001	0.0102	0.0031	0.0000	26.91	16.44
4	0.0600	0.8401	0.0806	0.0061	0.0002	0.0001	0.0100	0.0030	0.0000	26.91	16.44
5	0.0800	0.8222	0.0788	0.0060	0.0002	0.0001	0.0098	0.0029	0.0000	26.91	16.44
6	0.1000	0.8043	0.0771	0.0059	0.0002	0.0001	0.0095	0.0029	0.0000	26.91	16.44
7	0.1200	0.7865	0.0754	0.0057	0.0002	0.0001	0.0093	0.0028	0.0000	26.91	16.44
8	0.1400	0.7686	0.0737	0.0056	0.0002	0.0001	0.0091	0.0028	0.0000	26.91	16.44

9	0.1600	0.7507	0.0720	0.0055	0.0002	0.0001	0.0089	0.0027	0.0000	26.91	16.44
10	0.1800	0.7328	0.0703	0.0053	0.0002	0.0001	0.0087	0.0026	0.0000	26.91	16.44
11	0.2000	0.7150	0.0686	0.0052	0.0002	0.0001	0.0085	0.0026	0.0000	26.91	16.44
12	0.0000	0.8937	0.0857	0.0065	0.0002	0.0001	0.0106	0.0032	0.0000	27.03	16.44
13	0.0200	0.8758	0.0840	0.0064	0.0002	0.0001	0.0104	0.0031	0.0000	27.03	16.44
14	0.0400	0.8580	0.0823	0.0062	0.0002	0.0001	0.0102	0.0031	0.0000	27.03	16.44
15	0.0600	0.8401	0.0806	0.0061	0.0002	0.0001	0.0100	0.0030	0.0000	27.03	16.44
16	0.0800	0.8222	0.0788	0.0060	0.0002	0.0001	0.0098	0.0029	0.0000	27.03	16.44
17	0.1000	0.8043	0.0771	0.0059	0.0002	0.0001	0.0095	0.0029	0.0000	27.03	16.44
18	0.1200	0.7865	0.0754	0.0057	0.0002	0.0001	0.0093	0.0028	0.0000	27.03	16.44
19	0.1400	0.7686	0.0737	0.0056	0.0002	0.0001	0.0091	0.0028	0.0000	27.03	16.44
20	0.1600	0.7507	0.0720	0.0055	0.0002	0.0001	0.0089	0.0027	0.0000	27.03	16.44
21	0.1800	0.7328	0.0703	0.0053	0.0002	0.0001	0.0087	0.0026	0.0000	27.03	16.44
22	0.2000	0.7150	0.0686	0.0052	0.0002	0.0001	0.0085	0.0026	0.0000	27.03	16.44
23	0.0000	0.8937	0.0857	0.0065	0.0002	0.0001	0.0106	0.0032	0.0000	27.15	16.44
24	0.0200	0.8758	0.0840	0.0064	0.0002	0.0001	0.0104	0.0031	0.0000	27.15	16.44
25	0.0400	0.8580	0.0823	0.0062	0.0002	0.0001	0.0102	0.0031	0.0000	27.15	16.44
26	0.0600	0.8401	0.0806	0.0061	0.0002	0.0001	0.0100	0.0030	0.0000	27.15	16.44
27	0.0800	0.8222	0.0788	0.0060	0.0002	0.0001	0.0098	0.0029	0.0000	27.15	16.44
28	0.1000	0.8043	0.0771	0.0059	0.0002	0.0001	0.0095	0.0029	0.0000	27.15	16.44
29	0.1200	0.7865	0.0754	0.0057	0.0002	0.0001	0.0093	0.0028	0.0000	27.15	16.44
30	0.1400	0.7686	0.0737	0.0056	0.0002	0.0001	0.0091	0.0028	0.0000	27.15	16.44
31	0.1600	0.7507	0.0720	0.0055	0.0002	0.0001	0.0089	0.0027	0.0000	27.15	16.44

32	0.1800	0.7328	0.0703	0.0053	0.0002	0.0001	0.0087	0.0026	0.0000	27.15	16.44
33	0.2000	0.7150	0.0686	0.0052	0.0002	0.0001	0.0085	0.0026	0.0000	27.15	16.44
34	0.0000	0.8937	0.0857	0.0065	0.0002	0.0001	0.0106	0.0032	0.0000	26.91	18.255
35	0.0200	0.8758	0.0840	0.0064	0.0002	0.0001	0.0104	0.0031	0.0000	26.91	18.255
36	0.0400	0.8580	0.0823	0.0062	0.0002	0.0001	0.0102	0.0031	0.0000	26.91	18.255
37	0.0600	0.8401	0.0806	0.0061	0.0002	0.0001	0.0100	0.0030	0.0000	26.91	18.255
38	0.0800	0.8222	0.0788	0.0060	0.0002	0.0001	0.0098	0.0029	0.0000	26.91	18.255
39	0.1000	0.8043	0.0771	0.0059	0.0002	0.0001	0.0095	0.0029	0.0000	26.91	18.255
40	0.1200	0.7865	0.0754	0.0057	0.0002	0.0001	0.0093	0.0028	0.0000	26.91	18.255
41	0.1400	0.7686	0.0737	0.0056	0.0002	0.0001	0.0091	0.0028	0.0000	26.91	18.255
42	0.1600	0.7507	0.0720	0.0055	0.0002	0.0001	0.0089	0.0027	0.0000	26.91	18.255
43	0.1800	0.7328	0.0703	0.0053	0.0002	0.0001	0.0087	0.0026	0.0000	26.91	18.255
44	0.2000	0.7150	0.0686	0.0052	0.0002	0.0001	0.0085	0.0026	0.0000	26.91	18.255
45	0.0000	0.8937	0.0857	0.0065	0.0002	0.0001	0.0106	0.0032	0.0000	27.03	18.255
46	0.0200	0.8758	0.0840	0.0064	0.0002	0.0001	0.0104	0.0031	0.0000	27.03	18.255
47	0.0400	0.8580	0.0823	0.0062	0.0002	0.0001	0.0102	0.0031	0.0000	27.03	18.255
48	0.0600	0.8401	0.0806	0.0061	0.0002	0.0001	0.0100	0.0030	0.0000	27.03	18.255
49	0.0800	0.8222	0.0788	0.0060	0.0002	0.0001	0.0098	0.0029	0.0000	27.03	18.255
50	0.1000	0.8043	0.0771	0.0059	0.0002	0.0001	0.0095	0.0029	0.0000	27.03	18.255
51	0.1200	0.7865	0.0754	0.0057	0.0002	0.0001	0.0093	0.0028	0.0000	27.03	18.255
52	0.1400	0.7686	0.0737	0.0056	0.0002	0.0001	0.0091	0.0028	0.0000	27.03	18.255
53	0.1600	0.7507	0.0720	0.0055	0.0002	0.0001	0.0089	0.0027	0.0000	27.03	18.255
54	0.1800	0.7328	0.0703	0.0053	0.0002	0.0001	0.0087	0.0026	0.0000	27.03	18.255

55	0.2000	0.7150	0.0686	0.0052	0.0002	0.0001	0.0085	0.0026	0.0000	27.03	18.255
56	0.0000	0.8937	0.0857	0.0065	0.0002	0.0001	0.0106	0.0032	0.0000	27.15	18.255
57	0.0200	0.8758	0.0840	0.0064	0.0002	0.0001	0.0104	0.0031	0.0000	27.15	18.255
58	0.0400	0.8580	0.0823	0.0062	0.0002	0.0001	0.0102	0.0031	0.0000	27.15	18.255
59	0.0600	0.8401	0.0806	0.0061	0.0002	0.0001	0.0100	0.0030	0.0000	27.15	18.255
60	0.0800	0.8222	0.0788	0.0060	0.0002	0.0001	0.0098	0.0029	0.0000	27.15	18.255
61	0.1000	0.8043	0.0771	0.0059	0.0002	0.0001	0.0095	0.0029	0.0000	27.15	18.255
62	0.1200	0.7865	0.0754	0.0057	0.0002	0.0001	0.0093	0.0028	0.0000	27.15	18.255
63	0.1400	0.7686	0.0737	0.0056	0.0002	0.0001	0.0091	0.0028	0.0000	27.15	18.255
64	0.1600	0.7507	0.0720	0.0055	0.0002	0.0001	0.0089	0.0027	0.0000	27.15	18.255
65	0.1800	0.7328	0.0703	0.0053	0.0002	0.0001	0.0087	0.0026	0.0000	27.15	18.255
66	0.2000	0.7150	0.0686	0.0052	0.0002	0.0001	0.0085	0.0026	0.0000	27.15	18.255
67	0.0000	0.8937	0.0857	0.0065	0.0002	0.0001	0.0106	0.0032	0.0000	26.91	20.07
68	0.0200	0.8758	0.0840	0.0064	0.0002	0.0001	0.0104	0.0031	0.0000	26.91	20.07
69	0.0400	0.8580	0.0823	0.0062	0.0002	0.0001	0.0102	0.0031	0.0000	26.91	20.07
70	0.0600	0.8401	0.0806	0.0061	0.0002	0.0001	0.0100	0.0030	0.0000	26.91	20.07
71	0.0800	0.8222	0.0788	0.0060	0.0002	0.0001	0.0098	0.0029	0.0000	26.91	20.07
72	0.1000	0.8043	0.0771	0.0059	0.0002	0.0001	0.0095	0.0029	0.0000	26.91	20.07
73	0.1200	0.7865	0.0754	0.0057	0.0002	0.0001	0.0093	0.0028	0.0000	26.91	20.07
74	0.1400	0.7686	0.0737	0.0056	0.0002	0.0001	0.0091	0.0028	0.0000	26.91	20.07
75	0.1600	0.7507	0.0720	0.0055	0.0002	0.0001	0.0089	0.0027	0.0000	26.91	20.07
76	0.1800	0.7328	0.0703	0.0053	0.0002	0.0001	0.0087	0.0026	0.0000	26.91	20.07
77	0.2000	0.7150	0.0686	0.0052	0.0002	0.0001	0.0085	0.0026	0.0000	26.91	20.07

78	0.0000	0.8937	0.0857	0.0065	0.0002	0.0001	0.0106	0.0032	0.0000	27.03	20.07
79	0.0200	0.8758	0.0840	0.0064	0.0002	0.0001	0.0104	0.0031	0.0000	27.03	20.07
80	0.0400	0.8580	0.0823	0.0062	0.0002	0.0001	0.0102	0.0031	0.0000	27.03	20.07
81	0.0600	0.8401	0.0806	0.0061	0.0002	0.0001	0.0100	0.0030	0.0000	27.03	20.07
82	0.0800	0.8222	0.0788	0.0060	0.0002	0.0001	0.0098	0.0029	0.0000	27.03	20.07
83	0.1000	0.8043	0.0771	0.0059	0.0002	0.0001	0.0095	0.0029	0.0000	27.03	20.07
84	0.1200	0.7865	0.0754	0.0057	0.0002	0.0001	0.0093	0.0028	0.0000	27.03	20.07
85	0.1400	0.7686	0.0737	0.0056	0.0002	0.0001	0.0091	0.0028	0.0000	27.03	20.07
86	0.1600	0.7507	0.0720	0.0055	0.0002	0.0001	0.0089	0.0027	0.0000	27.03	20.07
87	0.1800	0.7328	0.0703	0.0053	0.0002	0.0001	0.0087	0.0026	0.0000	27.03	20.07
88	0.2000	0.7150	0.0686	0.0052	0.0002	0.0001	0.0085	0.0026	0.0000	27.03	20.07
89	0.0000	0.8937	0.0857	0.0065	0.0002	0.0001	0.0106	0.0032	0.0000	27.15	20.07
90	0.0200	0.8758	0.0840	0.0064	0.0002	0.0001	0.0104	0.0031	0.0000	27.15	20.07
91	0.0400	0.8580	0.0823	0.0062	0.0002	0.0001	0.0102	0.0031	0.0000	27.15	20.07
92	0.0600	0.8401	0.0806	0.0061	0.0002	0.0001	0.0100	0.0030	0.0000	27.15	20.07
93	0.0800	0.8222	0.0788	0.0060	0.0002	0.0001	0.0098	0.0029	0.0000	27.15	20.07
94	0.1000	0.8043	0.0771	0.0059	0.0002	0.0001	0.0095	0.0029	0.0000	27.15	20.07
95	0.1200	0.7865	0.0754	0.0057	0.0002	0.0001	0.0093	0.0028	0.0000	27.15	20.07
96	0.1400	0.7686	0.0737	0.0056	0.0002	0.0001	0.0091	0.0028	0.0000	27.15	20.07
97	0.1600	0.7507	0.0720	0.0055	0.0002	0.0001	0.0089	0.0027	0.0000	27.15	20.07
98	0.1800	0.7328	0.0703	0.0053	0.0002	0.0001	0.0087	0.0026	0.0000	27.15	20.07
99	0.2000	0.7150	0.0686	0.0052	0.0002	0.0001	0.0085	0.0026	0.0000	27.15	20.07

En la **Tabla 17**, es visualizable cada una de las corridas que se realizarán por medio de dos modelos termodinámicos, Peng Robinson y Soave Redlich Kwong

A continuación se presentan el diagrama de flujo para el cálculo de la temperatura de burbuja

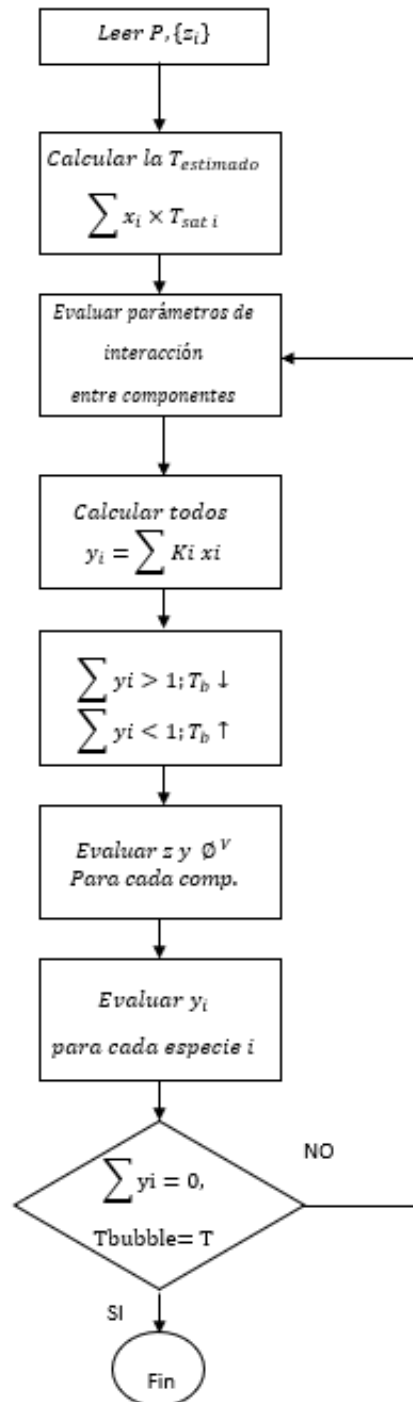


Figura 28

Diagrama de flujo para el cálculo de temperatura de burbuja

A continuación se presentan el diagrama de flujo para el cálculo de presión de burbuja

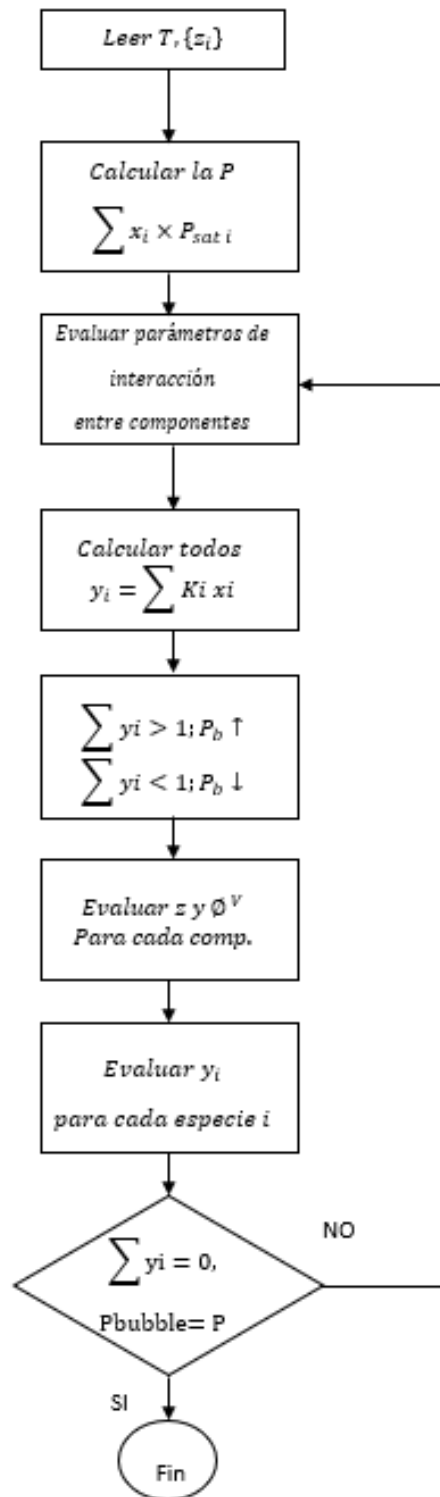


Figura 29

Diagrama de flujo para el cálculo de presión de burbuja

A continuación se presentan el diagrama de flujo para el cálculo de la presión de rocío.

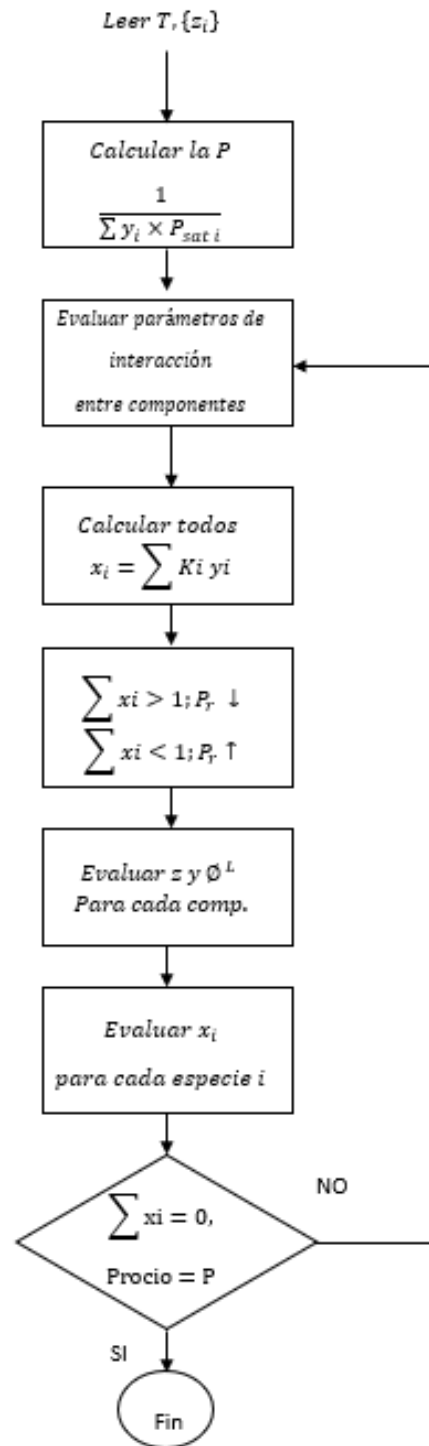


Figura 30

Diagrama de flujo para el cálculo de la presión de rocío

A continuación se presentan el diagrama de flujo para el cálculo de temperatura de rocío.

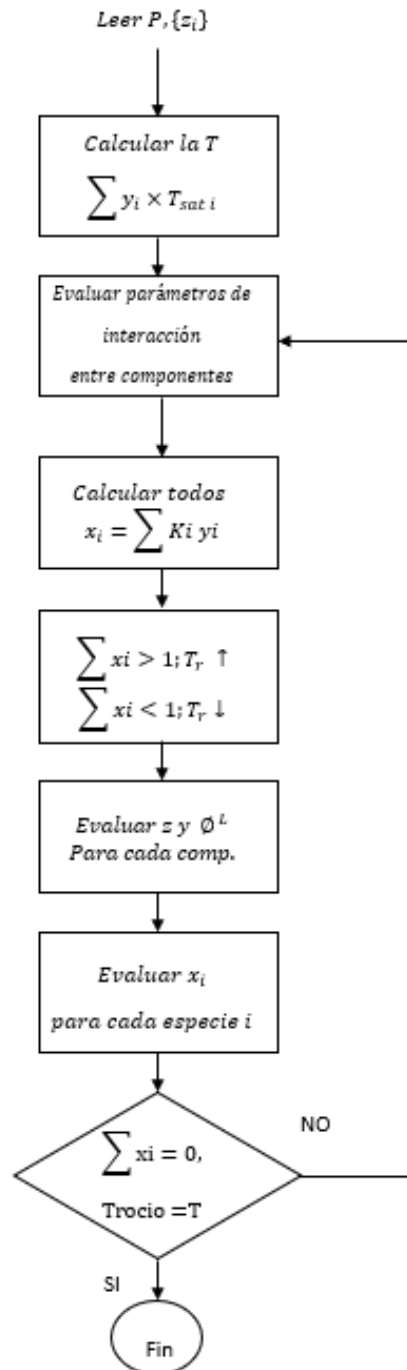


Figura 31

Diagrama de flujo para el cálculo de temperatura de rocío

A continuación se presentan el diagrama de flujo para el cálculo del factor de compresibilidad para la fase vapor

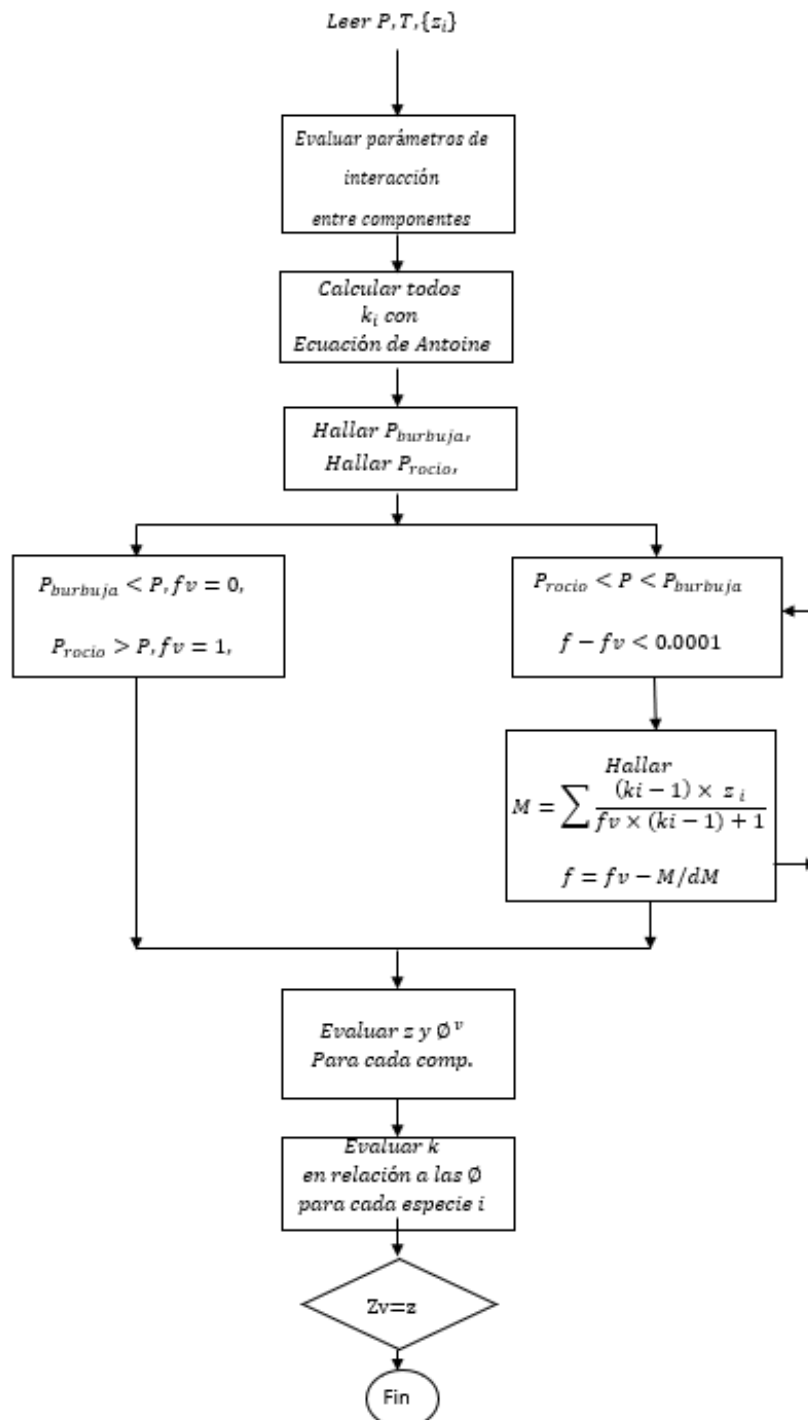


Figura 32

Diagrama de flujo para el cálculo del factor de compresibilidad en fase vapor

Para el caso de la Presión de burbuja es necesario conocer la Temperatura y composición, para la presión de rocío es necesario conocer la Temperatura y composición, para la temperatura de rocío es necesario conocer la Presión y composición y por último para conocer el factor de compresibilidad es necesario conocer la Presión, Temperatura y composición

En la siguiente programación encontraremos el código propuesto de Visual Basic para hallar la temperatura de rocío usando el modelo termodinámico Peng Robinson.

```
Public Function Trocio(P, z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7)
```

```
P = P + 1.01325
```

```
R = 8.314 'kJ/(kmol*K)
```

```
If (z_0 + z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7) <= 0 Then
```

```
y_0 = 0
```

```
y_1 = 0
```

```
y_2 = 0
```

```
y_3 = 0
```

```
y_4 = 0
```

```
y_5 = 0
```

```
y_6 = 0
```

```
y_7 = 0
```

```
Else
```

```
y_0 = z_0 / (z_0 + z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7)
```

```
y_1 = z_1 / (z_0 + z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7)
```

```
y_2 = z_2 / (z_0 + z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7)
```

```
y_3 = z_3 / (z_0 + z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7)
```

```
y_4 = z_4 / (z_0 + z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7)
```

```
y_5 = z_5 / (z_0 + z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7)
```

```
y_6 = z_6 / (z_0 + z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7)
```

```
y_7 = z_7 / (z_0 + z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6 + z_7)
```

```
End If
```

```
Pc_0 = 13.155
```

```
Pc_1 = 46.40680176
```

```
Pc_2 = 48.83850098
```

```
Pc_3 = 42.56660156
```

```
Pc_4 = 36.47620117
```

```
Pc_5 = 37.96620117
```

$$Pc_6 = 33.94370117$$

$$Pc_7 = 73.7$$

$$Tc_0 = 33.4397011$$

$$Tc_1 = 190.6990051$$

$$Tc_2 = 305.428009$$

$$Tc_3 = 369.8980103$$

$$Tc_4 = 408.0960083$$

$$Tc_5 = 425.1990051$$

$$Tc_6 = 126.194$$

$$Tc_7 = 304.1000061$$

$$w_0 = -0.12009$$

$$w_1 = 0.0115$$

$$w_2 = 0.0986$$

$$w_3 = 0.152400002$$

$$w_4 = 0.18479$$

$$w_5 = 0.201000005$$

$$w_6 = 0.04$$

$$w_7 = 0.238940001$$

$$Tsat_0 = Tc_0 / (1 - 3 * \text{Log}(P / Pc_0) / (\text{Log}(10) * (7 + 7 * w_0)))$$

$$Tsat_1 = Tc_1 / (1 - 3 * \text{Log}(P / Pc_1) / (\text{Log}(10) * (7 + 7 * w_1)))$$

$$Tsat_2 = Tc_2 / (1 - 3 * \text{Log}(P / Pc_2) / (\text{Log}(10) * (7 + 7 * w_2)))$$

$$Tsat_3 = Tc_3 / (1 - 3 * \text{Log}(P / Pc_3) / (\text{Log}(10) * (7 + 7 * w_3)))$$

$$Tsat_4 = Tc_4 / (1 - 3 * \text{Log}(P / Pc_4) / (\text{Log}(10) * (7 + 7 * w_4)))$$

$$Tsat_5 = Tc_5 / (1 - 3 * \text{Log}(P / Pc_5) / (\text{Log}(10) * (7 + 7 * w_5)))$$

$$Tsat_6 = Tc_6 / (1 - 3 * \text{Log}(P / Pc_6) / (\text{Log}(10) * (7 + 7 * w_6)))$$

$$Tsat_7 = Tc_7 / (1 - 3 * \text{Log}(P / Pc_7) / (\text{Log}(10) * (7 + 7 * w_7)))$$

$$Td = (Tsat_0 * y_0) + (Tsat_1 * y_1) + (Tsat_2 * y_2) + (Tsat_3 * y_3) + (Tsat_4 * y_4) + (Tsat_5 * y_5) + (Tsat_6 * y_6) + (Tsat_7 * y_7)$$

$$Tr_0 = Td / Tc_0$$

$$Tr_1 = Td / Tc_1$$

$$Tr_2 = Td / Tc_2$$

$$Tr_3 = Td / Tc_3$$

$$Tr_4 = Td / Tc_4$$

$$Tr_5 = Td / Tc_5$$

$$Tr_6 = Td / Tc_6$$

$$Tr_7 = Td / Tc_7$$

If $w_0 < 0.49$ Then

$$M_0 = 0.37464 + 1.54226 * (w_0) - 0.26992 * (w_0)^2$$

Else

$$M_0 = 0.379642 + (1.48503 - (0.164423 - 0.016666 * (w_0)) * (w_0)) * (w_0)$$

End If

```

If w_1 < 0.49 Then
M_1 = 0.37464 + 1.54226 * (w_1) - 0.26992 * (w_1) ^ 2
Else
M_1 = 0.379642 + (1.48503 - (0.164423 - 0.016666 * (w_1)) * (w_1)) * (w_1)
End If
If w_2 < 0.49 Then
M_2 = 0.37464 + 1.54226 * (w_2) - 0.26992 * (w_2) ^ 2
Else
M_2 = 0.379642 + (1.48503 - (0.164423 - 0.016666 * (w_2)) * (w_2)) * (w_2)
End If
If w_3 < 0.49 Then
M_3 = 0.37464 + 1.54226 * (w_3) - 0.26992 * (w_3) ^ 2
Else
M_3 = 0.379642 + (1.48503 - (0.164423 - 0.016666 * (w_3)) * (w_3)) * (w_3)
End If
If w_4 < 0.49 Then
M_4 = 0.37464 + 1.54226 * (w_4) - 0.26992 * (w_4) ^ 2
Else
M_4 = 0.379642 + (1.48503 - (0.164423 - 0.016666 * (w_4)) * (w_4)) * (w_4)
End If
If w_5 < 0.49 Then
M_5 = 0.37464 + 1.54226 * (w_5) - 0.26992 * (w_5) ^ 2
Else
M_5 = 0.379642 + (1.48503 - (0.164423 - 0.016666 * (w_5)) * (w_5)) * (w_5)
End If
If w_6 < 0.49 Then
M_6 = 0.37464 + 1.54226 * (w_6) - 0.26992 * (w_6) ^ 2
Else
M_6 = 0.379642 + (1.48503 - (0.164423 - 0.016666 * (w_6)) * (w_6)) * (w_6)
End If
If w_7 < 0.49 Then
M_7 = 0.37464 + 1.54226 * (w_7) - 0.26992 * (w_7) ^ 2
Else
M_7 = 0.379642 + (1.48503 - (0.164423 - 0.016666 * (w_7)) * (w_7)) * (w_7)
End If

```

```

alfa_0 = (1 + M_0 * (1 - ((Tr_0) ^ 0.5))) ^ 2
alfa_1 = (1 + M_1 * (1 - ((Tr_1) ^ 0.5))) ^ 2
alfa_2 = (1 + M_2 * (1 - ((Tr_2) ^ 0.5))) ^ 2
alfa_3 = (1 + M_3 * (1 - ((Tr_3) ^ 0.5))) ^ 2
alfa_4 = (1 + M_4 * (1 - ((Tr_4) ^ 0.5))) ^ 2
alfa_5 = (1 + M_5 * (1 - ((Tr_5) ^ 0.5))) ^ 2
alfa_6 = (1 + M_6 * (1 - ((Tr_6) ^ 0.5))) ^ 2
alfa_7 = (1 + M_7 * (1 - ((Tr_7) ^ 0.5))) ^ 2

```

```

a_0 = alfa_0 * (0.457235 * (R * Tc_0) ^ 2 / Pc_0)
a_1 = alfa_1 * (0.457235 * (R * Tc_1) ^ 2 / Pc_1)

```

```

a_2 = alfa_2 * (0.457235 * (R * Tc_2) ^ 2 / Pc_2)
a_3 = alfa_3 * (0.457235 * (R * Tc_3) ^ 2 / Pc_3)
a_4 = alfa_4 * (0.457235 * (R * Tc_4) ^ 2 / Pc_4)
a_5 = alfa_5 * (0.457235 * (R * Tc_5) ^ 2 / Pc_5)
a_6 = alfa_6 * (0.457235 * (R * Tc_6) ^ 2 / Pc_6)
a_7 = alfa_7 * (0.457235 * (R * Tc_7) ^ 2 / Pc_7)

```

```

b_0 = 0.077796 * R * Tc_0 / Pc_0
b_1 = 0.077796 * R * Tc_1 / Pc_1
b_2 = 0.077796 * R * Tc_2 / Pc_2
b_3 = 0.077796 * R * Tc_3 / Pc_3
b_4 = 0.077796 * R * Tc_4 / Pc_4
b_5 = 0.077796 * R * Tc_5 / Pc_5
b_6 = 0.077796 * R * Tc_6 / Pc_6
b_7 = 0.077796 * R * Tc_7 / Pc_7

```

'Binary interactions parameters

```

k0_0 = 0
k1_1 = 0
k2_2 = 0
k3_3 = 0
k4_4 = 0
k5_5 = 0
k6_6 = 0
k7_7 = 0
k0_1 = 0.2020000070333
k1_0 = k0_1
k0_2 = 0.2231000065804
k2_0 = k0_2
k0_3 = 0.2142000049353
k3_0 = k0_3
k0_4 = 0.2037000060081
k4_0 = k0_4
k0_5 = 0.1941000074148
k5_0 = k0_5
k0_6 = -0.0359990000725
k6_0 = k0_6
k0_7 = 0.1202000007033
k7_0 = k_7
k1_2 = 2.24134884774685E-03
k2_1 = k1_2
k1_3 = 6.82880263775587E-03
k3_1 = k1_3
k1_4 = 1.31133804097772E-02
k4_1 = k1_4
k1_5 = 1.23046524822712E-02
k5_1 = k1_5

```

$k1_6 = 3.59990000724792E-02$
 $k6_1 = k1_6$
 $k1_7 = 0.1000000001490116$
 $k7_1 = k1_7$
 $k2_3 = 1.25790608581156E-03$
 $k3_2 = k2_3$
 $k2_4 = 4.57358453422785E-03$
 $k4_2 = k2_4$
 $k2_5 = 4.09637205302715E-03$
 $k5_2 = k2_5$
 $k2_6 = 5.000000007450581E-02$
 $k6_2 = k2_6$
 $k2_7 = 0.129800006747246$
 $k7_2 = k2_7$
 $k3_4 = 1.04057649150491E-03$
 $k4_3 = k3_4$
 $k3_5 = 8.18938016891479E-04$
 $k5_3 = k3_5$
 $k3_6 = 7.99980014562607E-02$
 $k6_3 = k3_9$
 $k3_7 = 0.1350000005364418$
 $k7_3 = k3_7$
 $k4_5 = 1.32866098283557E-05$
 $k5_4 = k4_5$
 $k4_6 = 9.49990004301071E-02$
 $k6_4 = k4_6$
 $k4_7 = 0.129800006747246$
 $k7_4 = k4_7$
 $k5_6 = 9.00000035762787E-02$
 $k6_5 = k5_6$
 $k5_7 = 0.129800006747246$
 $k7_5 = k5_7$
 $k6_7 = -1.99970006942749E-02$
 $k7_6 = k6_7$

'Calculated Matrix Aij:

$A0_0 = (1 - k0_0) * \text{Sqr}(a_0 * a_0)$
 $A0_1 = (1 - k0_1) * \text{Sqr}(a_0 * a_1)$
 $A0_2 = (1 - k0_2) * \text{Sqr}(a_0 * a_2)$
 $A0_3 = (1 - k0_3) * \text{Sqr}(a_0 * a_3)$
 $A0_4 = (1 - k0_4) * \text{Sqr}(a_0 * a_4)$
 $A0_5 = (1 - k0_5) * \text{Sqr}(a_0 * a_5)$
 $A0_6 = (1 - k0_6) * \text{Sqr}(a_0 * a_6)$
 $A0_7 = (1 - k0_7) * \text{Sqr}(a_0 * a_7)$
 $A1_0 = A0_1$
 $A1_1 = (1 - k1_1) * \text{Sqr}(a_1 * a_1)$
 $A1_2 = (1 - k1_2) * \text{Sqr}(a_1 * a_2)$

$$\begin{aligned}
A1_3 &= (1 - k1_3) * \text{Sqr}(a_1 * a_3) \\
A1_4 &= (1 - k1_4) * \text{Sqr}(a_1 * a_4) \\
A1_5 &= (1 - k1_5) * \text{Sqr}(a_1 * a_5) \\
A1_6 &= (1 - k1_6) * \text{Sqr}(a_1 * a_6) \\
A1_7 &= (1 - k1_7) * \text{Sqr}(a_1 * a_7) \\
A2_0 &= A0_2 \\
A2_1 &= A1_2 \\
A2_2 &= (1 - k2_2) * \text{Sqr}(a_2 * a_2) \\
A2_3 &= (1 - k2_3) * \text{Sqr}(a_2 * a_3) \\
A2_4 &= (1 - k2_4) * \text{Sqr}(a_2 * a_4) \\
A2_5 &= (1 - k2_5) * \text{Sqr}(a_2 * a_5) \\
A2_6 &= (1 - k2_6) * \text{Sqr}(a_2 * a_6) \\
A2_7 &= (1 - k2_7) * \text{Sqr}(a_2 * a_7) \\
A3_0 &= A0_3 \\
A3_1 &= A1_3 \\
A3_2 &= A2_3 \\
A3_3 &= (1 - k3_3) * \text{Sqr}(a_3 * a_3) \\
A3_4 &= (1 - k3_4) * \text{Sqr}(a_3 * a_4) \\
A3_5 &= (1 - k3_5) * \text{Sqr}(a_3 * a_5) \\
A3_6 &= (1 - k3_6) * \text{Sqr}(a_3 * a_6) \\
A3_7 &= (1 - k3_7) * \text{Sqr}(a_3 * a_7) \\
A4_0 &= A0_4 \\
A4_1 &= A1_4 \\
A4_2 &= A2_4 \\
A4_3 &= A3_4 \\
A4_4 &= (1 - k4_4) * \text{Sqr}(a_4 * a_4) \\
A4_5 &= (1 - k4_5) * \text{Sqr}(a_4 * a_5) \\
A4_6 &= (1 - k4_6) * \text{Sqr}(a_4 * a_6) \\
A4_7 &= (1 - k4_7) * \text{Sqr}(a_4 * a_7) \\
A5_0 &= A0_5 \\
A5_1 &= A1_5 \\
A5_2 &= A2_5 \\
A5_3 &= A3_5 \\
A5_4 &= A4_5 \\
A5_5 &= (1 - k5_5) * \text{Sqr}(a_5 * a_5) \\
A5_6 &= (1 - k5_6) * \text{Sqr}(a_5 * a_6) \\
A5_7 &= (1 - k5_7) * \text{Sqr}(a_5 * a_7) \\
A6_0 &= A0_6 \\
A6_1 &= A1_6 \\
A6_2 &= A2_6 \\
A6_3 &= A3_6 \\
A6_4 &= A4_6 \\
A6_5 &= A5_6 \\
A6_6 &= (1 - k6_6) * \text{Sqr}(a_6 * a_6) \\
A6_7 &= (1 - k6_7) * \text{Sqr}(a_6 * a_7) \\
A7_0 &= A0_7 \\
A7_1 &= A1_7
\end{aligned}$$

```

A7_2 = A2_7
A7_3 = A3_7
A7_4 = A4_7
A7_5 = A5_7
A7_6 = A6_7
A7_7 = (1 - k7_7) * Sqr(a_7 * a_7)
'xi
xi_0 = y_0 / (Pc_0 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_0) * (1 - Tc_0 / Td)))
xi_1 = y_1 / (Pc_1 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_1) * (1 - Tc_1 / Td)))
xi_2 = y_2 / (Pc_2 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_2) * (1 - Tc_2 / Td)))
xi_3 = y_3 / (Pc_3 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_3) * (1 - Tc_3 / Td)))
xi_4 = y_4 / (Pc_4 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_4) * (1 - Tc_4 / Td)))
xi_5 = y_5 / (Pc_5 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_5) * (1 - Tc_5 / Td)))
xi_6 = y_6 / (Pc_6 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_6) * (1 - Tc_6 / Td)))
xi_7 = y_7 / (Pc_7 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_7) * (1 - Tc_7 / Td)))

sumxi = xi_0 + xi_1 + xi_2 + xi_3 + xi_4 + xi_5 + xi_6 + xi_7

If sumxi > 1 Then

Do
Tdeww = Td + 0.05

'Se calcula nuevamente la temperatura reducida para cada componente
'Se calcula nuevamente el valor del factor alfa para cada componente
'Se calcula nuevamente el valor del factor a para cada componente
'Se calcula nuevamente la matriz de interacción de todos los componentes

'Vapour Fugacity

'A calculation
sumiia = (y_0) ^ 2 * A0_0 + y_1 ^ 2 * A1_1 + y_2 ^ 2 * A2_2 + y_3 ^ 2 * A3_3 + y_4 ^ 2
* A4_4 + y_5 ^ 2 * A5_5 + y_6 ^ 2 * A6_6 + y_7 ^ 2 * A7_7
sum10a = 2 * ((y_0) * y_1 * A0_1 + (y_0) * y_2 * A0_2 + (y_0) * y_3 * A0_3 + (y_0) *
y_4 * A0_4 + (y_0) * y_5 * A0_5 + (y_0) * y_6 * A0_6 + (y_0) * y_7 * A0_7)
sum11a = 2 * (y_1 * y_2 * A1_2 + y_1 * y_3 * A1_3 + y_1 * y_4 * A1_4 + y_1 * y_5 *
A1_5 + y_1 * y_6 * A1_6 + y_1 * y_7 * A1_7)
sum12a = 2 * (y_2 * y_3 * A2_3 + y_2 * y_4 * A2_4 + y_2 * y_5 * A2_5 + y_2 * y_6 *
A2_6 + y_2 * y_7 * A2_7)
sum13a = 2 * (y_3 * y_4 * A3_4 + y_3 * y_5 * A3_5 + y_3 * y_6 * A3_6 + y_3 * y_7 *
A3_7)
sum14a = 2 * (y_4 * y_5 * A4_5 + y_4 * y_6 * A4_6 + y_4 * y_7 * A4_7)
sum15a = 2 * (y_5 * y_6 * A5_6 + y_5 * y_7 * A5_7)
sum16a = 2 * (y_6 * y_7 * A6_7)

sumAA = sumiia + sum10a + sum11a + sum12a + sum13a + sum14a + sum15a + sum16a

```

$$AA = \text{sumAA} * P / (R * T_{\text{deww}})^2$$

'B calculation

$$\text{sumBB} = y_0 * b_0 + y_1 * b_1 + y_2 * b_2 + y_3 * b_3 + y_4 * b_4 + y_5 * b_5 + y_6 * b_6 + y_7 * b_7$$

$$BB = \text{sumBB} * P / (R * T_{\text{deww}})$$

$$Z_{\text{vap}} = Z_{\text{g_PengRobinson}}(AA, BB)$$

'fugacidades vapor

$$\text{Fuvap0} = ((b_0 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - BB)) - 1 / (2^{1.5}) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A0_0 + y_1 * A0_1 + y_2 * A0_2 + y_3 * A0_3 + y_4 * A0_4 + y_5 * A0_5 + y_6 * A0_6 + y_7 * A0_7)) / \text{sumAA}) - (b_0 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * BB) / (Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap1} = ((b_1 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - BB)) - 1 / (2^{1.5}) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A1_0 + y_1 * A1_1 + y_2 * A1_2 + y_3 * A1_3 + y_4 * A1_4 + y_5 * A1_5 + y_6 * A1_6 + y_7 * A1_7)) / \text{sumAA}) - (b_1 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * BB) / (Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap2} = ((b_2 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - BB)) - 1 / (2^{1.5}) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A2_0 + y_1 * A2_1 + y_2 * A2_2 + y_3 * A2_3 + y_4 * A2_4 + y_5 * A2_5 + y_6 * A2_6 + y_7 * A2_7)) / \text{sumAA}) - (b_2 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * BB) / (Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap3} = ((b_3 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - BB)) - 1 / (2^{1.5}) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A3_0 + y_1 * A3_1 + y_2 * A3_2 + y_3 * A3_3 + y_4 * A3_4 + y_5 * A3_5 + y_6 * A3_6 + y_7 * A3_7)) / \text{sumAA}) - (b_3 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * BB) / (Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap4} = ((b_4 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - BB)) - 1 / (2^{1.5}) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A4_0 + y_1 * A4_1 + y_2 * A4_2 + y_3 * A4_3 + y_4 * A4_4 + y_5 * A4_5 + y_6 * A4_6 + y_7 * A4_7)) / \text{sumAA}) - (b_4 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * BB) / (Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap5} = ((b_5 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - BB)) - 1 / (2^{1.5}) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A5_0 + y_1 * A5_1 + y_2 * A5_2 + y_3 * A5_3 + y_4 * A5_4 + y_5 * A5_5 + y_6 * A5_6 + y_7 * A5_7)) / \text{sumAA}) - (b_5 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * BB) / (Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap6} = ((b_6 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - BB)) - 1 / (2^{1.5}) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A6_0 + y_1 * A6_1 + y_2 * A6_2 + y_3 * A6_3 + y_4 * A6_4 + y_5 * A6_5 + y_6 * A6_6 + y_7 * A6_7)) / \text{sumAA}) - (b_6 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * BB) / (Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap7} = ((b_7 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - BB)) - 1 / (2^{1.5}) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A7_0 + y_1 * A7_1 + y_2 * A7_2 + y_3 * A7_3 + y_4 * A7_4 + y_5 * A7_5 + y_6 * A7_6 + y_7 * A7_7)) / \text{sumAA}) - (b_7 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * BB) / (Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * BB))$$

'fugacity vapour

$$\text{fugv0} = \text{Exp}(\text{Fuvap0})$$

```
fugv1 = Exp(Fuvap1)
fugv2 = Exp(Fuvap2)
fugv3 = Exp(Fuvap3)
fugv4 = Exp(Fuvap4)
fugv5 = Exp(Fuvap5)
fugv6 = Exp(Fuvap6)
fugv7 = Exp(Fuvap7)
```

```
'xi
```

```
x_0 = y_0 / (Pc_0 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_0) * (1 - Tc_0 / Tdeww)))
x_1 = y_1 / (Pc_1 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_1) * (1 - Tc_1 / Tdeww)))
x_2 = y_2 / (Pc_2 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_2) * (1 - Tc_2 / Tdeww)))
x_3 = y_3 / (Pc_3 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_3) * (1 - Tc_3 / Tdeww)))
x_4 = y_4 / (Pc_4 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_4) * (1 - Tc_4 / Tdeww)))
x_5 = y_5 / (Pc_5 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_5) * (1 - Tc_5 / Tdeww)))
x_6 = y_6 / (Pc_6 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_6) * (1 - Tc_6 / Tdeww)))
x_7 = y_7 / (Pc_7 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_7) * (1 - Tc_7 / Tdeww)))
```

```
For I = 1 To 20
```

```
sumx = x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7
x_0 = x_0 / sumx
x_1 = x_1 / sumx
x_2 = x_2 / sumx
x_3 = x_3 / sumx
x_4 = x_4 / sumx
x_5 = x_5 / sumx
x_6 = x_6 / sumx
x_7 = x_7 / sumx
```

```
'Liquid Fugacity
```

```
'A calculation
```

```
sumii = (x_0) ^ 2 * A0_0 + x_1 ^ 2 * A1_1 + x_2 ^ 2 * A2_2 + x_3 ^ 2 * A3_3 + x_4 ^ 2 *
* A4_4 + x_5 ^ 2 * A5_5 + x_6 ^ 2 * A6_6 + x_7 ^ 2 * A7_7
sum10 = 2 * ((x_0) * x_1 * A0_1 + (x_0) * x_2 * A0_2 + (x_0) * x_3 * A0_3 + (x_0) *
x_4 * A0_4 + (x_0) * x_5 * A0_5 + (x_0) * x_6 * A0_6 + (x_0) * x_7 * A0_7)
sum11 = 2 * (x_1 * x_2 * A1_2 + x_1 * x_3 * A1_3 + x_1 * x_4 * A1_4 + x_1 * x_5 *
A1_5 + x_1 * x_6 * A1_6 + x_1 * x_7 * A1_7)
sum12 = 2 * (x_2 * x_3 * A2_3 + x_2 * x_4 * A2_4 + x_2 * x_5 * A2_5 + x_2 * x_6 *
A2_6 + x_2 * x_7 * A2_7)
sum13 = 2 * (x_3 * x_4 * A3_4 + x_3 * x_5 * A3_5 + x_3 * x_6 * A3_6 + x_3 * x_7 *
A3_7)
sum14 = 2 * (x_4 * x_5 * A4_5 + x_4 * x_6 * A4_6 + x_4 * x_7 * A4_7)
sum15 = 2 * (x_5 * x_6 * A5_6 + x_5 * x_7 * A5_7)
sum16 = 2 * (x_6 * x_7 * A6_7)
sumA = sumii + sum10 + sum11 + sum12 + sum13 + sum14 + sum15 + sum16
```

$$A = \text{sumA} * P / (R * T_{\text{deww}})^2$$

$$\begin{aligned} \text{sumB} &= x_0 * b_0 + x_1 * b_1 + x_2 * b_2 + x_3 * b_3 + x_4 * b_4 + x_5 * b_5 + x_6 * b_6 + x_7 * b_7 \\ B &= \text{sumB} * P / (R * T_{\text{deww}}) \end{aligned}$$

' Root of the cubic equation of state Peng robinson : $z^3 - (1-B)z^2 + (A-2B-3B^2)z - (AB-B^2-B^3) = 0$

$$Z_{\text{liq}} = Z_{\text{liq_PengRobinson}}(A, B)$$

$$\text{Fuliq0} = ((b_0 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A_{0_0} + x_1 * A_{0_1} + x_2 * A_{0_2} + x_3 * A_{0_3} + x_4 * A_{0_4} + x_5 * A_{0_5} + x_6 * A_{0_6} + x_7 * A_{0_7})) / \text{sumA}) - (b_0 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq1} = ((b_1 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A_{1_0} + x_1 * A_{1_1} + x_2 * A_{1_2} + x_3 * A_{1_3} + x_4 * A_{1_4} + x_5 * A_{1_5} + x_6 * A_{1_6} + x_7 * A_{1_7})) / \text{sumA}) - (b_1 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq2} = ((b_2 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A_{2_0} + x_1 * A_{2_1} + x_2 * A_{2_2} + x_3 * A_{2_3} + x_4 * A_{2_4} + x_5 * A_{2_5} + x_6 * A_{2_6} + x_7 * A_{2_7})) / \text{sumA}) - (b_2 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq3} = ((b_3 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A_{3_0} + x_1 * A_{3_1} + x_2 * A_{3_2} + x_3 * A_{3_3} + x_4 * A_{3_4} + x_5 * A_{3_5} + x_6 * A_{3_6} + x_7 * A_{3_7})) / \text{sumA}) - (b_3 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq4} = ((b_4 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A_{4_0} + x_1 * A_{4_1} + x_2 * A_{4_2} + x_3 * A_{4_3} + x_4 * A_{4_4} + x_5 * A_{4_5} + x_6 * A_{4_6} + x_7 * A_{4_7})) / \text{sumA}) - (b_4 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq5} = ((b_5 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A_{5_0} + x_1 * A_{5_1} + x_2 * A_{5_2} + x_3 * A_{5_3} + x_4 * A_{5_4} + x_5 * A_{5_5} + x_6 * A_{5_6} + x_7 * A_{5_7})) / \text{sumA}) - (b_5 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq6} = ((b_6 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A_{6_0} + x_1 * A_{6_1} + x_2 * A_{6_2} + x_3 * A_{6_3} + x_4 * A_{6_4} + x_5 * A_{6_5} + x_6 * A_{6_6} + x_7 * A_{6_7})) / \text{sumA}) - (b_6 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq7} = ((b_7 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A_{7_0} + x_1 * A_{7_1} + x_2 * A_{7_2} + x_3 * A_{7_3} + x_4 * A_{7_4} + x_5 * A_{7_5} + x_6 * A_{7_6} + x_7 * A_{7_7})) / \text{sumA}) - (b_7 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{fugl0} = \text{Exp}(\text{Fuliq0})$$

$$\text{fugl1} = \text{Exp}(\text{Fuliq1})$$

$$\text{fugl2} = \text{Exp}(\text{Fuliq2})$$

```
fugl3 = Exp(Fuliq3)
fugl4 = Exp(Fuliq4)
fugl5 = Exp(Fuliq5)
fugl6 = Exp(Fuliq6)
fugl7 = Exp(Fuliq7)
```

```
x_0 = fugv1 / fugl1 * y_0
x_1 = fugv1 / fugl1 * y_1
x_2 = fugv2 / fugl2 * y_2
x_3 = fugv3 / fugl3 * y_3
x_4 = fugv4 / fugl4 * y_4
x_5 = fugv5 / fugl5 * y_5
x_6 = fugv6 / fugl6 * y_6
x_7 = fugv7 / fugl7 * y_7
```

```
xi_0 = x_0
xi_1 = x_1
xi_2 = x_2
xi_3 = x_3
xi_4 = x_4
xi_5 = x_5
xi_6 = x_6
xi_7 = x_7
```

```
sumxi = xi_0 + xi_1 + xi_2 + xi_3 + xi_4 + xi_5 + xi_6 + xi_7
```

Next

Td = Tdeww

Loop Until (sumxi - 1) <= 0

Elseif sumxi < 1 Then 'Tdewwle must be higher

Do

Tdeww = Td - 0.05

‘Se calcula nuevamente la temperatura reducida para cada componente

‘Se calcula nuevamente el valor del factor alfa para cada componente

‘Se calcula nuevamente el valor del factor a para cada componente

'Se calcula nuevamente la matriz de interacción de todos los componentes

'Vapour Fugacity

'A calculation

```
sumiia = (y_0)^2 * A0_0 + y_1^2 * A1_1 + y_2^2 * A2_2 + y_3^2 * A3_3 + y_4^2
* A4_4 + y_5^2 * A5_5 + y_6^2 * A6_6 + y_7^2 * A7_7
sum10a = 2 * ((y_0) * y_1 * A0_1 + (y_0) * y_2 * A0_2 + (y_0) * x_3 * A0_3 + (y_0) *
y_4 * A0_4 + (y_0) * y_5 * A0_5 + (y_0) * y_6 * A0_6 + (y_0) * y_7 * A0_7)
```

$$\begin{aligned}
\text{sum11a} &= 2 * (y_1 * y_2 * A1_2 + y_1 * y_3 * A1_3 + y_1 * y_4 * A1_4 + y_1 * y_5 * A1_5 + y_1 * y_6 * A1_6 + y_1 * y_7 * A1_7) \\
\text{sum12a} &= 2 * (y_2 * y_3 * A2_3 + y_2 * y_4 * A2_4 + y_2 * y_5 * A2_5 + y_2 * y_6 * A2_6 + y_2 * y_7 * A2_7) \\
\text{sum13a} &= 2 * (y_3 * y_4 * A3_4 + y_3 * y_5 * A3_5 + y_3 * y_6 * A3_6 + y_3 * y_7 * A3_7) \\
\text{sum14a} &= 2 * (y_4 * y_5 * A4_5 + y_4 * y_6 * A4_6 + y_4 * y_7 * A4_7) \\
\text{sum15a} &= 2 * (y_5 * y_6 * A5_6 + y_5 * y_7 * A5_7) \\
\text{sum16a} &= 2 * (y_6 * y_7 * A6_7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{sumAA} &= \text{sumiia} + \text{sum10a} + \text{sum11a} + \text{sum12a} + \text{sum13a} + \text{sum14a} + \text{sum15a} + \text{sum16a} \\
\text{AA} &= \text{sumAA} * P / (R * T_{\text{deww}})^2 \\
\text{sumBB} &= y_0 * b_0 + y_1 * b_1 + y_2 * b_2 + y_3 * b_3 + y_4 * b_4 + y_5 * b_5 + y_6 * b_6 + y_7 * b_7 \\
\text{BB} &= \text{sumBB} * P / (R * T_{\text{deww}}) \\
Z_{\text{vap}} &= Zg_PengRobinson(\text{AA}, \text{BB})
\end{aligned}$$

'fugacidades vapor

$$\begin{aligned}
\text{Fuvap0} &= ((b_0 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - \text{BB})) - 1 / (2^{1.5}) * (\text{AA} / \text{BB}) * \\
&(((2 * (y_0 * A0_0 + y_1 * A0_1 + y_2 * A0_2 + y_3 * A0_3 + y_4 * A0_4 + y_5 * A0_5 + y_6 * A0_6 + y_7 * A0_7)) / \text{sumAA}) - (b_0 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * \text{BB}) / \\
&(Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * \text{BB})) \\
\text{Fuvap1} &= ((b_1 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - \text{BB})) - 1 / (2^{1.5}) * (\text{AA} / \text{BB}) * \\
&(((2 * (y_0 * A1_0 + y_1 * A1_1 + y_2 * A1_2 + y_3 * A1_3 + y_4 * A1_4 + y_5 * A1_5 + y_6 * A1_6 + y_7 * A1_7)) / \text{sumAA}) - (b_1 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * \text{BB}) / \\
&(Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * \text{BB})) \\
\text{Fuvap2} &= ((b_2 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - \text{BB})) - 1 / (2^{1.5}) * (\text{AA} / \text{BB}) * \\
&(((2 * (y_0 * A2_0 + y_1 * A2_1 + y_2 * A2_2 + y_3 * A2_3 + y_4 * A2_4 + y_5 * A2_5 + y_6 * A2_6 + y_7 * A2_7)) / \text{sumAA}) - (b_2 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * \text{BB}) / \\
&(Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * \text{BB})) \\
\text{Fuvap3} &= ((b_3 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - \text{BB})) - 1 / (2^{1.5}) * (\text{AA} / \text{BB}) * \\
&(((2 * (y_0 * A3_0 + y_1 * A3_1 + y_2 * A3_2 + y_3 * A3_3 + y_4 * A3_4 + y_5 * A3_5 + y_6 * A3_6 + y_7 * A3_7)) / \text{sumAA}) - (b_3 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * \text{BB}) / \\
&(Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * \text{BB})) \\
\text{Fuvap4} &= ((b_4 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - \text{BB})) - 1 / (2^{1.5}) * (\text{AA} / \text{BB}) * \\
&(((2 * (y_0 * A4_0 + y_1 * A4_1 + y_2 * A4_2 + y_3 * A4_3 + y_4 * A4_4 + y_5 * A4_5 + y_6 * A4_6 + y_7 * A4_7)) / \text{sumAA}) - (b_4 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * \text{BB}) / \\
&(Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * \text{BB})) \\
\text{Fuvap5} &= ((b_5 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - \text{BB})) - 1 / (2^{1.5}) * (\text{AA} / \text{BB}) * \\
&(((2 * (y_0 * A5_0 + y_1 * A5_1 + y_2 * A5_2 + y_3 * A5_3 + y_4 * A5_4 + y_5 * A5_5 + y_6 * A5_6 + y_7 * A5_7)) / \text{sumAA}) - (b_5 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * \text{BB}) / \\
&(Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * \text{BB})) \\
\text{Fuvap6} &= ((b_6 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - \text{BB})) - 1 / (2^{1.5}) * (\text{AA} / \text{BB}) * \\
&(((2 * (y_0 * A6_0 + y_1 * A6_1 + y_2 * A6_2 + y_3 * A6_3 + y_4 * A6_4 + y_5 * A6_5 + y_6 * A6_6 + y_7 * A6_7)) / \text{sumAA}) - (b_6 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_{\text{vap}} + (2^{0.5} + 1) * \text{BB}) / \\
&(Z_{\text{vap}} - (2^{0.5} - 1) * \text{BB})) \\
\text{Fuvap7} &= ((b_7 / \text{sumBB}) * (Z_{\text{vap}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{vap}} - \text{BB})) - 1 / (2^{1.5}) * (\text{AA} / \text{BB}) *
\end{aligned}$$

$$(((2 * (y_0 * A7_0 + y_1 * A7_1 + y_2 * A7_2 + y_3 * A7_3 + y_4 * A7_4 + y_5 * A7_5 + y_6 * A7_6 + y_7 * A7_7)) / \text{sumAA}) - (b_7 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_vap + (2^{0.5} + 1) * BB) / (Z_vap - (2^{0.5} - 1) * BB))$$

```
fugv0 = Exp(Fuwap0)
fugv1 = Exp(Fuwap1)
fugv2 = Exp(Fuwap2)
fugv3 = Exp(Fuwap3)
fugv4 = Exp(Fuwap4)
fugv5 = Exp(Fuwap5)
fugv6 = Exp(Fuwap6)
fugv7 = Exp(Fuwap7)
```

'xi

```
x_0 = y_1 / (Pc_0 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_0) * (1 - Tc_0 / Tdeww)))
x_1 = y_1 / (Pc_1 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_1) * (1 - Tc_1 / Tdeww)))
x_2 = y_2 / (Pc_2 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_2) * (1 - Tc_2 / Tdeww)))
x_3 = y_3 / (Pc_3 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_3) * (1 - Tc_3 / Tdeww)))
x_4 = y_4 / (Pc_4 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_4) * (1 - Tc_4 / Tdeww)))
x_5 = y_5 / (Pc_5 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_5) * (1 - Tc_5 / Tdeww)))
x_6 = y_6 / (Pc_6 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_6) * (1 - Tc_6 / Tdeww)))
x_7 = y_7 / (Pc_7 / P * Exp(Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_7) * (1 - Tc_7 / Tdeww)))
```

For I=1 To 20

```
sumx = x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7
x_0 = x_0 / sumx
x_1 = x_1 / sumx
x_2 = x_2 / sumx
x_3 = x_3 / sumx
x_4 = x_4 / sumx
x_5 = x_5 / sumx
x_6 = x_6 / sumx
x_7 = x_7 / sumx
```

'Liquid Fugacity

```
sumiia = (y_0)^2 * A0_0 + y_1^2 * A1_1 + y_2^2 * A2_2 + y_3^2 * A3_3 + y_4^2 * A4_4 + y_5^2 * A5_5 + y_6^2 * A6_6 + y_7^2 * A7_7
sum10a = 2 * ((y_0) * y_1 * A0_1 + (y_0) * y_2 * A0_2 + (y_0) * x_3 * A0_3 + (y_0) * y_4 * A0_4 + (y_0) * y_5 * A0_5 + (y_0) * y_6 * A0_6 + (y_0) * y_7 * A0_7)
sum11a = 2 * (y_1 * y_2 * A1_2 + y_1 * y_3 * A1_3 + y_1 * y_4 * A1_4 + y_1 * y_5 * A1_5 + y_1 * y_6 * A1_6 + y_1 * y_7 * A1_7)
sum12a = 2 * (y_2 * y_3 * A2_3 + y_2 * y_4 * A2_4 + y_2 * y_5 * A2_5 + y_2 * y_6 * A2_6 + y_2 * y_7 * A2_7)
sum13a = 2 * (y_3 * y_4 * A3_4 + y_3 * y_5 * A3_5 + y_3 * y_6 * A3_6 + y_3 * y_7 * A3_7)
sum14a = 2 * (y_4 * y_5 * A4_5 + y_4 * y_6 * A4_6 + y_4 * y_7 * A4_7)
```

$$\text{sum15a} = 2 * (y_5 * y_6 * A5_6 + y_5 * y_7 * A5_7) \\ \text{sum16a} = 2 * (y_6 * y_7 * A6_7)$$

$$\text{sumA} = \text{sumii} + \text{sum10} + \text{sum11} + \text{sum12} + \text{sum13} + \text{sum14} + \text{sum15} + \text{sum16} \\ A = \text{sumA} * P / (R * T_{\text{deww}})^2$$

$$\text{sumB} = x_0 * b_0 + x_1 * b_1 + x_2 * b_2 + x_3 * b_3 + x_4 * b_4 + x_5 * b_5 + x_6 * b_6 + x_7 * b_7 \\ B = \text{sumB} * P / (R * T_{\text{deww}})$$

$$Z_{\text{liq}} = Z_{\text{I_PengRobinson}}(A, B)$$

$$\text{Fuliq0} = ((b_0 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A0_0 + x_1 * A0_1 + x_2 * A0_2 + x_3 * A0_3 + x_4 * A0_4 + x_5 * A0_5 + x_6 * A0_6 + x_7 * A0_7)) / \text{sumA}) - (b_0 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq1} = ((b_1 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A1_0 + x_1 * A1_1 + x_2 * A1_2 + x_3 * A1_3 + x_4 * A1_4 + x_5 * A1_5 + x_6 * A1_6 + x_7 * A1_7)) / \text{sumA}) - (b_1 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq2} = ((b_2 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A2_0 + x_1 * A2_1 + x_2 * A2_2 + x_3 * A2_3 + x_4 * A2_4 + x_5 * A2_5 + x_6 * A2_6 + x_7 * A2_7)) / \text{sumA}) - (b_2 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq3} = ((b_3 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A3_0 + x_1 * A3_1 + x_2 * A3_2 + x_3 * A3_3 + x_4 * A3_4 + x_5 * A3_5 + x_6 * A3_6 + x_7 * A3_7)) / \text{sumA}) - (b_3 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq4} = ((b_4 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A4_0 + x_1 * A4_1 + x_2 * A4_2 + x_3 * A4_3 + x_4 * A4_4 + x_5 * A4_5 + x_6 * A4_6 + x_7 * A4_7)) / \text{sumA}) - (b_4 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq5} = ((b_5 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A5_0 + x_1 * A5_1 + x_2 * A5_2 + x_3 * A5_3 + x_4 * A5_4 + x_5 * A5_5 + x_6 * A5_6 + x_7 * A5_7)) / \text{sumA}) - (b_5 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq6} = ((b_6 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A6_0 + x_1 * A6_1 + x_2 * A6_2 + x_3 * A6_3 + x_4 * A6_4 + x_5 * A6_5 + x_6 * A6_6 + x_7 * A6_7)) / \text{sumA}) - (b_6 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq7} = ((b_7 / \text{sumB}) * (Z_{\text{liq}} - 1)) - (\text{Log}(Z_{\text{liq}} - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A7_0 + x_1 * A7_1 + x_2 * A7_2 + x_3 * A7_3 + x_4 * A7_4 + x_5 * A7_5 + x_6 * A7_6 + x_7 * A7_7)) / \text{sumA}) - (b_7 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_{\text{liq}} + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_{\text{liq}} - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{fugl0} = \text{Exp}(\text{Fuliq0})$$

$$\text{fugl1} = \text{Exp}(\text{Fuliq1})$$

```

fugl2 = Exp(Fuliq2)
fugl3 = Exp(Fuliq3)
fugl4 = Exp(Fuliq4)
fugl5 = Exp(Fuliq5)
fugl6 = Exp(Fuliq6)
fugl7 = Exp(Fuliq7)

x_0 = fugv0 / fugl0 * y_0
x_1 = fugv1 / fugl1 * y_1
x_2 = fugv2 / fugl2 * y_2
x_3 = fugv3 / fugl3 * y_3
x_4 = fugv4 / fugl4 * y_4
x_5 = fugv5 / fugl5 * y_5
x_6 = fugv6 / fugl6 * y_6
x_7 = fugv7 / fugl7 * y_7

xi_0 = x_0
xi_1 = x_1
xi_2 = x_2
xi_3 = x_3
xi_4 = x_4
xi_5 = x_5
xi_6 = x_6
xi_7 = x_7

sumxi = xi_0 + xi_1 + xi_2 + xi_3 + xi_4 + xi_5 + xi_6 + xi_7

Next
Td = Tdeww
Loop Until (sumxi - 1) >= 0
ElseIf sumxi = 1 Then
Tdeww = Td
End If
Trocio = Tdeww - 273.15 ' °C
End Function

```

En el siguiente código de programación encontraremos el procedimiento propuesto para hallar el factor de compresibilidad usando el modelo termodinámico Peng Robinson.

Para encontrar el valor del factor de compresibilidad, se debe hallar la Presión de burbuja, Presión de rocío, y la Temperatura de burbuja de la misma manera en que se halló la Temperatura de rocío, por consiguiente en la siguiente codificación encontraremos los artificios creados para poder hallar el factor de compresibilidad.

Private Function Zg_PengRobinson(A, B)

'a2, a1, y a0 are cubic coefficients of the PR EoS

a2 = -(1 - B)

a1 = A - 2 * B - 3 * B ^ 2

a0 = -(A * B - B ^ 2 - B ^ 3)

q = ((a2 ^ 2) / 9) - (a1 / 3)

R = (a1 * a2 / 6) - (a0 / 2) - (a2 ^ 3 / 27)

M = (R ^ 2 - q ^ 3)

If M >= 0 Then

mm = Sqr(M)

mmm = Abs(R + mm)

mma = mmm ^ (1 / 3) * Abs(R + mm) / (R + mm)

mmmm = Abs(R - mm)

mmmb = mmmm ^ (1 / 3) * Abs(R - mm) / (R - mm)

Zg = -a2 / 3 + mma + mmmb

Else

t1 = R ^ 2 / q ^ 3

t2 = Sqr(1 - t1) / Sqr(t1) * R / Abs(R)

If Atn(t2) < 0 Then

Phi = Atn(t2) + 3.1415926

Else

Phi = Atn(t2)

End If

zz1 = 2 * Sqr(q) * Cos(Phi / 3) - a2 / 3

zz2 = 2 * Sqr(q) * Cos((Phi - 2 * 3.1415926) / 3) - a2 / 3

zz3 = 2 * Sqr(q) * Cos((Phi + 2 * 3.1415926) / 3) - a2 / 3

Zg = zz1

End If

Zg_PengRobinson = Zg

End Function

‘Se calculan todos los parámetros de interacción que evalúan el comportamiento de

todos los componentes

'K initial with Antoine Equation

```
Repi0 = Exp(Log(Pc_0) + Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_0) * (1 - Tc_0 / T)) / P
Repi1 = Exp(Log(Pc_1) + Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_1) * (1 - Tc_1 / T)) / P
Repi2 = Exp(Log(Pc_2) + Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_2) * (1 - Tc_2 / T)) / P
Repi3 = Exp(Log(Pc_3) + Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_3) * (1 - Tc_3 / T)) / P
Repi4 = Exp(Log(Pc_4) + Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_4) * (1 - Tc_4 / T)) / P
Repi5 = Exp(Log(Pc_5) + Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_5) * (1 - Tc_5 / T)) / P
Repi6 = Exp(Log(Pc_6) + Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_6) * (1 - Tc_6 / T)) / P
Repi7 = Exp(Log(Pc_7) + Log(10) * 7 / 3 * (1 + w_7) * (1 - Tc_7 / T)) / P
```

BubbleP = Pbubble(T, z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7)

DewP = Pdew(T, P, z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6, z_7)

If BubbleP < P Then 'First Conditional

fracV = 0

fracti = fracV

```
y_0 = Repi0 * z_0 / (fracti * (Repi0 - 1) + 1)
y_1 = Repi1 * z_1 / (fracti * (Repi1 - 1) + 1)
y_2 = Repi2 * z_2 / (fracti * (Repi2 - 1) + 1)
y_3 = Repi3 * z_3 / (fracti * (Repi3 - 1) + 1)
y_4 = Repi4 * z_4 / (fracti * (Repi4 - 1) + 1)
y_5 = Repi5 * z_5 / (fracti * (Repi5 - 1) + 1)
y_6 = Repi6 * z_6 / (fracti * (Repi6 - 1) + 1)
y_7 = Repi7 * z_7 / (fracti * (Repi7 - 1) + 1)
```

sumyi = y_0 + y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7

```
y_0 = y_0 / sumyi
y_1 = y_1 / sumyi
y_2 = y_2 / sumyi
y_3 = y_3 / sumyi
y_4 = y_4 / sumyi
y_5 = y_5 / sumyi
y_6 = y_6 / sumyi
y_7 = y_7 / sumyi
```

'Compresibity factor z vapor

'A calculation

```
sumiia = (y_0) ^ 2 * A0_0 + y_1 ^ 2 * A1_1 + y_2 ^ 2 * A2_2 + y_3 ^ 2 * A3_3 + y_4 ^ 2 *
* A4_4 + y_5 ^ 2 * A5_5 + y_6 ^ 2 * A6_6 + y_7 ^ 2 * A7_7 + y_8 ^ 2 * A8_8 + y_9 ^ 2 *
A9_9 + y_10 ^ 2 * A10_10 + y_11 ^ 2 * A11_11
```

```

sum10a = 2 * (y_0 * y_1 * A0_2 + y_0 * y_2 * A0_2 + y_0 * y_3 * A0_3 + y_0 * y_4 *
A0_4 + y_0 * y_5 * A0_5 + y_0 * y_6 * A0_6 + y_0 * y_7 * A0_7)
sum11a = 2 * (y_1 * y_2 * A1_2 + y_1 * y_3 * A1_3 + y_1 * y_4 * A1_4 + y_1 * y_5 *
A1_5 + y_1 * y_6 * A1_6 + y_1 * y_7 * A1_7)
sum12a = 2 * (y_2 * y_3 * A2_3 + y_2 * y_4 * A2_4 + y_2 * y_5 * A2_5 + y_2 * y_6 *
A2_6 + y_2 * y_7 * A2_7)
sum13a = 2 * (y_3 * y_4 * A3_4 + y_3 * y_5 * A3_5 + y_3 * y_6 * A3_6 + y_3 * y_7 *
A3_7)
sum14a = 2 * (y_4 * y_5 * A4_5 + y_4 * y_6 * A4_6 + y_4 * y_7 * A4_7)
sum15a = 2 * (y_5 * y_6 * A5_6 + y_5 * y_7 * A5_7)
sum16a = 2 * (y_6 * y_7 * A6_7)

```

```

sumAA = sumiia + sum10a + sum11a + sum12a + sum13a + sum14a + sum15a + sum16a
AA = sumAA * P / (R * T) ^ 2
sumBB = y_0 * b_0 + y_1 * b_1 + y_2 * b_2 + y_3 * b_3 + y_4 * b_4 + y_5 * b_5 + y_6 *
b_6 + y_7 * b_7
BB = sumBB * P / (R * T)

```

```

Z_vap = Zg_PengRobinson(AA, BB)
Elseif DewP > P Then 'Second Conditional
fracV = 1
fracti = fracV

```

```

y_0 = Repi0 * z_0 / (fracti * (Repi0 - 1) + 1)
y_1 = Repi1 * z_1 / (fracti * (Repi1 - 1) + 1)
y_2 = Repi2 * z_2 / (fracti * (Repi2 - 1) + 1)
y_3 = Repi3 * z_3 / (fracti * (Repi3 - 1) + 1)
y_4 = Repi4 * z_4 / (fracti * (Repi4 - 1) + 1)
y_5 = Repi5 * z_5 / (fracti * (Repi5 - 1) + 1)
y_6 = Repi6 * z_6 / (fracti * (Repi6 - 1) + 1)
y_7 = Repi7 * z_7 / (fracti * (Repi7 - 1) + 1)

```

```

sumyi = y_0 + y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7

```

```

y_0 = y_0 / sumyi
y_1 = y_1 / sumyi
y_2 = y_2 / sumyi
y_3 = y_3 / sumyi
y_4 = y_4 / sumyi
y_5 = y_5 / sumyi
y_6 = y_6 / sumyi
y_7 = y_7 / sumyi

```

```

'Compresibity factor z vapor

```

```

'A calculation

```

```

sumiia = (y_0) ^ 2 * A0_0 + y_1 ^ 2 * A1_1 + y_2 ^ 2 * A2_2 + y_3 ^ 2 * A3_3 + y_4 ^

```

```

2 * A4_4 + y_5 ^ 2 * A5_5 + y_6 ^ 2 * A6_6 + y_7 ^ 2 * A7_7
sum10a = 2 * (y_0 * y_1 * A0_2 + y_0 * y_2 * A0_2 + y_0 * y_3 * A0_3 + y_0 * y_4 *
A0_4 + y_0 * y_5 * A0_5 + y_0 * y_6 * A0_6 + y_0 * y_7 * A0_)
sum11a = 2 * (y_1 * y_2 * A1_2 + y_1 * y_3 * A1_3 + y_1 * y_4 * A1_4 + y_1 * y_5 *
A1_5 + y_1 * y_6 * A1_6 + y_1 * y_7 * A1_7)
sum12a = 2 * (y_2 * y_3 * A2_3 + y_2 * y_4 * A2_4 + y_2 * y_5 * A2_5 + y_2 * y_6 *
A2_6 + y_2 * y_7 * A2_)
sum13a = 2 * (y_3 * y_4 * A3_4 + y_3 * y_5 * A3_5 + y_3 * y_6 * A3_6 + y_3 * y_7 *
A3_7)
sum14a = 2 * (y_4 * y_5 * A4_5 + y_4 * y_6 * A4_6 + y_4 * y_7 * A4_7)
sum15a = 2 * (y_5 * y_6 * A5_6 + y_5 * y_7 * A5_7)
sum16a = 2 * (y_6 * y_7 * A6_7)

sumAA = sumiia + sum10a + sum11a + sum12a + sum13a + sum14a + sum15a + sum16a
AA = sumAA * P / (R * T) ^ 2
sumBB = y_0 * b_0 + y_1 * b_1 + y_2 * b_2 + y_3 * b_3 + y_4 * b_4 + y_5 * b_5 + y_6 *
b_6 + y_7 * b_7
BB = sumBB * P / (R * T)

Z_vap = Zg_PengRobinson(AA, BB)
Else 'Third Conditional
fracV = (BubbleP - P) / (BubbleP - DewP)
errorV =
For I = 1 To 25
emin = 0.00001
cont = 0
Do

M = (Repi0 - 1) * z_0 / (fracV * (Repi0 - 1) + 1) + (Repi1 - 1) * z_1 / (fracV * (Repi1 - 1) +
1) + (Repi2 - 1) * z_2 / (fracV * (Repi2 - 1) + 1) + (Repi3 - 1) * z_3 / (fracV * (Repi3 - 1) + 1)
+ (Repi4 - 1) * z_4 / (fracV * (Repi4 - 1) + 1) + (Repi5 - 1) * z_5 / (fracV * (Repi5 - 1) + 1) +
(Repi6 - 1) * z_6 / (fracV * (Repi6 - 1) + 1) + (Repi7 - 1) * z_7 / (fracV * (Repi7 - 1) + 1)

Mder = -(Repi0 - 1) ^ 2 * z_0 / ((fracV * (Repi0 - 1) + 1) ^ 2) - (Repi1 - 1) ^ 2 * z_1 / ((fracV
* (Repi1 - 1) + 1) ^ 2) - (Repi2 - 1) ^ 2 * z_2 / ((fracV * (Repi2 - 1) + 1) ^ 2) - (Repi3 - 1) ^ 2
* z_3 / ((fracV * (Repi3 - 1) + 1) ^ 2) - (Repi4 - 1) ^ 2 * z_4 / ((fracV * (Repi4 - 1) + 1) ^ 2) -
(Repi5 - 1) ^ 2 * z_5 / ((fracV * (Repi5 - 1) + 1) ^ 2) - (Repi6 - 1) ^ 2 * z_6 / ((fracV * (Repi6
- 1) + 1) ^ 2) - (Repi7 - 1) ^ 2 * z_7 / ((fracV * (Repi7 - 1) + 1) ^ 2)

frac = fracV - M / Mder
errorV = Abs(frac - fracV)
fracV = frac
cont = cont + 1
Loop Until Math.Abs(errorV) <= emin Or cont = 1000

fracti = frac
If fracti < 0 Then

```

```

fracti = 0
ElseIf fracti > 1 Then
fracti = 1
End If

```

```

x_0 = z_0 / (fracti * (Repi0 - 1) + 1)
x_1 = z_1 / (fracti * (Repi1 - 1) + 1)
x_2 = z_2 / (fracti * (Repi2 - 1) + 1)
x_3 = z_3 / (fracti * (Repi3 - 1) + 1)
x_4 = z_4 / (fracti * (Repi4 - 1) + 1)
x_5 = z_5 / (fracti * (Repi5 - 1) + 1)
x_6 = z_6 / (fracti * (Repi6 - 1) + 1)
x_7 = z_7 / (fracti * (Repi7 - 1) + 1)

```

```

sumxi = x_0 + x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + x_7

```

```

x_0 = x_0 / sumxi
x_1 = x_1 / sumxi
x_2 = x_2 / sumxi
x_3 = x_3 / sumxi
x_4 = x_4 / sumxi
x_5 = x_5 / sumxi
x_6 = x_6 / sumxi
x_7 = x_7 / sumxi

```

```

y_0 = Repi0 * x_0
y_1 = Repi1 * x_1
y_2 = Repi2 * x_2
y_3 = Repi3 * x_3
y_4 = Repi4 * x_4
y_5 = Repi5 * x_5
y_6 = Repi6 * x_6
y_7 = Repi7 * x_7

```

```

sumyi = y_0 + y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6 + y_7

```

```

y_0 = y_0 / sumyi
y_1 = y_1 / sumyi
y_2 = y_2 / sumyi
y_3 = y_3 / sumyi
y_4 = y_4 / sumyi
y_5 = y_5 / sumyi
y_6 = y_6 / sumyi
y_7 = y_7 / sumyi

```

'Compresibity factor z liquid

$$\begin{aligned} \text{sumii} &= (x_0)^2 * A0_0 + x_1^2 * A1_1 + x_2^2 * A2_2 + x_3^2 * A3_3 + x_4^2 * A4_4 + x_5^2 * A5_5 + x_6^2 * A6_6 + x_7^2 * A7_7 \\ \text{suml0} &= 2 * (x_0 * x_1 * A0_1 + x_0 * x_2 * A0_2 + x_0 * x_3 * A0_3 + x_0 * x_4 * A0_4 + x_0 * x_5 * A0_5 + x_0 * x_6 * A0_6 + x_0 * x_7 * A0_7) \\ \text{suml1} &= 2 * (x_1 * x_2 * A1_2 + x_1 * x_3 * A1_3 + x_1 * x_4 * A1_4 + x_1 * x_5 * A1_5 + x_1 * x_6 * A1_6 + x_1 * x_7 * A1_7) \\ \text{suml2} &= 2 * (x_2 * x_3 * A2_3 + x_2 * x_4 * A2_4 + x_2 * x_5 * A2_5 + x_2 * x_6 * A2_6 + x_2 * x_7 * A2_7) \\ \text{suml3} &= 2 * (x_3 * x_4 * A3_4 + x_3 * x_5 * A3_5 + x_3 * x_6 * A3_6 + x_3 * x_7 * A3_7) \\ \text{suml4} &= 2 * (x_4 * x_5 * A4_5 + x_4 * x_6 * A4_6 + x_4 * x_7 * A4_7) \\ \text{suml5} &= 2 * (x_5 * x_6 * A5_6 + x_5 * x_7 * A5_7) \\ \text{suml6} &= 2 * (x_6 * x_7 * A6_7) \\ \text{sumA} &= \text{sumii} + \text{suml0} + \text{suml1} + \text{suml2} + \text{suml3} + \text{suml4} + \text{suml5} + \text{suml6} \\ A &= \text{sumA} * P / (R * T)^2 \\ \text{sumB} &= x_0 * b_0 + x_1 * b_1 + x_2 * b_2 + x_3 * b_3 + x_4 * b_4 + x_5 * b_5 + x_6 * b_6 + x_7 * b_7 \\ B &= \text{sumB} * P / (R * T) \end{aligned}$$

'Compresibity factor z vapor

```

sumiia = (y_0)^2 * A0_0 + y_1^2 * A1_1 + y_2^2 * A2_2 + y_3^2 * A3_3 + y_4^2 * A4_4 + y_5^2 * A5_5 + y_6^2 * A6_6 + y_7^2 * A7_7
sum10a = 2 * (y_0 * y_1 * A0_2 + y_0 * y_2 * A0_2 + y_0 * y_3 * A0_3 + y_0 * y_4 * A0_4 + y_0 * y_5 * A0_5 + y_0 * y_6 * A0_6 + y_0 * y_7 * A0_7)
sum11a = 2 * (y_1 * y_2 * A1_2 + y_1 * y_3 * A1_3 + y_1 * y_4 * A1_4 + y_1 * y_5 * A1_5 + y_1 * y_6 * A1_6 + y_1 * y_7 * A1_7)
sum12a = 2 * (y_2 * y_3 * A2_3 + y_2 * y_4 * A2_4 + y_2 * y_5 * A2_5 + y_2 * y_6 * A2_6 + y_2 * y_7 * A2_7)
sum13a = 2 * (y_3 * y_4 * A3_4 + y_3 * y_5 * A3_5 + y_3 * y_6 * A3_6 + y_3 * y_7 * A3_7)
sum14a = 2 * (y_4 * y_5 * A4_5 + y_4 * y_6 * A4_6 + y_4 * y_7 * A4_7)
sum15a = 2 * (y_5 * y_6 * A5_6 + y_5 * y_7 * A5_7)
sum16a = 2 * (y_6 * y_7 * A6_7)
sumAA = sumiia + sum10a + sum11a + sum12a + sum13a + sum14a + sum15a + sum16a
AA = sumAA * P / (R * T)^2
'B calculation
sumBB = y_0 * b_0 + y_1 * b_1 + y_2 * b_2 + y_3 * b_3 + y_4 * b_4 + y_5 * b_5 + y_6 * b_6 + y_7 * b_7
BB = sumBB * P / (R * T)
Z_vap = Zg_PengRobinson(AA, BB)
'fugacidades liquid
Fuliq0 = ((b_0 / sumB) * (Z_liq - 1)) - (Log(Z_liq - B)) - 1 / (2^1.5) * (A / B) * (((2 * (x_0 *

```

$$A0_0 + x_1 * A0_1 + x_2 * A0_2 + x_3 * A0_3 + x_4 * A0_4 + x_5 * A0_5 + x_6 * A0_6 + x_7 * A0_7)) * \text{Log}((Z_liq + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_liq - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq1} = ((b_1 / \text{sumB}) * (Z_liq - 1)) - (\text{Log}(Z_liq - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A1_0 + x_1 * A1_1 + x_2 * A1_2 + x_3 * A1_3 + x_4 * A1_4 + x_5 * A1_5 + x_6 * A1_6 + x_7 * A1_7)) / \text{sumA}) - (b_1 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_liq + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_liq - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq2} = ((b_2 / \text{sumB}) * (Z_liq - 1)) - (\text{Log}(Z_liq - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A2_0 + x_1 * A2_1 + x_2 * A2_2 + x_3 * A2_3 + x_4 * A2_4 + x_5 * A2_5 + x_6 * A2_6 + x_7 * A2_7)) / \text{sumA}) - (b_2 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_liq + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_liq - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq3} = ((b_3 / \text{sumB}) * (Z_liq - 1)) - (\text{Log}(Z_liq - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A3_0 + x_1 * A3_1 + x_2 * A3_2 + x_3 * A3_3 + x_4 * A3_4 + x_5 * A3_5 + x_6 * A3_6 + x_7 * A3_7)) / \text{sumA}) - (b_3 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_liq + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_liq - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq4} = ((b_4 / \text{sumB}) * (Z_liq - 1)) - (\text{Log}(Z_liq - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A4_0 + x_1 * A4_1 + x_2 * A4_2 + x_3 * A4_3 + x_4 * A4_4 + x_5 * A4_5 + x_6 * A4_6 + x_7 * A4_7)) / \text{sumA}) - (b_4 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_liq + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_liq - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq5} = ((b_5 / \text{sumB}) * (Z_liq - 1)) - (\text{Log}(Z_liq - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A5_0 + x_1 * A5_1 + x_2 * A5_2 + x_3 * A5_3 + x_4 * A5_4 + x_5 * A5_5 + x_6 * A5_6 + x_7 * A5_7)) / \text{sumA}) - (b_5 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_liq + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_liq - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq6} = ((b_6 / \text{sumB}) * (Z_liq - 1)) - (\text{Log}(Z_liq - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A6_0 + x_1 * A6_1 + x_2 * A6_2 + x_3 * A6_3 + x_4 * A6_4 + x_5 * A6_5 + x_6 * A6_6 + x_7 * A6_7)) / \text{sumA}) - (b_6 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_liq + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_liq - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{Fuliq7} = ((b_7 / \text{sumB}) * (Z_liq - 1)) - (\text{Log}(Z_liq - B)) - 1 / (2^{1.5}) * (A / B) * (((2 * (x_0 * A7_0 + x_1 * A7_1 + x_2 * A7_2 + x_3 * A7_3 + x_4 * A7_4 + x_5 * A7_5 + x_6 * A7_6 + x_7 * A7_7)) / \text{sumA}) - (b_7 / \text{sumB})) * \text{Log}((Z_liq + (2^{0.5} + 1) * B) / (Z_liq - (2^{0.5} - 1) * B))$$

$$\text{fugl0} = \text{Exp}(\text{Fuliq0})$$

$$\text{fugl1} = \text{Exp}(\text{Fuliq1})$$

$$\text{fugl2} = \text{Exp}(\text{Fuliq2})$$

$$\text{fugl3} = \text{Exp}(\text{Fuliq3})$$

$$\text{fugl4} = \text{Exp}(\text{Fuliq4})$$

$$\text{fugl5} = \text{Exp}(\text{Fuliq5})$$

$$\text{fugl6} = \text{Exp}(\text{Fuliq6})$$

$$\text{fugl7} = \text{Exp}(\text{Fuliq7})$$

$$\text{Fuvap0} = ((b_0 / \text{sumBB}) * (Z_vap - 1)) - (\text{Log}(Z_vap - BB)) - 1 / (2^{1.5}) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A0_0 + y_1 * A0_1 + y_2 * A0_2 + y_3 * A0_3 + y_4 * A0_4 + y_5 * A0_5 + y_6 * A0_6 + y_7 * A0_7)) / \text{sumAA}) - (b_0 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_vap + (2^{0.5} + 1) * BB) / (Z_vap - (2^{0.5} - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap1} = ((b_1 / \text{sumBB}) * (Z_vap - 1)) - (\text{Log}(Z_vap - BB)) - 1 / (2^{1.5}) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A1_0 + y_1 * A1_1 + y_2 * A1_2 + y_3 * A1_3 + y_4 * A1_4 + y_5 * A1_5 + y_6 * A1_6 + y_7 * A1_7)) / \text{sumAA}) - (b_1 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_vap + (2^{0.5} + 1) * BB) / (Z_vap - (2^{0.5} - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap2} = ((b_2 / \text{sumBB}) * (Z_vap - 1)) - (\text{Log}(Z_vap - BB)) - 1 / (2 \wedge 1.5) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A2_0 + y_1 * A2_1 + y_2 * A2_2 + y_3 * A2_3 + y_4 * A2_4 + y_5 * A2_5 + y_6 * A2_6 + y_7 * A2_7)) / \text{sumAA}) - (b_2 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_vap + (2 \wedge 0.5 + 1) * BB) / (Z_vap - (2 \wedge 0.5 - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap3} = ((b_3 / \text{sumBB}) * (Z_vap - 1)) - (\text{Log}(Z_vap - BB)) - 1 / (2 \wedge 1.5) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A3_0 + y_1 * A3_1 + y_2 * A3_2 + y_3 * A3_3 + y_4 * A3_4 + y_5 * A3_5 + y_6 * A3_6 + y_7 * A3_7)) / \text{sumAA}) - (b_3 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_vap + (2 \wedge 0.5 + 1) * BB) / (Z_vap - (2 \wedge 0.5 - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap4} = ((b_4 / \text{sumBB}) * (Z_vap - 1)) - (\text{Log}(Z_vap - BB)) - 1 / (2 \wedge 1.5) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A4_0 + y_1 * A4_1 + y_2 * A4_2 + y_3 * A4_3 + y_4 * A4_4 + y_5 * A4_5 + y_6 * A4_6 + y_7 * A4_7)) / \text{sumAA}) - (b_4 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_vap + (2 \wedge 0.5 + 1) * BB) / (Z_vap - (2 \wedge 0.5 - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap5} = ((b_5 / \text{sumBB}) * (Z_vap - 1)) - (\text{Log}(Z_vap - BB)) - 1 / (2 \wedge 1.5) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A5_0 + y_1 * A5_1 + y_2 * A5_2 + y_3 * A5_3 + y_4 * A5_4 + y_5 * A5_5 + y_6 * A5_6 + y_7 * A5_7)) / \text{sumAA}) - (b_5 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_vap + (2 \wedge 0.5 + 1) * BB) / (Z_vap - (2 \wedge 0.5 - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap6} = ((b_6 / \text{sumBB}) * (Z_vap - 1)) - (\text{Log}(Z_vap - BB)) - 1 / (2 \wedge 1.5) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A6_0 + y_1 * A6_1 + y_2 * A6_2 + y_3 * A6_3 + y_4 * A6_4 + y_5 * A6_5 + y_6 * A6_6 + y_7 * A6_7)) / \text{sumAA}) - (b_6 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_vap + (2 \wedge 0.5 + 1) * BB) / (Z_vap - (2 \wedge 0.5 - 1) * BB))$$

$$\text{Fuvap7} = ((b_7 / \text{sumBB}) * (Z_vap - 1)) - (\text{Log}(Z_vap - BB)) - 1 / (2 \wedge 1.5) * (AA / BB) * (((2 * (y_0 * A7_0 + y_1 * A7_1 + y_2 * A7_2 + y_3 * A7_3 + y_4 * A7_4 + y_5 * A7_5 + y_6 * A7_6 + y_7 * A7_7)) / \text{sumAA}) - (b_7 / \text{sumBB})) * \text{Log}((Z_vap + (2 \wedge 0.5 + 1) * BB) / (Z_vap - (2 \wedge 0.5 - 1) * BB))$$

$$\text{fugv0} = \text{Exp}(\text{Fuvap0})$$

$$\text{fugv1} = \text{Exp}(\text{Fuvap1})$$

$$\text{fugv2} = \text{Exp}(\text{Fuvap2})$$

$$\text{fugv3} = \text{Exp}(\text{Fuvap3})$$

$$\text{fugv4} = \text{Exp}(\text{Fuvap4})$$

$$\text{fugv5} = \text{Exp}(\text{Fuvap5})$$

$$\text{fugv6} = \text{Exp}(\text{Fuvap6})$$

$$\text{fugv7} = \text{Exp}(\text{Fuvap7})$$

$$\text{Repn0} = \text{fugl0} / \text{fugv0}$$

$$\text{Repn1} = \text{fugl1} / \text{fugv1}$$

$$\text{Repn2} = \text{fugl2} / \text{fugv2}$$

$$\text{Repn3} = \text{fugl3} / \text{fugv3}$$

$$\text{Repn4} = \text{fugl4} / \text{fugv4}$$

$$\text{Repn5} = \text{fugl5} / \text{fugv5}$$

$$\text{Repn6} = \text{fugl6} / \text{fugv6}$$

$$\text{Repn7} = \text{fugl7} / \text{fugv7}$$

$$\text{Repi0} = \text{Repn0}$$

$$\text{Repi1} = \text{Repn1}$$

$$\text{Repi2} = \text{Repn2}$$

$$\text{Repi3} = \text{Repn3}$$

```
Repi4 = Repn4  
Repi5 = Repn5  
Repi6 = Repn6  
Repi7 = Repn7
```

```
Next  
End If  
Zv_PR = Z_vap  
End Function
```

En la presente investigación, se ha determinado que dada las condiciones ambientales y operativas consideradas, es imposible alcanzar la temperatura de rocío que se ha hallado en los resultados. Por lo tanto, no hay posibilidad de formación de líquidos en el sistema y solo es necesario el cálculo del factor de compresibilidad para la fase vapor.

A continuación se presentan el diagrama de flujo para el cálculo del poder calorífico

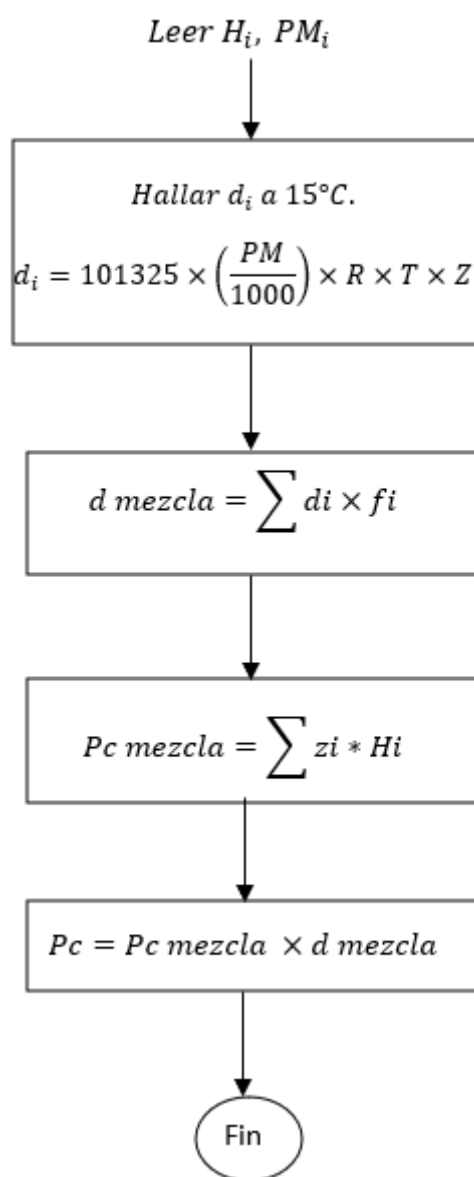


Figura 33

Diagrama de flujo para el cálculo del poder calorífico

En el siguiente código de programación encontraremos el procedimiento propuesto para hallar el Poder calorífico a condiciones estándar usando el modelo el factor de compresibilidad obtenido mediante el modelo termodinámico Peng Robinson

Public Function Pc(z, z0, z1, z2, z3, z4, z5, z6, z7)

'Poder calorifico AGA 5 de cada componente en Mj/Kg

'fraccion molar

$$y0 = z0$$

$$y1 = z1$$

$$y2 = z2$$

$$y3 = z3$$

$$y4 = z4$$

$$y5 = z5$$

$$y6 = z6$$

$$y7 = z7$$

'(mj/kg)

$$H0 = 142.183$$

$$H1 = 55.661$$

$$H2 = 52.024$$

$$H3 = 50.434$$

$$H4 = 49.451$$

$$H5 = 49.608$$

$$H6 = 0$$

$$H7 = 0$$

'(g/mol)

$$PM0 = 2.016$$

$$PM1 = 16.04$$

$$PM2 = 30.07$$

$$PM3 = 44.1$$

$$PM4 = 58.12$$

$$PM5 = 58.12$$

$$PM6 = 28.01$$

$$PM7 = 44.01$$

Denominador de fracciones másicas (g/mol)

$$\text{Denominator} = y0 * PM0 + y1 * PM1 + y2 * PM2 + y3 * PM3 + y4 * PM4 + y5 * PM5 + y6 * PM6 + y7 * PM7$$

Cálculo de las fracciones másicas

'fracción molar

'fm= (g/mol/g/mol)

$$fm0 = y0 * PM0 / \text{Denominator}$$

$$fm1 = y1 * PM1 / \text{Denominator}$$

```

fm2 = y2 * PM2 / Denominator
fm3 = y3 * PM3 / Denominator
fm4 = y4 * PM4 / Denominator
fm5 = y5 * PM5 / Denominator
fm6 = y6 * PM6 / Denominator
fm7 = y7 * PM7 / Denominator

```

'Cálculo de poder calorífico

'Pcalorificomezcla =adimensional *mj/kg

Pcalorificomezcla = fm0 * H0 + fm1 * H1 + fm2 * H2 + fm3 * H3 + fm4 * H4 + fm5 * H5 + fm6 * H6 + fm7 * H7

'(Mj/kg)

'densidad de los componentes (kg/m3) (0°c y 1 Atm)

' (Pa*kg/kmol*(kmol/1000mol))/((Pa*m3/mol*K)*K)

```

d0 = 101325 * (PM0 / 1000) / (8.314 * (273.15 + 15.5) * z)
d1 = 101325 * (PM1 / 1000) / (8.314 * (273.15 + 15.5) * z)
d2 = 101325 * (PM2 / 1000) / (8.314 * (273.15 + 15.5) * z)
d3 = 101325 * (PM3 / 1000) / (8.314 * (273.15 + 15.5) * z)
d4 = 101325 * (PM4 / 1000) / (8.314 * (273.15 + 15.5) * z)
d5 = 101325 * (PM5 / 1000) / (8.314 * (273.15 + 15.5) * z)
d6 = 101325 * (PM6 / 1000) / (8.314 * (273.15 + 15.5) * z)
d7 = 101325 * (PM7 / 1000) / (8.314 * (273.15 + 15.5) * z)

```

'Cálculo de la densidad de la mezcla

Dmezcla = y0 * d0 + y1 * d1 + y2 * d2 + y3 * d3 + y4 * d4 + y5 * d5 + y6 * d6 + y7 * d7
'(kg/m3)

Pcmezcla = Pcalorificomezcla * Dmezcla

' (mj/kg*kg/m3)

'(mj/m3)

Pcmezcla = Pcmezcla * 239.005736

'(kcal/m3)

Pc = Pcmezcla

End Function

Para el cálculo de la temperatura de rocío se insertó parámetros de fracción de vapor y presión. El resultado de temperatura de rocío, es ubicado en la sección de condiciones de la corriente 'Estación de medición Etevensa' como se puede apreciar en la siguiente imagen.

Stream Name	Estación de medición	Vapour Phase	Liquid Phase
Vapour/Liq Phase Fraction	1.0000	1.0000	0.0000
Temperature [C]	-67.31	-67.31	-67.31
Pressure [bar.g]	26.91	26.91	26.91
Molar Flow [MMSCFD]	138.2	138.2	0.0000
Mass Flow [tonne/h]	100.0	100.0	0.0000
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	349.6	349.6	0.0000
Molar Enthalpy [MJ/kgmole]	-64.83	-64.83	-106.6
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	135.9	135.9	98.85
Heat Flow [MJ/h]	-4.462e+005	-4.462e+005	0.0000
Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	1.625e+005	1.625e+005	0.0000
Fluid Package	Basis-2		

Figura 34

Cálculo de temperatura de rocío en Aspen Hysys

Para el cálculo del factor de compresibilidad se insertó parámetros de temperatura, presión y composición. El resultado es el factor de compresibilidad, ubicado en la sección propiedades de la corriente Estación de medición Etevensa como se puede apreciar en la siguiente imagen.

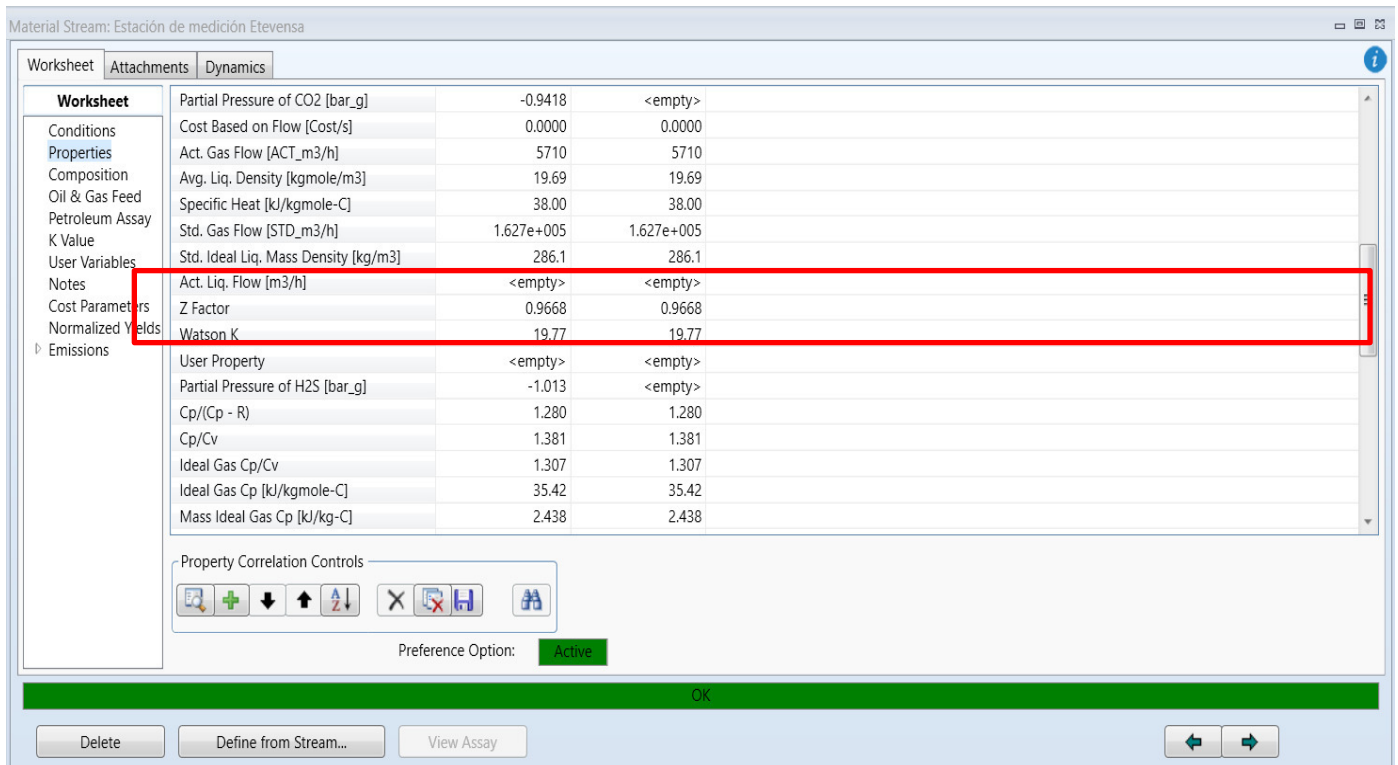


Figura 35

Cálculo de Z en Aspen Hysys

En el caso del cálculo del poder calorífico, se usó la propiedad del factor de compresibilidad hallado por el método SRK y se usó el código de programación de Visual Basic para encontrar el resultado.

En la siguiente **Tabla 18**, se puede visualizar los resultados obtenidos mediante los dos modelos termodinámicos en el punto de recepción de la estación Etevensa

Tabla 18*Resultados de Z, T rocío, Pc de acuerdo con la fracción molar de H₂*

Fracción molar		Peng Robinson			Soave-Redlich Kwong		
Nº	H ₂	Z	T rocío (°C)	Poder calorífico (Kcal/m3)	Z	Trocío (°C)	Poder calorífico (Kcal/m3)
1	0.0000	0.9220	-63.17	10,368	0.9362	-62.76	10,211
2	0.0200	0.9432	-63.26	9,994	0.9397	-63.20	10,030
3	0.0400	0.9497	-63.40	9,785	0.9432	-63.64	9,852
4	0.0600	0.9554	-63.54	9,587	0.9465	-64.09	9,676
5	0.0800	0.9604	-63.68	9,398	0.9498	-64.54	9,503
6	0.1000	0.9649	-63.87	9,216	0.9530	-64.98	9,331
7	0.1200	0.9689	-64.11	9,040	0.9561	-65.44	9,162
8	0.1400	0.9725	-64.35	8,870	0.9591	-65.90	8,994
9	0.1600	0.9758	-64.59	8,703	0.9620	-66.37	8,828
10	0.1800	0.9787	-64.93	8,541	0.9648	-66.84	8,664
11	0.2000	0.9814	-65.32	8,382	0.9676	-67.31	8,502
12	0.0000	0.9217	-63.09	10,371	0.9359	-62.70	10,214
13	0.0200	0.9430	-63.18	9,996	0.9395	-63.14	10,033
14	0.0400	0.9495	-63.32	9,787	0.9429	-63.58	9,855
15	0.0600	0.9552	-63.46	9,589	0.9463	-64.03	9,679
16	0.0800	0.9603	-63.66	9,399	0.9496	-64.47	9,505
17	0.1000	0.9648	-63.80	9,217	0.9528	-64.92	9,333

18	0.1200	0.9688	-64.04	9,041	0.9559	-65.38	9,163
19	0.1400	0.9724	-64.28	8,871	0.9589	-65.84	8,995
20	0.1600	0.9757	-64.52	8,704	0.9618	-66.31	8,829
21	0.1800	0.9786	-64.87	8,542	0.9647	-66.78	8,665
22	0.2000	0.9813	-65.26	8,383	0.9674	-67.25	8,503
23	0.0000	0.9214	-63.06	10,375	0.9356	-62.64	10,217
24	0.0200	0.9427	-63.15	9,998	0.9392	-63.08	10,036
25	0.0400	0.9493	-63.24	9,789	0.9427	-63.52	9,857
26	0.0600	0.9550	-63.39	9,591	0.9461	-63.97	9,681
27	0.0800	0.9601	-63.58	9,401	0.9494	-64.41	9,507
28	0.1000	0.9646	-63.73	9,219	0.9526	-64.86	9,335
29	0.1200	0.9687	-63.97	9,042	0.9557	-65.32	9,165
30	0.1400	0.9723	-64.21	8,872	0.9588	-65.78	8,997
31	0.1600	0.9756	-64.46	8,705	0.9617	-66.25	8,831
32	0.1800	0.9785	-64.80	8,543	0.9645	-66.72	8,667
33	0.2000	0.9812	-65.19	8,383	0.9673	-67.19	8,504
34	0.0000	0.9237	-63.17	10,349	0.9377	-62.76	10,194
35	0.0200	0.9443	-63.26	9,982	0.9412	-63.20	10,015
36	0.0400	0.9506	-63.40	9,776	0.9446	-63.64	9,838
37	0.0600	0.9561	-63.54	9,580	0.9479	-64.09	9,663
38	0.0800	0.9610	-63.68	9,392	0.9511	-64.54	9,490
39	0.1000	0.9654	-63.87	9,211	0.9542	-64.98	9,319
40	0.1200	0.9693	-64.11	9,037	0.9572	-65.44	9,151

41	0.1400	0.9728	-64.35	8,867	0.9602	-65.90	8,984
42	0.1600	0.9760	-64.59	8,701	0.9630	-66.37	8,818
43	0.1800	0.9789	-64.93	8,539	0.9658	-66.84	8,655
44	0.2000	0.9815	-65.32	8,381	0.9685	-67.31	8,493
45	0.0000	0.9233	-63.09	10,353	0.9374	-62.70	10,197
46	0.0200	0.9441	-63.18	9,985	0.9409	-63.14	10,017
47	0.0400	0.9504	-63.32	9,778	0.9444	-63.58	9,840
48	0.0600	0.9559	-63.46	9,582	0.9477	-64.03	9,665
49	0.0800	0.9609	-63.66	9,394	0.9509	-64.47	9,492
50	0.1000	0.9652	-63.80	9,213	0.9540	-64.92	9,321
51	0.1200	0.9692	-64.04	9,038	0.9571	-65.38	9,152
52	0.1400	0.9727	-64.28	8,868	0.9600	-65.84	8,985
53	0.1600	0.9759	-64.52	8,702	0.9629	-66.31	8,820
54	0.1800	0.9788	-64.87	8,540	0.9657	-66.78	8,656
55	0.2000	0.9815	-65.26	8,381	0.9684	-67.25	8,494
56	0.0000	0.9230	-63.06	10,356	0.9372	-62.64	10,200
57	0.0200	0.9438	-63.15	9,987	0.9407	-63.08	10,020
58	0.0400	0.9502	-63.24	9,780	0.9441	-63.52	9,843
59	0.0600	0.9557	-63.39	9,583	0.9475	-63.97	9,667
60	0.0800	0.9607	-63.58	9,395	0.9507	-64.41	9,494
61	0.1000	0.9651	-63.73	9,214	0.9538	-64.86	9,323
62	0.1200	0.9691	-63.97	9,039	0.9569	-65.32	9,154
63	0.1400	0.9726	-64.21	8,869	0.9599	-65.78	8,987

64	0.1600	0.9758	-64.46	8,703	0.9627	-66.25	8,821
65	0.1800	0.9788	-64.80	8,541	0.9655	-66.72	8,658
66	0.2000	0.9814	-65.19	8,382	0.9683	-67.19	8,496
67	0.0000	0.9253	-63.17	10,331	0.9392	-62.76	10,178
68	0.0200	0.9453	-63.26	9,971	0.9426	-63.20	10,000
69	0.0400	0.9514	-63.40	9,767	0.9459	-63.64	9,824
70	0.0600	0.9568	-63.54	9,573	0.9492	-64.09	9,650
71	0.0800	0.9616	-63.68	9,387	0.9523	-64.54	9,478
72	0.1000	0.9659	-63.87	9,207	0.9554	-64.98	9,308
73	0.1200	0.9697	-64.11	9,033	0.9584	-65.44	9,140
74	0.1400	0.9731	-64.35	8,864	0.9613	-65.90	8,974
75	0.1600	0.9763	-64.59	8,699	0.9641	-66.37	8,809
76	0.1800	0.9791	-64.93	8,538	0.9668	-66.84	8,646
77	0.2000	0.9817	-65.32	8,379	0.9694	-67.31	8,485
78	0.0000	0.9250	-63.09	10,335	0.9389	-62.70	10,181
79	0.0200	0.9451	-63.18	9,973	0.9424	-63.14	10,002
80	0.0400	0.9512	-63.32	9,769	0.9457	-63.58	9,826
81	0.0600	0.9566	-63.46	9,575	0.9490	-64.03	9,652
82	0.0800	0.9614	-63.66	9,388	0.9521	-64.47	9,480
83	0.1000	0.9657	-63.80	9,208	0.9552	-64.92	9,310
84	0.1200	0.9696	-64.04	9,034	0.9582	-65.38	9,141
85	0.1400	0.9730	-64.28	8,865	0.9611	-65.84	8,975
86	0.1600	0.9762	-64.52	8,700	0.9639	-66.31	8,810

87	0.1800	0.9790	-64.87	8,538	0.9667	-66.78	8,648
88	0.2000	0.9816	-65.26	8,380	0.9693	-67.25	8,486
89	0.0000	0.9246	-63.06	10,338	0.9387	-62.64	10,184
90	0.0200	0.9449	-63.15	9,976	0.9421	-63.08	10,005
91	0.0400	0.9510	-63.24	9,771	0.9455	-63.52	9,828
92	0.0600	0.9565	-63.39	9,576	0.9488	-63.97	9,654
93	0.0800	0.9613	-63.58	9,389	0.9519	-64.41	9,482
94	0.1000	0.9656	-63.73	9,209	0.9550	-64.86	9,311
95	0.1200	0.9695	-63.97	9,035	0.9580	-65.32	9,143
96	0.1400	0.9729	-64.21	8,866	0.9609	-65.78	8,976
97	0.1600	0.9761	-64.46	8,701	0.9638	-66.25	8,812
98	0.1800	0.9790	-64.80	8,539	0.9665	-66.72	8,649
99	0.2000	0.9816	-65.19	8,380	0.9692	-67.19	8,487

Análisis estadístico para la aceptación de las hipótesis, mediante el cálculo de nivel de significancia. Se tiene como propuesta que el nivel de confianza será del 95% por lo tanto el valor de z es igual a 1.96

Tabla 19*Resultados del Análisis estadístico de Peng Robinson*

	Media	Desviación estándar	Margen de error	 t 	p
Factor de compresibilidad	0.96163	0.01667	0.00328	30.11	2.20×10^{-16}
Temperatura de rocío (°C)	-63.95348	0.68170	0.13429	46.53	2.20×10^{-16}
Poder calorífico (Kcal/m ³)	9257.482	599.7845	118.15000	95.70	2.20×10^{-16}

Con el propósito de verificar la fiabilidad de los resultados mediante programación en Visual Basic, se realizó la comparación con los resultados del programa Aspen Hysys con el mismo método Peng Robinson ubicado en la **Tabla 20**.

Tabla 20

Comparación de porcentajes de error entre resultados por Visual Basic y Hysys para el método Peng Robinson

Z	%error	T rocío (°C)	%error	Poder	
				calorífico	%error
				(Kcal/m3)	
0.92202779	0.00%	-63.1871454	0.03%	10367.6246	0.00%
0.92547259	-1.88%	-63.6461864	0.61%	10184.9633	1.92%
0.9288527	-2.19%	-64.1255083	1.15%	10004.3534	2.24%
0.93212923	-2.43%	-64.5980826	1.67%	9826.14496	2.49%
0.93533774	-2.61%	-65.0736603	2.19%	9649.88677	2.68%
0.93844038	-2.74%	-65.5527737	2.63%	9475.90261	2.82%
0.94150033	-2.83%	-66.0359534	3.00%	9303.48691	2.91%
0.94445335	-2.89%	-66.5237251	3.38%	9133.22215	2.97%
0.94733673	-2.91%	-67.0166178	3.76%	8964.67792	3.00%
0.95016788	-2.92%	-67.5127055	3.98%	8797.64	3.00%
0.95289422	-2.90%	-68.0173685	4.13%	8632.54401	2.99%
0.92170541	0.00%	-63.1245903	0.06%	10371.2508	0.00%
0.92516568	-1.89%	-63.5840305	0.64%	10188.3419	1.92%
0.92856087	-2.20%	-64.0637454	1.17%	10007.4975	2.25%
0.93185194	-2.44%	-64.536689	1.69%	9829.06897	2.51%
0.93507458	-2.62%	-65.0126206	2.13%	9652.60253	2.69%

0.93819081	-2.76%	-65.4920754	2.66%	9478.42329	2.83%
0.94126409	-2.84%	-65.975587	3.02%	9305.82192	2.93%
0.9442299	-2.90%	-66.4636824	3.40%	9135.38351	2.99%
0.9471257	-2.93%	-66.9568926	3.77%	8966.6753	3.01%
0.94996899	-2.93%	-67.4533151	3.99%	8799.4819	3.02%
0.95270696	-2.91%	-67.9582881	4.14%	8634.24076	3.00%
0.92138316	0.00%	-63.0623948	0.01%	10374.8781	0.00%
0.92485891	-1.90%	-63.5222303	0.59%	10191.7213	1.93%
0.92826919	-2.21%	-64.0023343	1.20%	10010.6421	2.26%
0.93157478	-2.46%	-64.475643	1.72%	9831.99322	2.52%
0.93481157	-2.64%	-64.9519234	2.16%	9655.31833	2.71%
0.93794139	-2.77%	-65.4317171	2.68%	9480.94384	2.85%
0.94102799	-2.85%	-65.9155567	3.04%	9308.15668	2.94%
0.9440066	-2.91%	-66.4039723	3.41%	9137.54449	3.00%
0.94691482	-2.94%	-66.8974964	3.79%	8968.67221	3.03%
0.94977025	-2.94%	-67.3942499	4.00%	8801.32325	3.03%
0.95251985	-2.93%	-67.8995296	4.15%	8635.9369	3.01%
0.92366387	0.00%	-63.1871454	0.03%	10349.2604	0.00%
0.92704194	-1.83%	-63.6461864	0.61%	10167.7216	1.86%
0.93035701	-2.12%	-64.1255083	1.15%	9988.17719	2.17%
0.93357089	-2.36%	-64.5980826	1.67%	9810.97099	2.41%
0.93671843	-2.53%	-65.0736603	2.19%	9635.66324	2.59%
0.93976243	-2.65%	-65.5527737	2.63%	9462.572	2.73%

0.94276486	-2.74%	-66.0359534	3.00%	9291.00812	2.82%
0.94566268	-2.79%	-66.5237251	3.38%	9121.54246	2.87%
0.9484924	-2.82%	-67.0166178	3.76%	8953.75507	2.90%
0.9512711	-2.82%	-67.5127055	3.98%	8787.43706	2.91%
0.95394716	-2.81%	-68.0173685	4.13%	8623.01562	2.89%
0.92334876	0.00%	-63.1245903	0.06%	10352.7923	0.00%
0.92674195	-1.83%	-63.5840305	0.64%	10171.0128	1.87%
0.93007177	-2.13%	-64.0637454	1.17%	9991.24034	2.18%
0.93329987	-2.37%	-64.536689	1.69%	9813.82	2.42%
0.93646124	-2.54%	-65.0126206	2.13%	9638.30953	2.60%
0.93951854	-2.67%	-65.4920754	2.66%	9465.02834	2.74%
0.94253402	-2.75%	-65.975587	3.02%	9293.28359	2.83%
0.94544437	-2.81%	-66.4636824	3.40%	9123.6487	2.89%
0.94828626	-2.83%	-66.9568926	3.77%	8955.70147	2.92%
0.95107685	-2.84%	-67.4533151	3.99%	8789.23183	2.92%
0.95376431	-2.82%	-67.9582881	4.14%	8624.66881	2.90%
0.92303378	0.00%	-63.0623948	0.01%	10356.3252	0.00%
0.92644211	-1.84%	-63.5222303	0.59%	10174.3047	1.88%
0.92978668	-2.14%	-64.0023343	1.20%	9994.30387	2.19%
0.933029	-2.38%	-64.475643	1.72%	9816.66916	2.43%
0.9362042	-2.55%	-64.9519234	2.16%	9640.9558	2.62%
0.9392748	-2.68%	-65.4317171	2.68%	9467.48449	2.75%
0.94230333	-2.76%	-65.9155567	3.04%	9295.55875	2.84%

0.9452262	-2.82%	-66.4039723	3.41%	9125.75453	2.90%
0.94808026	-2.84%	-66.8974964	3.79%	8957.64736	2.93%
0.95088274	-2.85%	-67.3942499	4.00%	8791.02604	2.93%
0.95358159	-2.83%	-67.8995296	4.15%	8626.32137	2.92%
0.92525961	0.00%	-63.1871454	0.03%	10331.4117	0.00%
0.92857277	-1.77%	-63.6461864	0.61%	10150.9592	1.81%
0.93182456	-2.06%	-64.1255083	1.15%	9972.44656	2.10%
0.93497748	-2.28%	-64.5980826	1.67%	9796.21135	2.33%
0.93806564	-2.45%	-65.0736603	2.19%	9621.82482	2.51%
0.94105254	-2.57%	-65.5527737	2.63%	9449.59947	2.64%
0.94399895	-2.65%	-66.0359534	3.00%	9278.86195	2.72%
0.94684298	-2.70%	-66.5237251	3.38%	9110.17187	2.78%
0.94962041	-2.73%	-67.0166178	3.76%	8943.11932	2.81%
0.95234799	-2.73%	-67.5127055	3.98%	8777.50053	2.81%
0.95497502	-2.72%	-68.0173685	4.13%	8613.73453	2.80%
0.92495157	0.00%	-63.1245903	0.06%	10334.8525	0.00%
0.92827952	-1.78%	-63.5840305	0.64%	10154.166	1.81%
0.93154574	-2.07%	-64.0637454	1.17%	9975.4314	2.11%
0.93471256	-2.29%	-64.536689	1.69%	9798.98776	2.34%
0.93781427	-2.46%	-65.0126206	2.13%	9624.40386	2.52%
0.94081419	-2.58%	-65.4920754	2.66%	9451.99348	2.65%
0.94377338	-2.66%	-65.975587	3.02%	9281.07972	2.73%
0.94662968	-2.71%	-66.4636824	3.40%	9112.22467	2.79%

0.94941903	-2.74%	-66.9568926	3.77%	8945.01626	2.82%
0.95215825	-2.75%	-67.4533151	3.99%	8779.24959	2.82%
0.95479646	-2.73%	-67.9582881	4.14%	8615.34543	2.81%
0.92464366	0.00%	-63.0623948	0.01%	10338.294	0.00%
0.92798641	-1.79%	-63.5222303	0.59%	10157.3732	1.82%
0.93126706	-2.08%	-64.0023343	1.20%	9978.41652	2.12%
0.93444779	-2.30%	-64.475643	1.72%	9801.76425	2.35%
0.93756304	-2.47%	-64.9519234	2.16%	9626.98281	2.53%
0.94057599	-2.59%	-65.4317171	2.68%	9454.38725	2.66%
0.94354795	-2.67%	-65.9155567	3.04%	9283.29714	2.75%
0.94641651	-2.73%	-66.4039723	3.41%	9114.27703	2.80%
0.94921778	-2.75%	-66.8974964	3.79%	8946.91267	2.83%
0.95196866	-2.76%	-67.3942499	4.00%	8780.99805	2.84%
0.95461803	-2.75%	-67.8995296	4.15%	8616.95571	2.82%

De acuerdo con la comparación realizada, se tiene que los porcentajes de error no superan el 5%, lo que valida la precisión de los resultados obtenidos. No obstante, se observa que a medida hay mayor presencia de hidrógeno en la mezcla, el error tiene una tendencia a incrementar. En la presente investigación solo se consideró hasta en 20% mol de hidrógeno, por lo que los efectos del error en niveles superiores no afectan la fiabilidad de los resultados de la presente investigación.