

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE DIDÁCTICO PARA EL DISEÑO DE
PLANTAS DE REFRIGERACIÓN DE GAS NATURAL CON PROPANO**

**HOWARK ENRIQUE LASTRE GUERRERO
IVÁN DARÍO SOCHIMILCA GALVIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2017

**DESARROLLO DE UN SOFTWARE DIDÁCTICO PARA EL DISEÑO DE
PLANTAS DE REFRIGERACIÓN DE GAS NATURAL CON PROPANO**

**IVÁN DARÍO SOCHIMILCA GALVIS
HOWARK ENRIQUE LASTRE GUERRERO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero de Petróleos.**

**Director:
M Sc. MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCAS
Docente Escuela de Ingeniería de Petróleos, UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE ING. FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE ING. DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2017**

DEDICATORIA

Howark:

A mi madre, por ese esfuerzo constante de lucha y dedicación incansable con el objetivo puesto en un mejor futuro, porque “si quieres ser alguien en la vida hijo, debes estudiar”.

DEDICATORIA

Iván:

A mi padre que, aunque ya no esté con nosotros, fomentó en mí la búsqueda de la excelencia y el logro de mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Howark:

A mi familia, sobre todo a mi madre que siempre inculcaron la educación como base fundamental del desarrollo personal.

A Angie que acompañó este proceso con paciencia y apoyo para lograr cumplir nuestro proyecto.

A mis maestros que no solo me brindaron los conocimientos, sino un ejemplo a seguir, en especial a aquellos que me enseñaron a ser mejor persona.

AGRADECIMIENTOS

Iván:

A mi familia, sobre todo a mi madre que apoyó mi decisión de estudio y me brindó todos estos años los medios para permitirme llegar a este punto.

A mis amigos, que han estado a mi lado, han compartido mis penas y glorias, y me son leales, aun sabiendo como soy.

A mis maestros que no solo me brindaron los conocimientos, sino un ejemplo a seguir, en especial a aquellos que me enseñaron a ser mejor persona.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. REFRIGERACIÓN DE GAS NATURAL	18
1.1 PROPIEDADES DEL GAS NATURAL.....	18
1.1.1 FACTOR DE COMPRESIBILIDAD Z.....	19
1.1.2 PESO MOLECULAR DEL GAS NATURAL	21
1.1.3 GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL GAS NATURAL	21
1.1.4 DENSIDAD DEL GAS NATURAL.....	22
1.1.5 VOLUMEN ESPECÍFICO	22
1.2 PROPIEDADES DEL SISTEMA	23
1.2.1 PRESIÓN	23
1.2.2 TEMPERATURA	24
1.3 REFRIGERACIÓN	24
1.3.1 REFRIGERACIÓN POR EXPANSIÓN.....	25
1.3.1 REFRIGERACIÓN MECÁNICA	28
2. HIDRATOS	38
2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS HIDRATOS.....	38
2.1.1. ESTRUCTURA TIPO I:.....	39
2.1.2. ESTRUCTURA TIPO II:.....	40
2.1.3. ESTRUCTURAS TIPO H:.....	41
2.2. CONDICIONES PARA LA FORMACIÓN DE HIDRATOS:.....	42
2.3. MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LAS CONDICIONES DE FORMACIÓN DE HIDRATOS:.....	43
2.3.1. MÉTODO DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA:	43
2.3.2. MÉTODO DE COEFICIENTES DE DISTRIBUCIÓN K_{vsi}	44
2.3.3. CORRELACIONES EMPÍRICAS.....	45
2.4. INHIBICIÓN DE HIDRATOS.....	47
2.4.1. METODOLOGÍA DE INHIBICIÓN DE HIDRATOS (MÉTODO HAMMERSCHMIDT)	48
3. PRESENTACIÓN DEL SOFTWARE.....	50
3.1. GUÍA PARA EL USUARIO.....	51
4. CONCLUSIONES	67
5. RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama de un sistema de Refrigeración Mecánica	30
Figura 2 Diagrama Ph para un ciclo de refrigeración mecánica.....	32
Figura 3. Estructura de Hidratos Tipo I	39
Figura 4. Estructuras de Hidratos Tipo II	40
Figura 5 Estructura de Hidratos Tipo H.....	42
Figura 6 Carta de Katz para la determinación de las condiciones de Hidratos	44
Figura 7. Pantalla principal del Software.....	51
Figura 8 Formulario1. Primera Pestaña: Composición del gas	52
Figura 9 Formulario 1. Pestaña 2: Condiciones de Operación y Propiedades del Gas	53
Figura 10. Formulario 1. Pestaña 3: Envoltorio de Fases	53
Figura 11 Pestaña del Ciclo sin Economizador.....	54
Figura 12 Diagrama de Mollier del Ciclo Sencillo.....	55
Figura 13 Ciclo del Propano con Economizador	55
Figura 14 Diagrama de Mollier. Con Economizador	56
Figura 15. Pestaña 1. Formulario del Diseño del Chiller. Cálculo de U	56
Figura 16. Pestaña 2. Formulario del Diseño del Chiller. Dimensionamiento Inicial	57
Figura 17. Pestaña 3. Formulario del Diseño del Chiller. Diámetro de la Carcasa Optimo	58
Figura 18. Formulario Productos Finales	58
Figura 19 Formulario Compresor	59
Figura 20 Formulario Condensador	59
Figura 21 Formulario Acumulador.....	60
Figura 22 Formulario válvula JT.....	60
Figura 23 Menú de Hojas de Cálculo.....	61
Figura 24 Etapa I Ejemplo de una Planta de procesamiento de Gas.....	61
Figura 25 Etapa II Ejemplo de una Planta de procesamiento de Gas	62
Figura 26 Comparación Visual P vs T Equilibrio Propano	64
Figura 27 Comparación Envoltorio Propano	65

LISTA DE ANEXOS

Anexo A Ecuación de Peng-Robinson (Fluido Puro)	70
Anexo B Determinación de las raíces de una función cúbica Cálculo de Z	73
Anexo C Propiedades de mezclas de fluidos.....	75
Anexo D Contenido de Agua.....	78
Anexo E Propiedades Generales del Gas Natural	81

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UN SOFTWARE DIDÁCTICO PARA EL DISEÑO DE PLANTAS DE REFRIGERACIÓN DE GAS NATURAL CON PROPANO*

AUTOR: HOWARK ENRIQUE LASTRE GUERRERO
IVÁN DARÍO SOCHIMILCA GALVIS**

PALABRAS CLAVE: SOFTWARE, REFRIGERACIÓN, PROPANO, R290, INGENIERÍA DE GAS

DESCRIPCIÓN:

La refrigeración mecánica es un proceso utilizado en la industria de hidrocarburos para cumplir con las especificaciones de venta del gas natural. El proceso incluye un complejo sistema que busca reducir la temperatura y así recuperar la mayor cantidad de condensado posible, debido a su alto valor comercial. Sin embargo, no solo implica los equipos que conforman la planta de refrigeración, sino que también los fenómenos fisicoquímicos y termodinámicos que ocurren al reducirse la temperatura.

Uno de estos fenómenos hace referencia al equilibrio de fases que se presenta si la ruta del proceso alcanza a ingresar a la envolvente, de manera análoga la formación de hidratos e inhibición se hacen presentes al considerar la refrigeración de un gas natural que pueda contener agua.

El desarrollo de una herramienta a nivel académico permite enfocarse en las necesidades inmediatas y tangibles que las diversas materias pueden tener. El trabajo presenta una breve recopilación de la teoría relacionada con el proceso, y de un software basado en la ecuación de Peng Robinson, con el fin de determinar la temperatura de salida del gas necesaria para realizar el control del punto de rocío de hidrocarburos, implicando equilibrio de fases, inhibición de hidratos, cambios de entalpía y entropía.

Por último, se realizó el proceso de validación del software R290 con el fin de determinar su precisión en los cálculos. Esto se logró con una comparación de resultados entre el software comercial, cumpliendo con las expectativas deseadas.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF A DIDACTIC SOFTWARE TO DESIGN NATURAL GAS REFRIGERATION PLANTS WITH PROPANE*

AUTHOR: HOWARK ENRIQUE LASTRE GUERRERO
IVÁN DARÍO SOCHIMILCA GALVIS**

KEYWORDS: SOFTWARE, REFRIGERATION, PROPANE, R290, GAS ENGINEERING

DESCRIPTION:

The mechanical refrigeration is a process used in the industry of hydrocarbons to achieve with the sale specifications of the natural gas. The process includes a complex system what seeks to reduce temperature and recover as much as possible the major quantity of condensed, due to its high commercial value.

But, not only it implies equipments that form the plant, but also the physicochemical and thermodynamic phenomena that happen on the temperature having diminished. One of these phenomena refers to the phase balance that one presents if the route of the process manages to deposit the surrounding one, in an analogous way the formation(training) of hidratos and inhibition they become present on having considered the refrigeration of a natural gas that could contain water.

The development of a tool on an academic level allows to be focused on the immediate and tangible needs that the diverse subjects could have. This work presents a brief summary of the theory related to the process, and a software development based on Peng Robinson's equation, in order to determine the exit temperature of the gas to achieve hydrocarbon dew point control, implying phase equilibria, hydrates inhibition, changes of enthalpy and entropy.

Finally, there was realized the process of validation of the software R290 in order to determine its precision in the calculations. This was achieved by a comparison of results with a commercial software, fulfilling with the expectations.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos, Advisor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado consiste en el desarrollo de una herramienta de software didáctico de uso académico para el modelamiento y diseño de un sistema de refrigeración de gas natural por medio de refrigeración mecánica con propano. Es decir, este software llamado R290, debido a la identificación comercial del propano como refrigerante, se centra en la determinación de la temperatura de salida del gas necesaria para lograr el punto de rocío de hidrocarburos (HDP²) requerido, el duty del chiller y el ciclo termodinámico del proceso de refrigeración sobre el diagrama de Mollier del propano. Al mismo tiempo, presenta una interfaz sencilla que muestra, el proceso general de refrigeración del gas, junto con un directorio para los métodos y cálculos utilizados en el desarrollo del software.

El uso de software a nivel educativo permite llevar a la práctica los conocimientos teóricos adquiridos, reduciendo los tiempos de cálculo que anteriormente se realizaban a mano, para así destinar tiempo en el entendimiento de los fenómenos presentes en el proceso. Sin embargo, el tipo de software actualmente utilizado es de tipo comercial, el cual, aunque permite capacitar al estudiante para su futuro laboral, no permite que este conozca los modelos empleados a nivel detallado. Por tanto, se hace necesario desarrollar software que permita al estudiante acceder a los modelos matemáticos utilizados para la ejecución del proceso.

Con el fin de llenar el vacío que los paquetes comerciales dejan, los docentes a lo largo del mundo han desarrollado sus propias versiones con el fin de satisfacer las necesidades específicas que se presentan. Un ejemplo de esto es el software desarrollado por Lona, Roque & Rodrigues el cual está “enfocado en el diseño de

² Por sus siglas en inglés Hydrocarbon Dew Point

intercambiadores de calor de tubos y coraza”³. Por otro lado, Axaopoulos & Pitsilis presentan una herramienta para el “cálculo de propiedades termodinámicas de gases y líquidos, logrando obtener densidad, calor específico, viscosidad, conductividad térmica, entre otras para diferentes fluidos”⁴. Y como último ejemplo Martín & Mato desarrollan otro software para el “diseño de redes de intercambiadores de calor con el objetivo de minimizar el gasto de energía en el proceso”⁵.

Además, este trabajo busca presentar los fenómenos que ocurren en los equipos que componen una planta de refrigeración de gas natural con propano, como son: el equilibrio de fases, la expansión isoentálpica, el intercambio de calor, el proceso de compresión y la inhibición de hidratos. A partir de esto, se busca que el software permita calcular la temperatura a la cual la fase gas cumple con el HDP requerido, y así determinar las condiciones de operación del ciclo de refrigeración y también el cálculo de la cantidad de inhibidor para evitar la formación de hidratos en el proceso.

Siguiendo los lineamientos anteriores, se optó por hacer uso de los recursos disponibles en la web y los textos, destacando principalmente las hojas de cálculo que diferentes autores desarrollaron para condiciones termodinámicas puntuales, y se emplearon para la generación de algoritmos, agilizando el proceso de cálculo.

El principal aporte a nivel académico radica en la posibilidad de brindarle al estudiante una herramienta la cual además de realizar los cálculos, tenga la opción de permitir el acceso a los modelos matemáticos involucrados, con el objetivo que el estudiante conozca las formulas y modelos y si este lo desea, poder el mismo

³ LONA, L., F.A.N., F., Roque, M., & Rodrigues, S. Developing an educational software for heat exchangers and heat exchanger networks projects. Computers and Chemical Engineering, Vol 24, Jul. 2000, pg. 1247.

⁴ AXAOPOULOS, P., & PITSILIS, G. Energy software programs for educational use. Renewable Energy, Vol 32, May. 2006, pg. 1045.

⁵ MARTÍN, A., & MATO, F. Hint: An educational software for heat exchanger network design with the pinch method. Education for Chemical Engineers, Vol. 3, Jun. 2008, pg. E6.

observar el comportamiento de las variables internas del proceso, y no solo las variables de entrada y salida.

1. REFRIGERACIÓN DE GAS NATURAL

El gas natural está compuesto por una amplia gama de compuestos hidrocarbonados que se condensan para formar líquidos a una temperatura particular. Los componentes más densos o "más pesados" pueden condensarse a temperaturas de operación y pueden causar problemas operacionales dentro de las tuberías y equipos. Estos líquidos de gas natural (LGN) también tienen un alto valor de mercado que proporciona un incentivo para la recuperación máxima. Las unidades de refrigeración disminuyen la temperatura del gas natural para condensar los hidrocarburos y, con la estabilización del producto, destilan los líquidos para cumplir especificaciones de venta precisas del producto. El gas residual resultante y el GNL se transportan o almacenan con seguridad.

1.1 Propiedades del gas natural

El gas natural está conformado en un 70 % por metano (CH_4). El gas restante está distribuido en etano (C_2H_6), Propano (C_3H_8), Butanos ($n\text{-C}_4\text{H}_{10}$, $i\text{-C}_4\text{H}_{10}$), Pentanos ($n\text{-C}_5\text{H}_{12}$, $i\text{-C}_5\text{H}_{12}$), Hexano (C_6H_{14}) y componentes pesados en menor proporción para gases hidrocarburos.

Además encontramos componentes no hidrocarburos como Dióxido de Carbono (CO_2), Sulfuro de Hidrógeno (H_2S), Nitrógeno (N_2) y agua (H_2O)⁶. Estos compuestos deben ser removidos del gas con el objetivo de cumplir especificaciones de ventas.

La mezcla de estos componentes hace que cada gas tenga propiedades diferentes como:

⁶ HOWELL, J. R., & BUCKIUS, R. O. Principios de Termodinámica para Ingeniería. México D.F.: McGRAW HILL. 1990.

1.1.1 **Factor de compresibilidad Z:** El cálculo del factor de compresibilidad Z aplica para gases reales y se obtiene a partir de la gráfica del factor Z de Standing-Katz. Esta gráfica a pesar de haber sido desarrollada hace más de cuatro décadas sigue siendo ampliamente utilizada como una fuente práctica para determinar factores de compresibilidad del gas natural.

A partir de esto, surge la necesidad de aplicar una descripción matemática simple de ese gráfico. Para esto se han desarrollado varias correlaciones empíricas para calcular los factores Z dentro de las cuales se encuentran:

- Hall-Yarborough
- Dranchuk-Abu-Kassem
- Dranchuk-Purvis-Robinson

1.1.1.1. **Método de Hall y Yarborough (1973):** presentaron una ecuación de estado que representa con precisión la gráfica del factor Z de Standing y Katz. La expresión propuesta se basa en la ecuación de estado de Starling-Carnahan. Los coeficientes de la correlación se determinaron ajustándolos a los datos tomados de la gráfica del factor z de Standing y Katz. Hall y Yarborough propusieron la ecuación ⁷:

$$Z = \frac{0.06125 * P_{pr} t}{Y} * \exp(-1.2(1 - t)^2] \quad (1)$$

Donde P_{pr} equivale a presión pseudo-reducida, Y es la densidad reducida y t es el recíproco de la temperatura pseudo-reducida.

1.1.1.2. **Método de Dranchuk-Abu-Kassem:** Para esta ecuación derivaron una expresión analítica para calcular la densidad de gas reducida que se puede usar para estimar el factor de compresibilidad del gas. Esta se

⁷ AHMED, T. Reservoir Engineering Handbook. Houston TX: Gulf Publishing Company. 2000.

define como la relación de la densidad de gas a una presión y temperatura específica con respecto a la presión y temperatura crítica del gas. Como resultado la ecuación 2.

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{P M_a / [Z R T]}{P_c M_a / Z_c R T_c} = \frac{P / [Z T]}{P_c / Z_c T_c} \quad (2)$$

Donde el factor de compresibilidad de gas crítico es aproximadamente 0.27.

1.1.1.3. **Método de Dranchuk-Purvis-Robinson:** Los autores desarrollaron una correlación basada en el tipo de ecuación de estado de Benedict-Webb-Rubin. Estos realizaron un ajuste de datos a 1500 puntos del gráfico de factor Z de Standing y Katz que optimizó los coeficientes de las ecuaciones propuestas. La ecuación 3 modela el resultado.

$$1 + T_1 \rho_r + T_2 \rho_r^2 + T_3 \rho_r^5 + [T_4 \rho_r^2 (1 + A_8 \rho_r^2) \exp(-A_8 \rho_r^2)] - \frac{T_5}{\rho_r} = 0 \quad (3)$$

Con,

$$T_1 = A_1 + \frac{A_2}{T_{pr}} + \frac{A_3}{T_{pr}^3}$$

$$T_2 = A_4 + \frac{A_5}{T_{pr}}$$

$$T_3 = A_5 + \frac{A_6}{T_{pr}}$$

$$T_4 = A_7 / T_{pr}^3$$

$$T_5 = 0.27 P_{pr} / T_{pr}$$

Donde ρ_r es definida por la solución del método anterior y los coeficientes A_1 a A_8 son definidos por los siguientes valores:

$A_1 = 0.31506237$	$A_5 = -0.61232032$
$A_2 = -1.0467099$	$A_6 = -0.10488813$
$A_3 = -0.57832728$	$A_7 = 0.68157001$
$A_4 = 0.53530771$	$A_8 = 0.68446548$

El método es válido para los siguientes rangos de presión y temperatura pseudo-reducidas:

$$T_{pr} 1.05 - 3.0 \quad \text{y} \quad P_{pr} 0.2 - 3.0$$

1.1.2 Peso molecular del gas natural: Una de las principales propiedades del gas natural que frecuentemente es de gran interés es el peso molecular aparente. La fracción molar del componente se representa por y_i en una mezcla de gas natural, la ecuación 4 define el peso molecular aparente⁸.

$$M_a = \sum y_i M_i \quad (4)$$

Donde, M_a es el peso molecular aparente de una mezcla de gas natural, Y_i es la fracción molar de cada componente en la mezcla y M_i es el peso molecular de cada componente presente en la mezcla.

1.1.3 Gravedad específica del gas natural: La gravedad específica se define como la relación entre la densidad del gas y la del aire. Ambas densidades se miden a la misma presión y temperatura. Comúnmente, la presión estándar (P_{sc}) y la temperatura estándar (T_{sc}) se utilizan para definir la gravedad específica del gas. La ecuación 5 modela la gravedad específica.

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{aire}} \quad (5)$$

Suponiendo que el comportamiento de la mezcla de gas y del aire se describe por la ecuación de gas ideal, la gravedad específica puede expresarse entonces como la ecuación 6.

⁸ Ibid

$$\gamma_g = \frac{\frac{P_{sc}M_a}{RT_{sc}}}{\frac{P_{sc}M_{aire}}{RT_{sc}}} \quad (6)$$

Entonces,

$$\gamma_g = \frac{M_a}{M_{aire}} = \frac{M_a}{28.96}$$

Donde γ_g es la gravedad específica del gas, ρ_{aire} es la densidad del aire, M_{aire} es el peso molecular aparente del aire igual a 28.96, M_a es el peso molecular aparente del gas, P_{sc} es la presión estándar en psia y T_{sc} es la temperatura estándar.

1.1.4 Densidad del gas natural: La densidad de una mezcla gaseosa ideal se calcula por medio de la ecuación 7 que modela la ecuación de gases ideales, para determinar la densidad de una mezcla de gas real se debe tener en cuenta el factor de compresibilidad Z.

$$\rho_g = \frac{pM_a}{RT} \quad (7)$$

Donde ρ_g es la densidad de la mezcla de gases en libras por pie cúbico y M_a es el peso molecular aparente.

1.1.5 Volumen específico: El volumen específico se define como el volumen ocupado por una masa unitaria del gas. Para un gas ideal, esta propiedad se puede calcular aplicando la ecuación 8, para un gas real se debe tener en cuenta el factor de compresibilidad Z.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{RT}{pM_a} = \frac{1}{\rho_g} \quad (8)$$

Donde v es el volumen específico en pie cúbico por libra y ρ_g es la densidad del gas en libras por pie cúbico.

1.2 Propiedades del sistema

Dentro de las propiedades de sistema encontramos la presión y temperatura.

1.2.1 **Presión:** La presión es una propiedad determinante para describir el estado de un sistema, esta se define como la fuerza normal ejercida a una superficie por unidad de área en el sistema. La ecuación 9 modela la presión.

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow a} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (9)$$

Esta propiedad se mide con referencia a la presión atmosférica y las unidades utilizadas para expresarlas son: Pascal (Pa), que se define como Newton / metros cuadrados. Atmosferas (atm), donde una atmósfera equivale a 101.325 KPa, estas unidades pertenecen al Sistema Internacional (SI). Con respecto al Sistema Inglés, la presión se calcula en libra fuerza por pulgada cuadrada manométrica (psig) y la presión absoluta en libra fuerza por pulgada cuadrada absoluta (psia)⁹.

Para calcular la presión de un gas ideal se debe tener en cuenta la ecuación 10, para gases reales se debe tener en cuenta el factor de compresibilidad Z .

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \quad (10)$$

Donde n hace referencia al número de moles del gas, R es la constante de los gases, T es la temperatura y V el volumen que ocupa el gas.

⁹ Ibid

1.2.2 **Temperatura:** Dos cuerpos A y B se encuentran en equilibrio termodinámico cuando estos son medidos por dos termómetros a las mismas condiciones y estos registran un mismo valor. Estos termómetros calculan la temperatura en grados Celsius (°C) o Fahrenheit (°f) aunque la temperatura puede expresarse en unidades absolutas como Kelvin (K) o Rankine (R).

La relación entre estas escalas es:

$$T (^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273.15$$

$$T (^{\circ}\text{f}) = T(\text{R}) - 459.67$$

$$T(\text{R}) = 1.8 T(\text{K})$$

1.3 Refrigeración

Los sistemas de refrigeración de gas natural son empleados no solo por la industria de gas natural, sino también en otras industrias como la del petróleo en procesos de refinación, en la química y petroquímica. Existen diversos motivos para hacer uso de estos sistemas, los cuales determinarán a que temperatura se deberá llevar el gas a refrigerar, entre los cuales están: el control de punto de rocío (HDP), la condensación de la corriente de reflujo en los sistemas de fraccionamiento, la recuperación ya sea de GNL o GLP, y para uso de plantas de GNL¹⁰.

¹⁰ GPSA. ENGINEERING DATA BOOK. Tulsa, Oklahoma: Gas Processors Suppliers Association 2004.

Dentro de los tipos de sistemas de refrigeración de gas natural podemos encontrar:

- 1) Refrigeración por Expansión
 - a. Por válvula de expansión (Válvula J-T¹¹)
 - b. Por turbina de expansión (Turbo Expander)

- 2) Refrigeración Mecánica
 - a. Por compresión
 - b. Por Absorción

1.3.1 Refrigeración por Expansión: Las válvulas de expansión para la refrigeración de gas natural se han utilizado desde hace más de medio siglo. Estos equipos son sencillos y su costo no es tan alto, sin embargo, su baja eficiencia termodinámica y las altas presiones requeridas (1500 psia) para su operación limitan su viabilidad. Usualmente se aplican con el fin de hacer el control del punto de rocío de hidrocarburos (HDP).

La refrigeración por turbinas de expansión se desarrolló a finales de la década de 1960 y actualmente es el método de procesamiento de gas más popular. Este método se emplea para la extracción de GNL a bajas temperaturas, así como para control del HDP. Su popularidad radica en su eficiencia, su fiabilidad y su economía.

1.3.1.1 Válvula de Expansión: Este proceso se realiza a través de una válvula Joule-Thompson, la cual genera una expansión isoentálpica, permitiendo una reducción de temperatura al reducir la presión a la salida de la válvula. Hay que tener en cuenta que esta expansión no necesariamente implica un enfriamiento,

¹¹ Válvula Joule-Thompson

existen condiciones en las cuales la expansión genera un calentamiento del gas y es necesario tener en cuenta cuales son estos límites para realizar el enfriamiento¹².

Existen dos procesos, los cuales hacen uso de la válvula de expansión para lograr el enfriamiento deseado. El proceso LTS presenta un intercambio de calor entre el gas de entrada y el gas de salida con el fin de pre enfriar el gas y recuperar el enfriamiento del gas de salida, al ingresar el gas al proceso es necesario inyectar inhibidores debido a la presencia de agua en la corriente de gas lo que genera un riesgo de formación de hidratos y, posteriores taponamientos y complicaciones técnicas.

Posterior a esto, se realiza la expansión a través de la válvula, lo que genera una condensación de las fracciones más pesadas del gas, el agua y el inhibidor los cuales se retiran de la corriente haciendo uso de un separador, donde el gas acondicionado fluye de nuevo al intercambiador gas-gas con el fin de realizar el pre enfriamiento antes mencionado.

Por otro lado, el proceso LTX presenta la ausencia de uso de inhibidores, por tanto, los posibles hidratos que se formen aguas abajo de la válvula junto con los líquidos se calientan en un intercambiador con el fin de fundir los hidratos formados. Usualmente el fluido utilizado para calentar los líquidos e hidratos formados, es el gas de entrada. Este proceso no logra unas bajas temperaturas como el LTS, sin embargo, por su sencillez y costo son útiles para el procesamiento de gas con el fin de satisfacer las especificaciones de transporte o procesamiento.

1.3.1.2 Turbinas de Expansión: Estos equipos hacen uso de una turbina con el fin de aprovechar la energía presente en el gas y no solo lograr una reducción de presión y de temperatura sino además utilizar el trabajo generado por el proceso ya

¹² Ibid

sea para recomprimir el gas luego de acondicionarlo o producir energía si el proceso de recomprimir no es requerido, y el equipo que recibe el trabajo es un generador. Usualmente este proceso está conformado por una turbina y un compresor, ambos de una etapa, debido a la necesidad de comprimir el gas para ponerlo en condiciones de venta.

La ventaja de este proceso radica en su alta eficiencia en la expansión, cerca del 85% (isentrópica), desde su introducción a la industria a finales de la década de los 60, han demostrado su fiabilidad y su capacidad de funcionamiento en situaciones adversas. Han presentado rodamientos lubricados con aceite, pero han sido mejorados a rodamientos magnéticos y hoy en día se le han instalado cojinetes magnéticos con el fin de reducir la fricción entre las piezas y por tanto aumentar su eficiencia.

Para una correcta operación de estos equipos, es necesario un gas de sello, el cual se encargará de mantener separados el gas de proceso y la zona del rotor donde están los cojinetes y/o el aceite lubricante, para evitar que este se mezcle con el aceite o que el aceite gotee en la corriente de gas. Inicialmente los primeros sellos eran de tipo laberinto, pero posteriormente se desarrollaron los sellos de gas seco y aún continúan utilizándose. Estos difieren de los diseños utilizados en los compresores centrífugos donde un solo sello (en lugar de dos sellos orientados en la misma dirección) es usado debido a limitaciones de espacio. Debido a este tipo de sello, el gas de sello debe ser limpio y seco. Muchas fallas han sido atribuidas a la poca calidad del gas de sello.

Las turbinas de expansión son utilizadas en plantas de extracción de GNL y en el control de punto de rocío. La principal diferencia radica en la relación de expansión, mientras que en la extracción de GNL la relación de expansión usualmente esta entre 3.0 a 3.5 en el proceso de control de punto de rocío es de cerca de 1.3 a 1.5.

1.3.2 Refrigeración Mecánica: Un sistema de refrigeración es una bomba de calor. Se remueve el calor de baja temperatura del fluido del proceso y es “Bombeado” a una alta temperatura donde es liberado al ambiente. Es necesaria energía para bombear el calor. La cantidad de energía depende de la cantidad de calor a ser bombeado (duty del chiller) y que tan lejos el calor tiene que ser bombeado (la diferencia de temperatura entre el chiller y el condensador)¹³.

La energía utilizada para el proceso de refrigeración se puede encontrar en forma de calor o trabajo. Los sistemas de refrigeración por absorción usan calor, los sistemas de compresión usan trabajo.

1.3.2.1 Sistemas de absorción de Amoniaco: El proceso de absorción puede ser visto como un ciclo mecánico de compresión de vapor, con el compresor reemplazado por un generador, un absorbedor y una bomba de líquido. El ciclo de absorción goza de los beneficios de requerir una fracción de la entrada eléctrica que un ciclo de compresión. El ciclo de absorción se utilizó inicialmente como un sistema de producción de hielo. El funcionamiento básico de un ciclo de absorción de amoníaco/agua es el siguiente:

Se aplica calor a un generador, el cual contiene una solución rica en amoníaco. El calor hace que el vapor de amoníaco sea liberado de la solución y este fluye hacia un condensador, típicamente refrigerado por aire. El vapor de amoníaco se condensa y el amoníaco líquido se hace pasar por un evaporador donde cumple su papel como refrigerante al evaporarse. El vapor de fluye hacia el absorbedor, que contiene una solución rica en agua obtenida del generador. Esta solución absorbe el amoníaco mientras que libera el calor. Este calor se puede utilizar como producto

¹³ CAMPBELL, J. M. Gas conditioning and processing. Campbell Petroleum Series. 1992

térmico o para la recuperación interna de calor en otras partes del ciclo, reduciendo la carga del quemador y aumentando la eficiencia del ciclo. La solución en el absorbedor, ahora una vez más rica en amoníaco, es bombeada al generador, donde está lista para repetir el ciclo.

Aunque no se usan ampliamente, pueden ser competitivos con los sistemas de compresión, especialmente en aquellas situaciones donde hay cantidades significativas de calor residual. Todo depende del costo beneficio en cuanto a los gastos de enfriamiento y fuente de energía. Si la economía lo permite, estos sistemas pueden ser una alternativa viable a los sistemas de compresión para la refrigeración.

Algunas de las ventajas de estos sistemas son: El uso directo de quemadores de gas, temperaturas alcanzadas hasta de -76 °F, la posibilidad de disipar el calor utilizando aire. Sin embargo, presenta otras desventajas como son la toxicidad del amoniaco obligando a trabajo del sistema en lugares bien ventilados, la necesidad de una columna rectificadora con el fin de lograr una mayor concentración del amoniaco, incrementando los costos del sistema¹⁴.

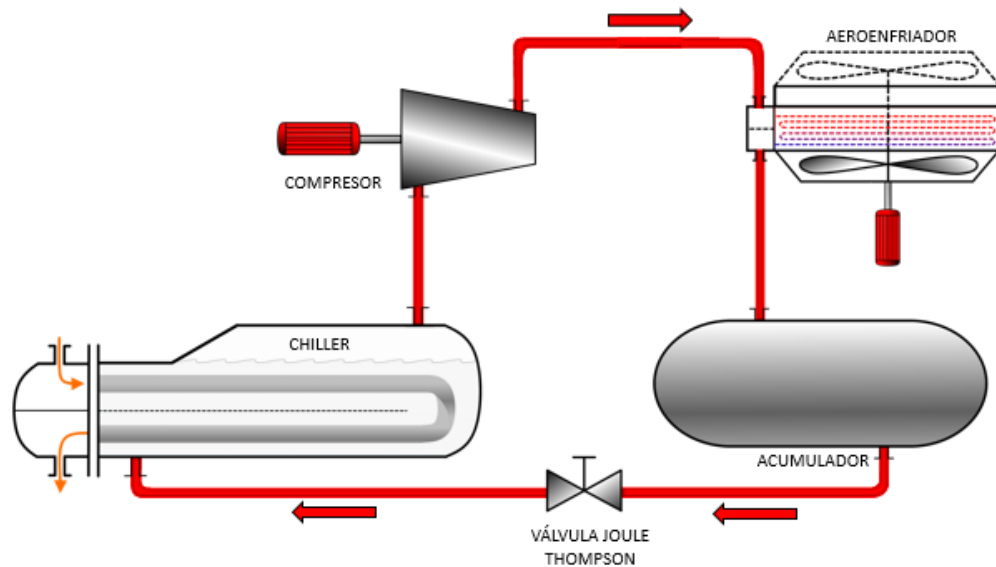
1.3.2.2 Sistemas de Compresión: Este proceso de refrigeración mecánica es el más común. Tiene un amplio rango de aplicación en la industria del procesamiento de gas:

- Extracción de líquidos del gas natural.
- Control del punto de rocío de los hidrocarburos (HDP).
- Almacenamiento de GLP.
- Condensación de reflujo en de-etanizadores / demetanizadores.
- Licuefacción de gas natural (GNL)

¹⁴ Ibid

La figura 1 muestra un sistema de refrigeración por compresión de una sola etapa sencilla. El refrigerante líquido saturado en el punto A se expande a través de una válvula (isoentálpicamente). En la expansión se produce alguna vaporización. La mezcla de vapor refrigerante y líquido entra al chiller (algunas veces llamado evaporador) típicamente 3-6 °C [5-10 °F] por debajo de la temperatura a la cual la corriente del proceso está siendo enfriada. El líquido se vaporiza. Dejando en el punto C un refrigerante de vapor saturado a la P y T del enfriador. Este vapor es comprimido y luego entra en el condensador en forma de vapor sobrecalentado. El refrigerante sale del condensador como un líquido saturado o ligeramente subenfriado. El acumulador, algunas veces llamado surge tank o receptor, simplemente sirve como un depósito para refrigerante cuando los niveles varían en el chiller y el condensador.

Figura 1 Diagrama de un sistema de Refrigeración Mecánica



1.3.2.3 Ruta termodinámica de la refrigeración mecánica: Al utilizar un diagrama Presión-Entalpia, el ciclo de refrigeración puede dividirse en cuatro pasos:

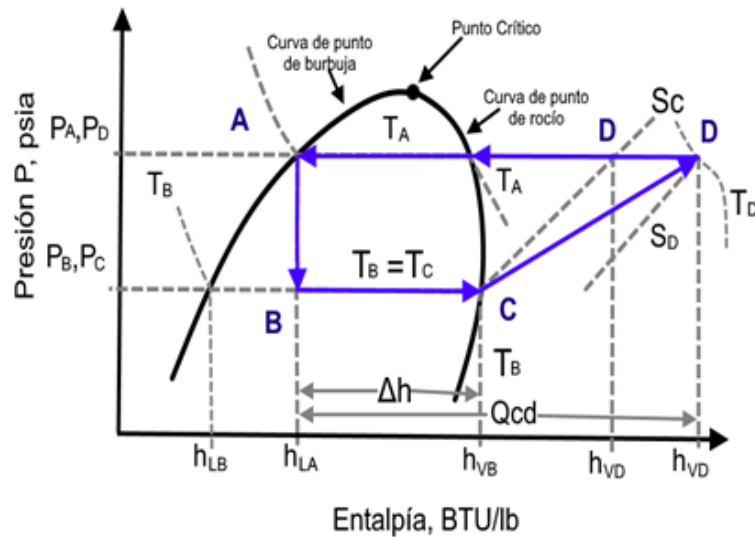
- A. Expansión
- B. Evaporación
- C. Compresión
- D. Condensación

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor puede ser representado en el diagrama de presión-entalpia como se muestra en la figura 2.

- A. Expansión: El punto A representa el punto de burbuja del líquido a presión de saturación, P_A , y entalpia H_{LA} . En este proceso, la presión y la temperatura son reducidas por la expansión del líquido a través de una válvula de control a la presión P_B . La caída de presión está determinada por la temperatura deseada del refrigerante, T_B .

El proceso ocurre a través de una válvula de expansión y la energía no cambia, por tanto, el proceso es considerado isoentálpico.

Figura 2 Diagrama Ph para un ciclo de refrigeración mecánica



Fuente: Modificado de GPSA, Engineering Data Book, 12va Edición 2004

- B. Evaporación: El vapor formado durante la expansión, no provee ninguna refrigeración, y el calor es absorbido en el proceso de evaporación de la fase líquida del refrigerante. Este proceso se realiza a temperatura y presión constante; la evaporación toma lugar en el intercambiador de calor (llamado evaporador o chiller).
- C. Compresión: El vapor deja el chiller a la presión de saturación P_C , y este vapor es comprimido isentrópicamente a la presión P_A ; hay que tener en cuenta que el refrigerante no actúa como un fluido ideal ni el compresor opera al 100%, por esto es necesario tener en cuenta la eficiencia isentrópica para compensar las ineficiencias durante el proceso de compresión.
- D. Condensación: El vapor sobrecalentado que sale del compresor a P_A y T_D , es enfriado a la temperatura de condensación T_A , y el vapor empezara a condensar a temperatura constante. Durante el enfriamiento y la

condensación, todo el calor y el trabajo agregado al refrigerante durante la evaporación y la compresión debe ser removido para completar el ciclo en el punto A.

1.3.2.4. Equipos utilizados en un sistema de refrigeración mecánica con propano:

- Válvula de Expansión J-T: Tiene como finalidad reducir la presión del líquido proveniente del acumulador o de un economizador dependiendo de la configuración del sistema y entregarlo como una mezcla de líquido y vapor a baja presión al chiller o a un economizador. Esta reducción de presión es fundamental para poder lograr las temperaturas requeridas del refrigerante para su ingreso al chiller.
- Chiller: Intercambiador de calor en el cual el refrigerante entra en estado líquido o mayoritariamente líquido a baja presión y a una baja temperatura. Al entrar en contacto con las paredes, absorbe el calor cedido por el gas y cambia de fase. A la salida del chiller el refrigerante sale en fase vapor a baja presión el cual se encuentra "cargado" con la energía absorbida durante el intercambio de calor. Como todo intercambiador de calor, este equipo deberá presentar el mínimo de resistencia al paso de calor con el fin de asegurar la transferencia de energía entre el gas y el refrigerante.
- Compresor: Succiona el refrigerante en fase vapor proveniente del chiller y lo comprime, es decir, eleva la presión a una tal que permita licuar el refrigerante en el condensador. En este equipo es donde se entrega la energía necesaria para el funcionamiento del sistema.

- **Acumulador:** Esta unidad es donde se almacena el propano en fase líquida, presurizado por la fase vapor del propano. En esta unidad las dos fases están en equilibrio, el líquido ingresa desde el condensador y sale hacia la válvula de expansión.
- **Condensador:** (Segundo intercambiador de calor) Tiene por finalidad condensar el refrigerante en estado gaseoso a alta presión proveniente del compresor. La condensación implica convertirlo de nuevo en líquido y para ello se debe extraerle el calor ganado durante su evaporación y la compresión. El calor extraído al refrigerante es entregado al medio ambiente, ya sea por un enfriamiento mediante agua o aire. A la salida de este nos encontramos con líquido a alta presión.
- **Economizador:** tiene la función de separar la fase gaseosa y la fase líquida de propano generada durante la expansión en la válvula J-T, y se ubica entre el acumulador y el Chiller. Esta unidad suministra un incremento en la capacidad del sistema de refrigeración debido a la extracción de la fase gas, la cual no va a absorber calor durante el proceso de evaporación del propano en el chiller.

1.3.2.5 Ecuaciones implicadas en el proceso de refrigeración mecánica: En el proceso de refrigeración mecánica se ven procesos termodinámicos, que requieren ciertas consideraciones, por tanto, en esta sección se busca presentar las ecuaciones y los métodos de cálculo para determinar la ruta termodinámica.

- **Ecuación de Estado:** En el presente trabajo de grado se manejó la ecuación de Peng Robinson, la cual es bien conocida por su fidelidad a la hora de modelar el comportamiento de mezclas de hidrocarburos y componentes apolares. Anexo 1.

Metodología:

Paso 1. Conociendo las temperaturas de salida del gas de Chiller, y ambiente junto con los approach de los intercambiadores, se busca la presión a la cual se presenta el equilibrio (La relación entre fugacidades liquido/vapor es igual a 1 para ambas temperaturas).

Paso 2. Conociendo los valores de Presión y Temperatura, se determina la entalpia para el punto A (Salida del condensador) y se determinan los valores de entalpia para el vapor y el líquido (Punto C) a presión del Chiller. Figura 2.

Paso 3. Con los valores anteriores se calcula la calidad a la salida de la válvula a través de la ecuación 11

$$X_v = \frac{h_A - h_l}{h_v - h_l} \text{ ó } X_l = \frac{h_v - h_A}{h_v - h_l} \quad (11)$$

Paso 4. Con el duty del Chiller puede encontrarse, el flujo másico de refrigerante necesario utilizando la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \frac{Q_{\text{chiller}}}{h_C - h_A} \quad (12)$$

Paso 5. Conociendo la entropía en el punto C, se puede determinar las condiciones de temperatura a presión del condensador para el proceso isentrópica y hallar el punto D.

Paso 6. Para determinar las condiciones de temperaturas verdaderas, es necesario tener en cuenta la eficiencia del compresor, aplicando la ecuación 13.

$$h_D = \frac{h_D^{\text{isen}} - h_C}{E} + h_C \quad (13)$$

Paso 7. Para el cálculo de la potencia del compresor se utiliza la ecuación 14.

$$-W_{[\text{HP}]} = \frac{\dot{m}(h_D - h_C)}{2545} \quad (14)$$

Paso 8. El cálculo del duty del condensador se calcula por medio de la ecuación 15

$$Q_{\text{cond}} = 2545W - Q_{\text{chiller}} \quad (15)$$

1.3.2.6 Refrigerante: Durante los últimos años el fluido de mayor implementación en los sistemas de refrigeración mecánica es el propano, existe una serie de razones por las cuales este ha desplazado al amoníaco como el refrigerante ideal en la industria.

- El propano es un producto de fácil acceso que se encuentra en la refinería, sus características como refrigerantes se asemejan a las propiedades del amoníaco.
- El peso molecular más alto del propano con respecto al amoníaco se presta bien para el uso de compresores.
- La implementación de tubería para el transporte de amoníaco implica la necesidad de normas especiales.

- El amoníaco es más tóxico que el propano¹⁵.

¹⁵ WHIPPLE, T. T., & TAYLOR, I. Performance of the propane refrigeration system using centrifugal compressors. World Petroleum Congress, 1-11. 1951.

2. HIDRATOS

Los hidratos de gas son estructuras cristalinas similares al hielo, formadas por gas natural y agua, hacen parte de la clase de compuestos conocidos como clatratos, los cuales se basan en la formación de una celda conformada por moléculas de agua, la cual es ocupada por una molécula huésped, en el caso de los hidratos será un hidrocarburo u otra molécula presente en el gas natural. Las principales moléculas huésped que se presentan en los hidratos son: ácido sulfúrico, dióxido de carbono, metano, etano, propano, isobutano y n-butano.

Se conoce la existencia de los hidratos desde hace más de 200 años, sin embargo, el interés hacia este tipo de compuestos inicia hacia 1930 cuando se presentan problemas de obstrucción y taponamiento durante el transporte de gas. En presencia de agua, el gas puede interactuar con ella y si las condiciones de presión y temperatura lo permiten, el hidrato podrá formarse y empezar a acumularse cada vez más grandes logrando generar un taponamiento¹⁶.

Los hidratos son fuentes potenciales de combustible debido a que predomina la presencia de metano en la mayoría de ellos. Sin embargo, los hidratos pueden generar pérdidas económicas y riesgos potenciales cuando se presentan en las líneas de flujo.

2.1. Clasificación de los Hidratos

Los hidratos se clasifican por la disposición de las moléculas de agua en el cristal, y por lo tanto su estructura cristalina. Dos tipos de hidratos se encuentran comúnmente: Tipo I y Tipo II (Estructura I y II). Un tercer tipo también puede

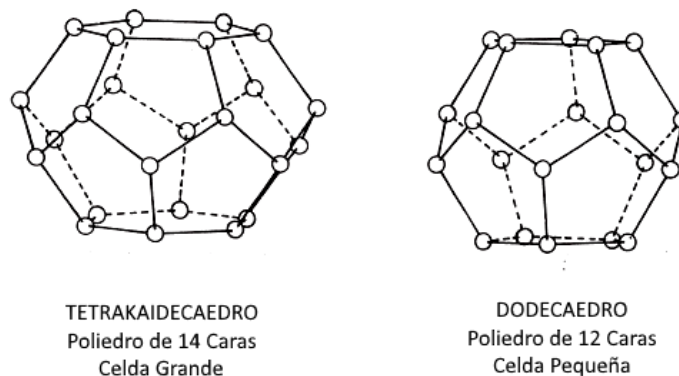
¹⁶ CAMACHO, M. Y., & MORANTES, L. S. Análisis De Sensibilidades Aplicado A La Formación De Hidratos De Gas Natural Durante Su Transporte Por Gasoductos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2013.

encontrarse, es el Tipo H (Estructura H), pero es menos común y sus estructuras son significativamente más complejas.

2.1.1. **Estructura tipo I:** Es la más simple de las estructuras y consisten en 46 moléculas de agua. Está hecha de dos tipos de jaulas: (1) Dodecaedro, poliedro de doce caras pentagonales, y (2) tetradécaedro, un poliedro de catorce lados con doce caras pentagonales y dos caras hexagonales lo que genera que sean de un tamaño mayor a las dodecaédricas¹⁷. La estructura I se obtuvo en el año 1965 por McMullan y Jeffrey mediante difracción de rayos X para el hidrato oxidado del etileno.

- **Formadores de Estructuras Tipo I:** Algunos de los formadores más comunes incluyen metano, etano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico. En los hidratos de CH_4 , CO_2 y H_2S , las moléculas huésped pueden ocupar tanto las celdas pequeñas como las grandes. Por otra parte, la molécula de etano ocupa sólo las celdas grandes.

Figura 3. Estructura de Hidratos Tipo I



Fuente: Modificado de Carroll, John. Natural Gas Hydrates: A Guide for Engineers. 2da Edición.

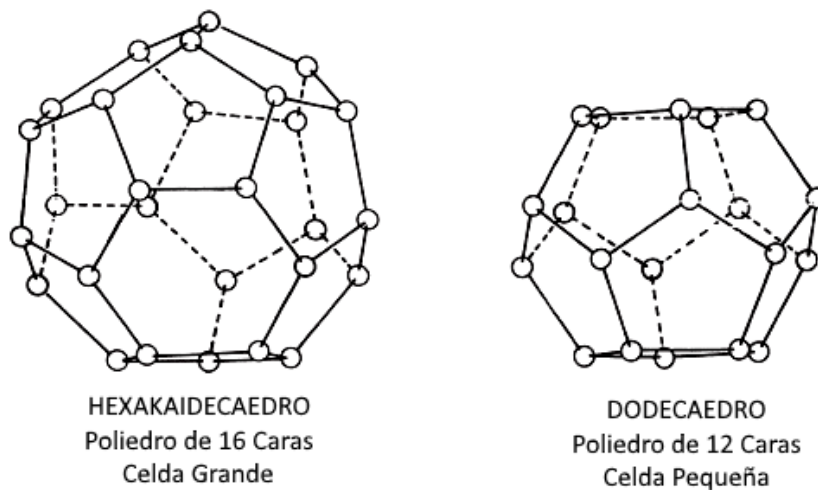
¹⁷ CARROLL, J. Natural Gas Hydrates: A Guide for Engineers (2da. ed.). Burlington, Massachusetts, EE.UU.: Gulf Professional Publishing. 2009

2.1.2. **Estructura tipo II:** La estructura de los hidratos de tipo II es significativamente más complicada que la del tipo I. Los hidratos de tipo II también se presentan en de dos tipos de configuraciones: (1) Dodecaedro, un poliedro de doce lados donde cada cara es un pentágono regular, y (2) Hexakaidecaedro, un poliedro de dieciséis lados con doce caras pentagonales y cuatro caras hexagonales. Las celdas dodecaédricas son más pequeñas que las hexakaidecaédricas.

La estructura II la obtuvo Mak y McMullan en 1965, al realizar un estudio de difracción de rayos X para el hidrato de sulfato de hidrogeno tetra-hidratado. Ellos confirmaron que el cristal tiene forma de diamante.

- **Formadores de estructuras Tipo II:** Entre los formadores más comunes se encuentran el nitrógeno, propano e isobutano. El nitrógeno ocupa tanto las celdas grandes como las pequeñas del hidrato Tipo II. Por otra parte, el propano y el isobutano sólo ocupan las celdas grandes.

Figura 4. Estructuras de Hidratos Tipo II



Fuente: Modificado de Carroll, John. Natural Gas Hydrates: A Guide for Engineers. 2da Edición.

2.1.3. **Estructuras Tipo H:** Los hidratos de tipo H son mucho menos comunes que los tipos I o II. Para formar este tipo de hidrato se requiere una molécula pequeña, como el metano, y una molécula formadora adicional de hidratos Tipo H. Se forman a partir de tres tipos de celdas: (1) Dodecaedro, un poliedro de doce lados donde cada cara es un pentágono regular, (2) un dodecaedro irregular con tres caras cuadradas, seis caras pentagonales y tres caras hexagonales, Y (3) un icosaedro irregular, un poliedro de veinte lados, con doce caras pentagonales y ocho caras hexagonales.

El cristal base se compone de tres celdas dodecaédricas (pequeñas), dos celdas irregulares dodecaédricas (medianas) y una celda icosaédrica (grande). Compuesto de 34 moléculas de agua. Los hidratos de tipo H son siempre hidratos dobles. Pequeñas moléculas huéspedes, como el metano, ocupan las jaulas pequeñas y medianas de la estructura, mientras que una molécula más grande ocupa la celda grande. Esta estructura se reportó en el año 1987 y fue el resultado de análisis realizados a los estudios basados en resonancia magnética nuclear y a los datos de refracción de energía¹⁸.

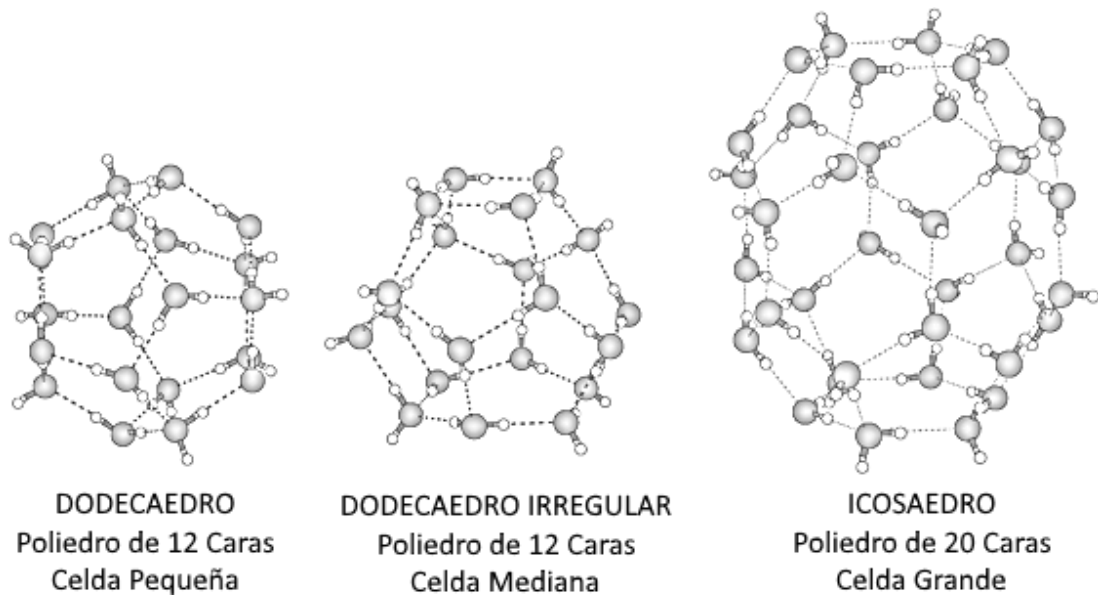
- **Formadores de estructuras Tipo H:** A diferencia de los hidratos tipo I y II que pueden formarse en presencia de un solo formador, el Tipo H requiere que estén presentes dos formadores: (1) una molécula pequeña como el metano, y (2) una molécula formadora más grande.

Los formadores de tipo H incluyen: 2-metilbutano, 2,2-dimetilbutano, 2,3-dimetilbutano, 2,2,3-trimetilbutano, 2,2-dimetilpentano, 3,3-dimetilpentano, metilciclopentano, etilciclopentano, metilciclohexano,

¹⁸ Op. Cit. CAMACHO, M. Y., & MORANTES.

Cicloheptano y ciclooctano. La mayoría de estos componentes no se identifican en los análisis del gas natural.

Figura 5 Estructura de Hidratos Tipo H



Fuente: Modificado de Translation-rotation energy levels of one H₂ molecule inside the small, medium and large cages of the structure H clathrate hydrate, Physical Chemistry Chemical Physics, Publicación 7, 2011.

2.2. Condiciones para la formación de Hidratos:

Los hidratos de gas se forman cuando las condiciones termodinámicas permiten el equilibrio entre las fases. Las condiciones que favorecen la formación de hidratos son¹⁹ :

- Condiciones de presión altas y temperaturas bajas. Sin embargo, es posible encontrar formación de hidratos a temperaturas mayores a la temperatura de solidificación del agua (32 °F).

¹⁹ [En Línea] disponible en <https://es.scribd.com/doc/59477491/Capitulo-2-2-4-Hidratos>

- Presencia de formadores, es necesario la presencia de compuestos como los mencionados en la sección anterior los cuáles serán las moléculas huésped del hidrato a formarse.
- Presencia de agua libre, o cerca al punto de rocío para permitir la formación de las estructuras.

Otras condiciones que favorecen la formación de hidratos²⁰:

- Turbulencia: La presencia de altas velocidades y agitación, favorecen la formación, por tanto, es necesario poner atención a equipos tales como válvulas estranguladoras, separadores, intercambiadores de calor, etc.
- Lugares para Nucleación: Son lugares en los cuales el cristal base puede alojarse y empezar a crecer, pueden ser zonas como imperfecciones de la tubería, puntos de soldadura, accesorios, zonas de corrosión, sedimentos, etc.
- Agua Libre: Aunque no es del todo necesaria para la formación de hidratos, favorece en gran medida la formación de estos.

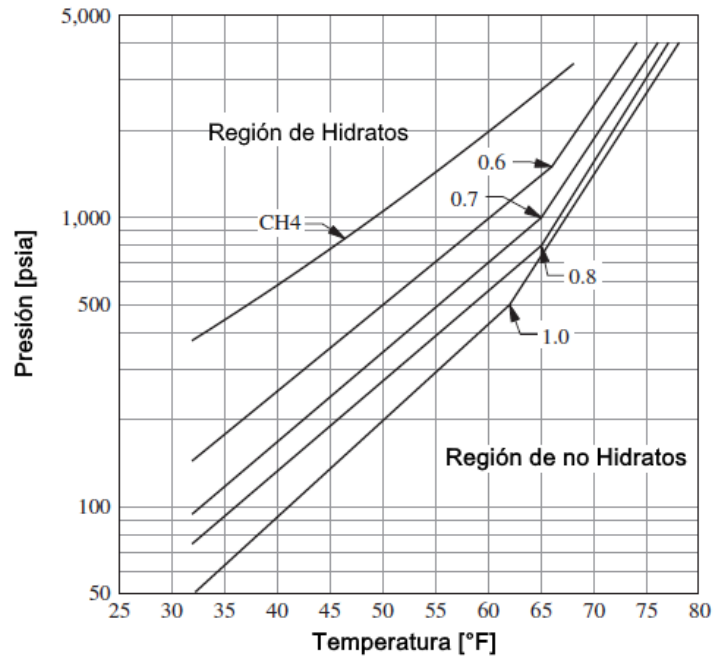
2.3. Métodos para el cálculo de las condiciones de formación de hidratos:

2.3.1. Método de la Gravedad Específica: Este método se basa en el uso de cartas desarrolladas por Katz (1945), su ventaja es su simplicidad, son cartas en las cuales los ejes principales son la presión y la temperatura y el tercer parámetro es la gravedad específica de gas, lo que permite

²⁰ Ibid.

encontrar las condiciones de formación de hidratos conociendo la gravedad específica del gas y una de las otras dos variables.

Figura 6 Carta de Katz para la determinación de las condiciones de Hidratos



Fuente: Modificado de Carroll, John. *Natural Gas Hydrates: A Guide for Engineers*. 2da Edición.

2.3.2. **Método de Coeficientes de distribución K_{vsi}** : Este método es similar al usado para el equilibrio líquido vapor por la GPSA, fueron desarrolladas estas cartas en 1941 por Wilcox et al, y posteriormente terminadas por Carson y Katz en 1942. Con el paso de los años, las cartas han sido actualizadas, estando disponibles cartas para los formadores de hidratos.

El coeficiente de distribución K_{vsi} se define como la relación entre la fracción molar presente en la fase gas del componente i y la fracción molar en la fase hidrato del mismo componente.

Carroll²¹ presenta una correlación generalizada, la cual modifica los coeficientes para ajustarse a las cartas:

$$\ln K_{vsi} = A + BT + CP + \frac{D}{T} + \frac{E}{P} + FTP + GT^2 + HP^2 + \frac{IP}{T} + J \ln\left(\frac{P}{T}\right) + \frac{K}{P^2} + \frac{LT}{P} + \frac{MT^2}{P} + \frac{NP}{T^2} + \frac{OT}{P^3} + QT^3 + \frac{RP^3}{T^2} + ST^4 \quad (16)$$

Donde:

T = Temperatura en °F

P= Presión en psia

El procedimiento se basa en el cálculo de los coeficientes a presión y temperaturas dadas, y con estos calcular la composición del hidrato, si la sumatoria de la composición del hidrato es diferente de 1, se modifica la presión o temperatura según sea la variable a encontrar hasta que la suma de la composición del hidrato sea igual a 1.0.

2.3.3. Correlaciones Empíricas: En 1934, Hammerschmidt propuso una correlación para la formación de hidratos de gas:

$$T_{[°F]} = 8.9P_{[psia]}^{0.285} \quad (17)$$

Esta ecuación no tiene en cuenta el efecto de la gravedad específica del gas. La mayoría de las correlaciones buscan calcular la temperatura de formación de hidratos, porque la presión es dada por las condiciones del proceso y la temperatura es la variable que debe estimarse.

En 1981, Makogon presenta una correlación que busca encontrar la presión de formación de hidratos y es desarrollada más tarde por Elgibaly y Elkamel:

²¹ Op. Cit. CARROLL

$$\log P_{[MPa]} = \beta + 0.0497(T_{[°C]} + kT_{[°C]}^2) - 1 \quad (18)$$

Donde

$$\begin{aligned} \beta &= 2.681 - 3.811\gamma + 1.679\gamma^2 \\ k &= -0.006 + 0.011\gamma + 0.011\gamma^2 \\ \gamma &= \text{gravedad especifica del gas} \end{aligned}$$

En 1986, Berg propuso dos correlaciones para $0.55 \leq \gamma < 0.58$ y $0.58 \leq \gamma < 1$ con 11 y 10 parámetros ajustables, respectivamente:

$$T = -96.03 + 25.37 \ln(P) - 0.64 \ln(P)^2 + \frac{\gamma - 0.555}{0.025} \left[80.61P + \frac{1.16e4}{P + 596.16} - (-96.03 + 25.37 \ln(P) - 0.64 \ln(P)^2) \right] \quad (19)$$

$$T = \left[80.61P - 2.1e4 - \frac{1.22e3}{\gamma - 0.535} - \left(1.23e4 + \frac{1.71e3}{\gamma - 0.509} \right) \right] / \left[P - \left(-260.42 - \frac{15.18}{\gamma - 0.535} \right) \right] \quad (20)$$

Para proporcionar estimaciones más precisas de TFH²², en 1978, Kobayashi et al. desarrollaron una correlación de 15 parámetros ajustables²³:

$$\begin{aligned} T = 1 / [&A_1 + A_2 \ln P + A_3 \ln \gamma + A_4 (\ln P)^2 + A_5 \ln P \ln \gamma + A_6 (\ln \gamma)^2 + A_7 (\ln P)^3 + \\ &A_8 (\ln P)^2 \ln \gamma + A_9 \ln P (\ln \gamma)^2 + A_{10} (\ln \gamma)^3 + A_{11} (\ln P)^4 + A_{12} (\ln P)^3 \ln \gamma + \\ &A_{13} (\ln P)^2 (\ln \gamma)^2 + A_{14} \ln P (\ln \gamma)^3 + A_{15} (\ln \gamma)^4] \quad (21) \end{aligned}$$

En 1991, Motiee sugirió la ecuación:

²² Temperatura de Formación de Hidratos

²³ GHOLAMREZA, Z., ZOHRE, K., & HAMED, Y. Prediction of hydrate formation temperature by both statistical models and artificial neural network approaches. Energy Conversion and Management 50. 2009.

$$T_{[°F]} = -238.24469 + 78.99667 \log P_{[psi]} - 5.352544 (\log P_{[psi]})^2 + 349.473877 \gamma - 150.854675 \gamma^2 - 27.604065 \gamma \log P_{[psi]} \quad (22)$$

Esta ecuación es bien conocida y ampliamente utilizada en la industria de petróleo y gas debido a su precisión para mezclas de gas natural.²⁴

2.4. Inhibición de Hidratos

La mejor manera de prevenir la formación (y corrosión) debido a la formación de los hidratos es la mantener el caño, la tubería, y los equipos libres de agua líquida. Existen ocasiones, correctas o incorrectas, cuando se toma la decisión de operar una línea o proceso que contiene agua líquida. Si es esta la decisión, y la temperatura del proceso es menor que la de hidratación, es precisa la inhibición de esta agua.

Se pueden agregar muchas sustancias al agua para deprimir tanto la temperatura de hidratación, así como la de congelamiento. A causa de muchas razones prácticas un inhibidor termodinámico (THI – ITH) tal como el alcohol o uno de los glicoles es inyectado, usualmente el metanol, dietilenglicol (DEG), o monoetilenglicol (MEA). Todos pueden ser recuperados y recirculados, pero el ambiente económico para la recuperación del metanol puede que no sea favorable en todas aplicaciones. La inhibición con metanol y o los glicoles puede incurrir gastos apreciables debido a la alta dosificación requerida (10 % a 60% de la fase acuosa). Altas concentraciones de solventes el incrementan el potencial de escamas por cuanto se reduce la solubilidad de las sales de formación de escamas, y precipitan la mayoría casi todos los inhibidores conocidos. La tasa total del inhibidor requerido es la cantidad/concentración deseada para lograr la supresión de los hidratos, así como

²⁴ [En línea] disponible en <http://www.gasprocessingnews.com/features/201508/predict-gas-hydrate-formation-temperature-with-a-simple-correlation.aspx>

la cantidad del inhibidor que se concentrarán en las fases de vapor y líquida del hidrocarburo.

El inhibidor presente en la fase gaseosa o la líquida proporciona poco impacto sobre las condiciones de formación de hidratos. Debido a las limitaciones en la certeza de los cálculos de depresión en la temperatura de hidratación, y distribución de flujo en el proceso, se recomienda que la temperatura de formación de hidratos con inhibición se logre con un factor de diseño por debajo de la mínima temperatura de operación, para asegurar caudales adecuados del inhibidor.

Son importante la determinación la cantidad y concentración de los inhibidores en las distintas fases por razones prácticas más las aplicaciones industriales. De manera que, para determinar la cantidad y concentración requerida de estos inhibidores, se han desarrollado varios modelos aplicables para los cálculos manuales, así como aquellos destinados para su incorporación dentro del ambiente de modelaje computacional.

2.4.1. Metodología de Inhibición de Hidratos (Método Hammerschmidt): La metodología utilizada para el módulo de inhibición de hidratos se basó en la ecuación de Hammerschmidt, de la siguiente manera:

Es necesario conocer las condiciones operacionales como: presión y temperatura, tanto a la entrada como a la salida del proceso, los flujos de gas, condensado y agua libre presente en el proceso, propiedades como masa, densidad y peso molecular del condensado y por último la composición del gas.

- Paso 1. Determinar el peso molecular del gas, para posteriormente calcular la gravedad específica de este.
- Paso 2. Calcular el porcentaje de inhibidor (MeOH) requerido en la fase de agua libre, usando la ecuación de Hammerschmidt.

$$\Delta T = \frac{C_w}{100MeOH - MeOH W} \quad (23)$$

Paso 3. Calcular el agua condensada durante el proceso, y la masa de agua producida que fluye en la línea.

Paso 4. Calcular la tasa de inyección del inhibidor para cada una de las fases:

- a. Calcular la masa del inhibidor en la fase agua.
- b. Calcular la masa que se pierde en la fase gas.
- c. Calcular la cantidad que se pierde en el condensado.
- d. Calcular la cantidad total del inhibidor en todas las fases.

3. PRESENTACIÓN DEL SOFTWARE

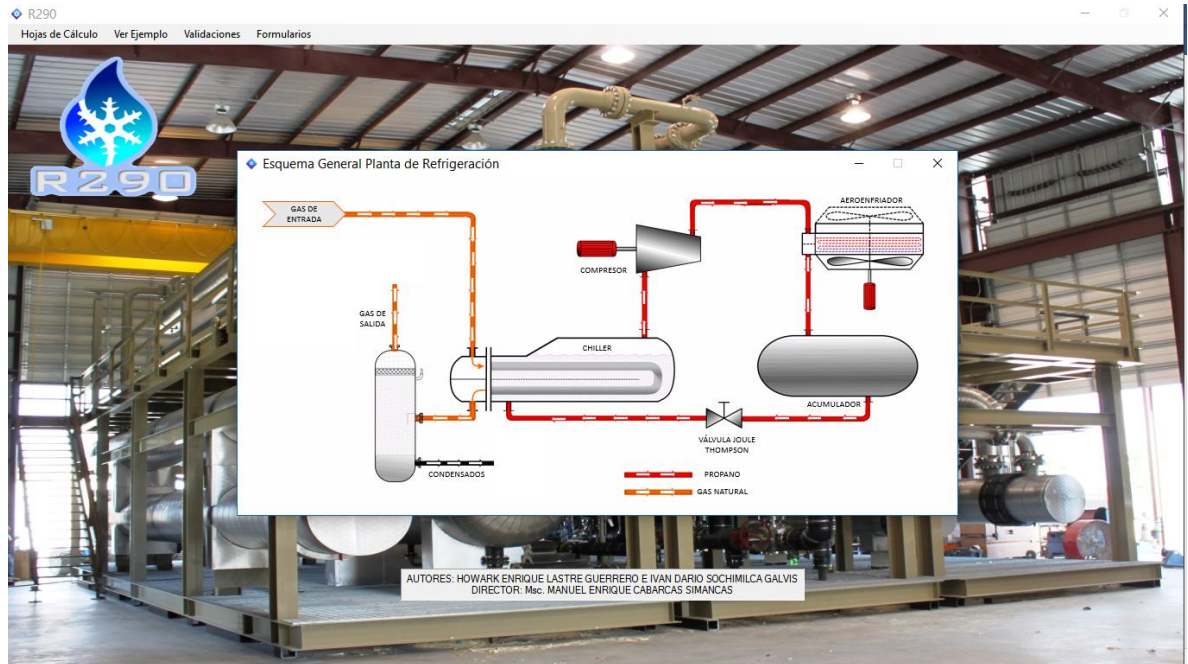
El software R290 fue desarrollado bajo un lenguaje de código Visual Basic en la plataforma Microsoft Visual Studio Enterprise 2015 Versión 14.0.25425.01 Update 3 y Microsoft .NET Framework Versión 4.6.01586, en un equipo con sistema operativo Windows 10 de 64 bits. Está diseñado para ser utilizado de manera secuencial, con el fin de que los resultados sirvan de base para el desarrollo del proceso.

Está dirigido a estudiantes de pregrado de ingeniería de petróleos en la asignatura de Ingeniería de Gas de la Universidad Industrial de Santander, para el tema de refrigeración de gas natural, específicamente refrigeración mecánica, es un software de apoyo que permite al estudiante reforzar los conceptos vistos, facilitando el entendimiento de los fenómenos ocurridos en el proceso de refrigeración mecánica.

La fiabilidad de los cálculos se verificará con el uso de un software comercial (Aspen Hysys), con el fin de permitir un mayor control, y de brindar resultados similares a una herramienta comercial, probando así que el desarrollo de software por parte de la academia genera buenos resultados y que es necesario incentivar en este ámbito al estudiantado.

3.1. Guía para el usuario

Figura 7. Pantalla principal del Software



En la pantalla principal, el usuario se encuentra con el esquema principal del proceso de refrigeración, el cual consta de un separador, el gas de entrada, y el ciclo del propano (Chiller, Compresor, Aeroenfriador, Acumulador, Válvula JT).

El seguimiento del proceso se basa en animaciones, la primera será la del gas de entrada, para iniciar con el proceso.

Cuando el usuario de clic sobre el icono para el gas de entrada, una nueva ventana se desplegará, la cual consta de tres pestañas, la primera le solicitará la composición del gas que desea refrigerar. El software trabaja con fracción molar, sin embargo, permite al usuario ingresar la composición sin ningún tipo de restricción, ya sea trabajando con porcentaje o simplemente con proporciones entre componentes. Para lo anterior, si la composición no es igual a 1, la ventana mostrara un mensaje recordando al usuario la necesidad de normalizar la composición para poder continuar con el proceso. Adicionalmente, el software trae cargadas las composiciones de siete campos colombianos.

Figura 8 Formulario1. Primera Pestaña: Composición del gas

Componente	Fracción Molar
N2	0.0000
CO2	0.0000
H2S	0.0000
C1	0.0000
C2	0.0000
C3	0.0000
i-C4	0.0000
n-C4	0.0000
i-C5	0.0000
n-C5	0.0000
n-C6	0.0000
n-C7	0.0000
n-C8	0.0000
n-C9	0.0000

Total

Editar Normalizar Siguiente

La segunda pestaña, permite calcular algunas propiedades generales del gas al conocer las condiciones de presión, temperatura, caudal de gas y HDP requerido.

PD. Se presenta un mensaje de información sobre la presión máxima permitida, para que el usuario no ingrese una presión superior o cercana al punto crítico, con el fin de asegurar el proceso de refrigeración y separación.

Propiedades calculadas como: Factor Z del gas, Peso Molecular, Gravedad Especifica, Densidad del Gas, Flujo volumétrico, Flujo Másico, Contenido de Agua y HDP Actual.

Figura 9 Formulario 1. Pestaña 2: Condiciones de Operación y Propiedades del Gas

The screenshot shows the 'R290' software window with the 'Datos de Operación' and 'Propiedades' sections. The 'Datos de Operación' table contains the following data:

Datos de Operación	Valor	Unidades
Presión de Entrada	500.0000000	Psig
Temperatura de Entrada	50.0000000	°F
Caudal de Gas	20.0000000	MMSCFD
HDP Requerido	45.0000000	°F

Below this table, the 'Presión Máxima' is 1364.2 Psig, and there is a 'Calcular' button. The 'Propiedades' table contains the following data:

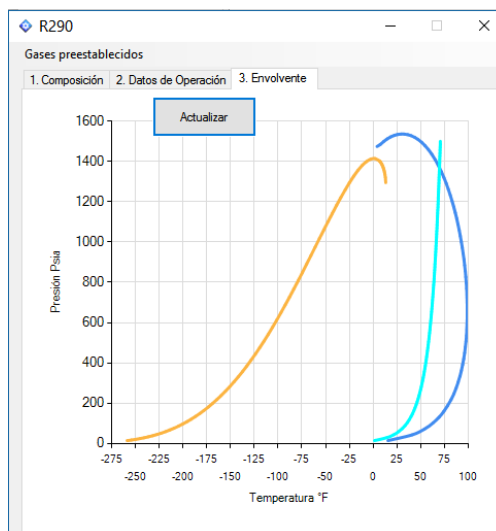
Propiedad	Valor	Unidades
Factor de Compresibilidad Z	0.839883	
Peso Molecular	22.255632	
Gravedad Específica	0.768230	
Densidad del Gas	2.493923	lb/ft ³
Flujo Volumétrico	19,587.169996	ft ³ /hr
Flujo Másico	48,848.889239	lb/hr
Contenido de Agua	22.070573	lb/MMSCF
HDP Actual	99.165819	°F

Buttons for 'Editar' and 'Siguiente' are located at the bottom of the window.

Si el usuario desea modificar los valores anteriormente ingresados, el botón editar, permitirá reactivar los controles para hacer los cambios deseados.

En la pestaña 3, se ofrece una versión beta del módulo de envolvente de fases, para darle una idea al usuario del comportamiento del gas, junto con la curva de hidratos, para que inicialmente pueda observar si habrá o no presencia de hidratos.

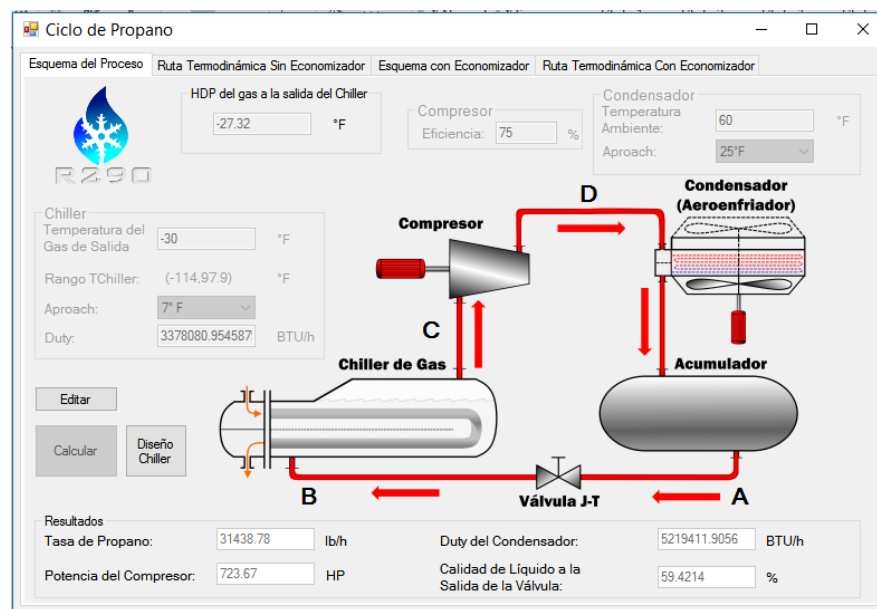
Figura 10. Formulario 1. Pestaña 3: Envolvente de Fases



El botón siguiente de la pestaña 2, redirige al usuario al formulario principal, con el fin de continuar con la identificación de la temperatura de salida del gas del chiller para el cumplimiento del HDP requerido.

En esta nueva ventana, el usuario solo requiere ingresar la temperatura del gas de entrada y la temperatura ambiente, junto con los approach de los intercambiadores para así, determinar las tasas de circulación, la calidad a la salida de las válvulas, y las presiones de operación de los equipos. También incluye el cálculo del sistema con economizador, para evidenciar los beneficios al implementar este tipo de equipos. En las pestañas ruta termodinámica, se muestra el ciclo del propano sencillo y con economizador, respectivamente sobre el diagrama de Mollier y así identificar el fenómeno que ocurre entre equipos.

Figura 11 Pestaña del Ciclo sin Economizador



En el formulario se puede observar el rango de temperatura de operación en el cual la separación ocurre, al modificar este valor, se calcula el HDP del gas de salida que se separa a esas condiciones de presión y temperatura.

De manera análoga al formulario anterior, el botón calcular muestra los resultados a esas condiciones de operación, y genera sobre el diagrama de Mollier el ciclo

termodinámico. De igual modo, el botón editar, permite modificar los campos de temperaturas.

Figura 12 Diagrama de Mollier del Ciclo Sencillo

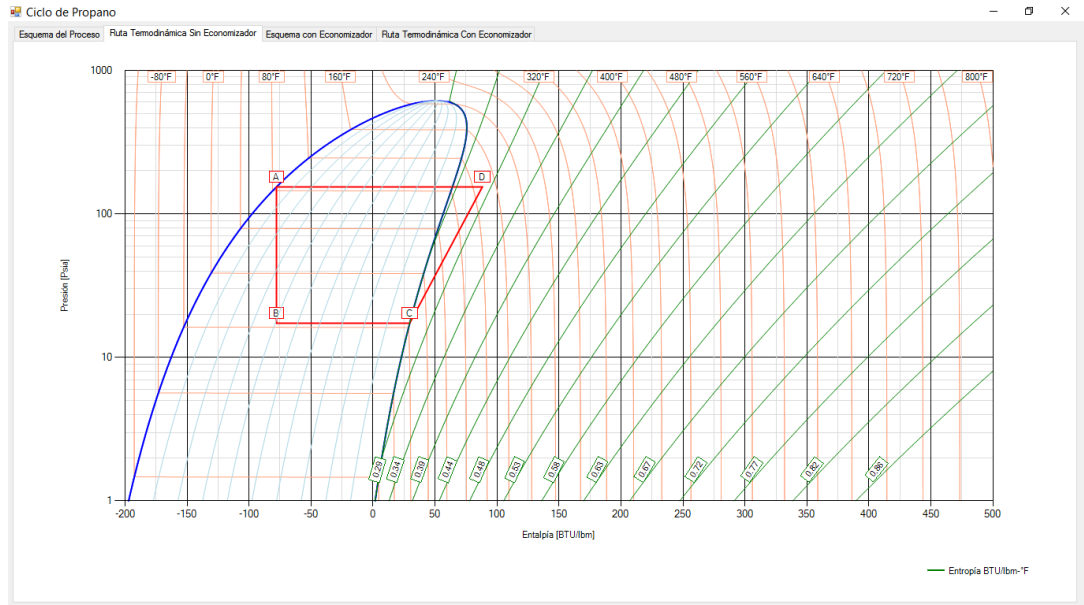


Figura 13 Ciclo del Propano con Economizador

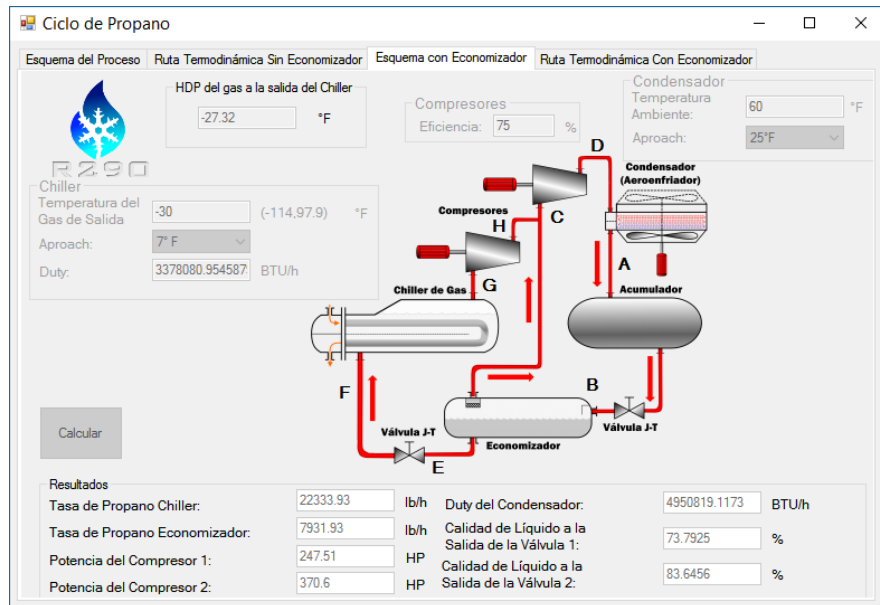
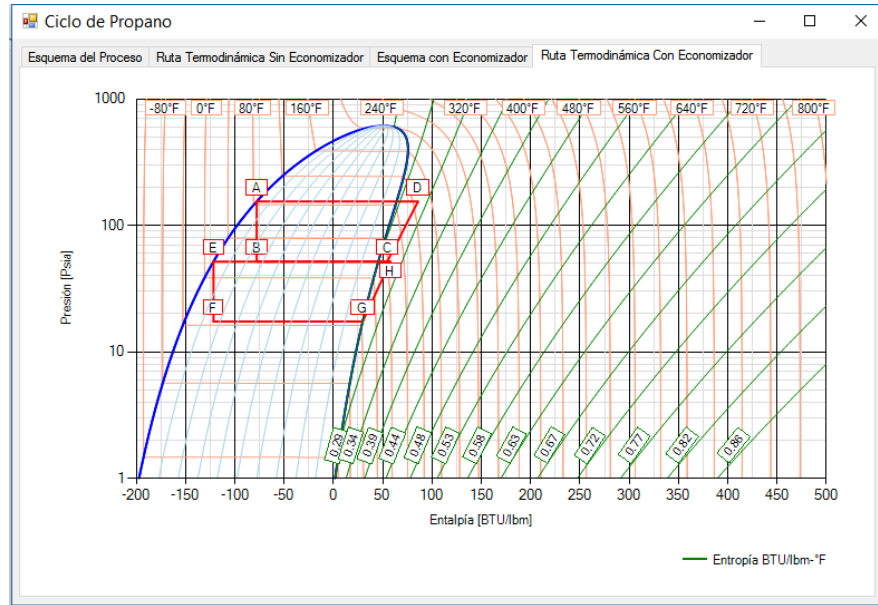


Figura 14 Diagrama de Mollier. Con Economizador



En la primera pestaña al lado del botón calcular, está el botón para ingresar al dimensionamiento del chiller, el cual se activa una vez se calcule la tasa del propano en el chiller, su funcionamiento se basa en una estimación inicial del coeficiente de transferencia total de calor (U), la selección de la longitud de los tubos y el número de pasos por los tubos con el fin de calcular el valor de transferencia total de calor. Modificando el U estimado, se busca que el U calculado este lo más cercano posible para continuar con el proceso.

Figura 15. Pestaña 1. Formulario del Diseño del Chiller. Calculo de U

En la pestaña 2, se mostrarán los valores calculados del número de tubos, el diámetro de la sección de los tubos, el diámetro de la carcasa asumido como el doble de la sección de los tubos, la velocidad que tiene el gas en esas condiciones de diámetros y la velocidad máxima permitida para evitar el arrastre de líquidos. Si la velocidad del gas es menor a la permitida, se muestra un mensaje que informa la posibilidad de disminuir el diámetro para reducir costos, si por el contrario es mayor, el mensaje informará que es necesario un diámetro mayor.

Figura 16. Pestaña 2. Formulario del Diseño del Chiller. Dimensionamiento Inicial

Diseño Chiller

Paso 2. Dimensionamiento Inicial Paso 3. Diáme

Número de Tubos 466

Diámetro de la sección de los tubos: 45 in

Diámetro de la Carcasa 90 in

Velocidad del Vapor en la Superficie 10.778900595 ft/s

Velocidad Máxima permitida 9.7109 ft/s

El diámetro de la carcasa necesita ser más grande para evitar arrastre de líquidos

En la pestaña 3, el usuario podrá modificar los valores del diámetro, con el fin de encontrar el valor más óptimo que evite el arrastre de líquidos, y genere el costo más bajo. Para esto, cuando se haga clic en el botón calcular, el cuadro de texto del diámetro se volverá rojo si la condición de velocidad no se cumple, y verde cuando si lo haga.

Figura 17. Pestaña 3. Formulario del Diseño del Chiller. Diámetro de la Carcasa Optimo

Diseño Chiller

Paso 3. Diámetro Mínimo

Diámetro de la Carcasa in

Velocidad del Vapor en la Superficie ft/s

Velocidad Máxima permitida ft/s

Calcular

RZ90

Posteriormente, el usuario podrá ingresar al separador, donde se mostrarán las composiciones del gas y el líquido a las condiciones de salida, con las propiedades correspondientes a cada fase. Adicionalmente, si la inhibición es necesaria, se presenta la tasa en libras por día necesaria para evitar la formación de hidratos.

Figura 18. Formulario Productos Finales

Productos finales

Componente	Fase Líquido	Fase Gas
N2	0.000643	0.006549
CO2	0.051408	0.050458
H2S	0	0
C1	0.286407	0.825268
C2	0.221514	0.091126
C3	0.223457	0.022239
i-C4	0.054695	0.002019
n-C4	0.076987	0.001893
i-C5	0.028314	0.000263
n-C5	0.022079	0.000143
n-C6	0.018561	3.4E-05
n-C7	0.015239	8E-06
n-C8	0	0
n-C9	0	0
n-C10	0.000695	0
n-C11	0	0
n-C12	0	0

Propiedad	Fase Gas	Unidades
Factor de Compr...	0.7823	
Peso Molecular	19.625	
Gravedad Espec...	0.6775	
Densidad	2.8005	lb/ft ³
Flujo Volumétrico	17.12	MMSCFD
Flujo Másico	36876.35	lb/hr

Propiedad	Fase Líquido	Unidades
Factor de Compr...	0.1201	
Peso Molecular	37.9052	
Gravedad API	189.7392	
Densidad	4.7116	lb/gal
Flujo Volumétrico	42.35	GPM

Inhibición

Tasa de MeOH lbm/Día

RZ90

Como formularios adicionales, se presentan ventanas que reportan las condiciones de operación del proceso de compresión, condensación, el acumulador, la válvula JT, para evidenciar el efecto del economizador sobre el sistema.

Figura 19 Formulario Compresor

Datos Sistema Sin Economizador	
Temperatura de Entrada	-37 °F
Temperatura de Salida	136.76 °F
Tasa del refrigerante	15045.4973 lb/h
Potencia del Compresor	723.6702 HP
Eficiencia	75 %

Sistema con Economizador	
Temperatura de Entrada	-37 °F
Temperatura Intermedia	47.05 °F
Temperatura de Salida	131.59 °F
Potencia del Compresor 1	247.5093 HP
Potencia del Compresor 2	370.6 HP
Tasa de Refrigerante C. 1	10688.2369 lb/h
Tasa de Refrigerante C. 2	14484.18 lb/h
Eficiencia	75 %


Figura 20 Formulario Condensador

Sistema sin Economizador	
Temperatura de Entrada	136.76 °F
Temperatura de Salida	85 °F
Duty del Condensador	5219411.9056 BTU/h

Sistema con Economizador	
Temperatura de Entrada	131.59 °F
Temperatura de Salida	85 °F
Duty del Condensador	4950819.1173 BTU/h

Figura 21 Formulario Acumulador

Acumulador



Sistema

Temperatura de Operación °F

Presión de Operación Psia

Figura 22 Formulario válvula JT

Válvula de Expansión (Joule-Thompson)



Sistema sin Economizador

Temperatura de Entrada °F

Temperatura de Salida °F

Caida de Presión psi

Sistema con Economizador

Temperatura de Entrada °F

Temperatura intermedia °F

Temperatura de Salida °F

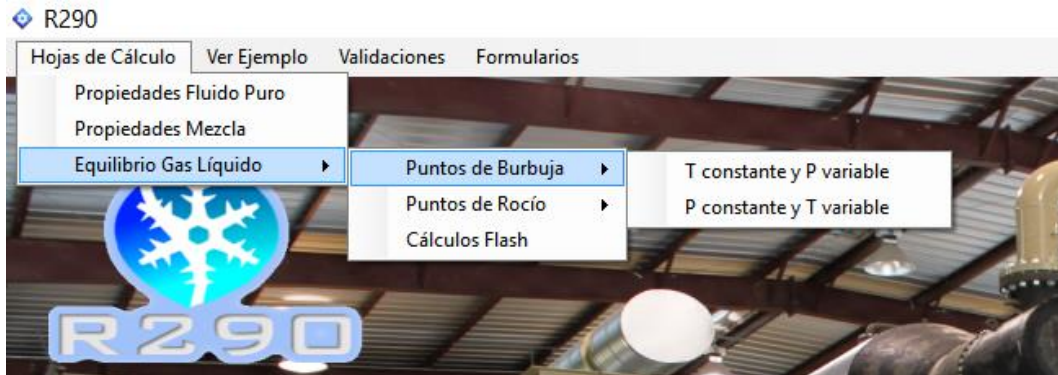
Caida de Presión V1 psi

Caida de Presión V2 psi

Por último, si el usuario desea ver las hojas de cálculo en la cuales se basó el diseño del software, en la esquina superior izquierda aparece un menú desplegable, el cual, al dar clic sobre los botones, da la información de la autoría y donde puede encontrar

los archivos originales, posteriormente se abre una copia del archivo original, para que el usuario si lo desea, tenga a la mano una hoja de cálculo para determinar a presión y temperatura valores puntuales.

Figura 23 Menú de Hojas de Cálculo



En la pestaña ejemplo se presenta un esquema de una planta donde se puede observar la función del proceso de refrigeración mecánica, en una planta de acondicionamiento de gas, y recuperación de GLP.

Figura 24 Etapa I Ejemplo de una Planta de procesamiento de Gas

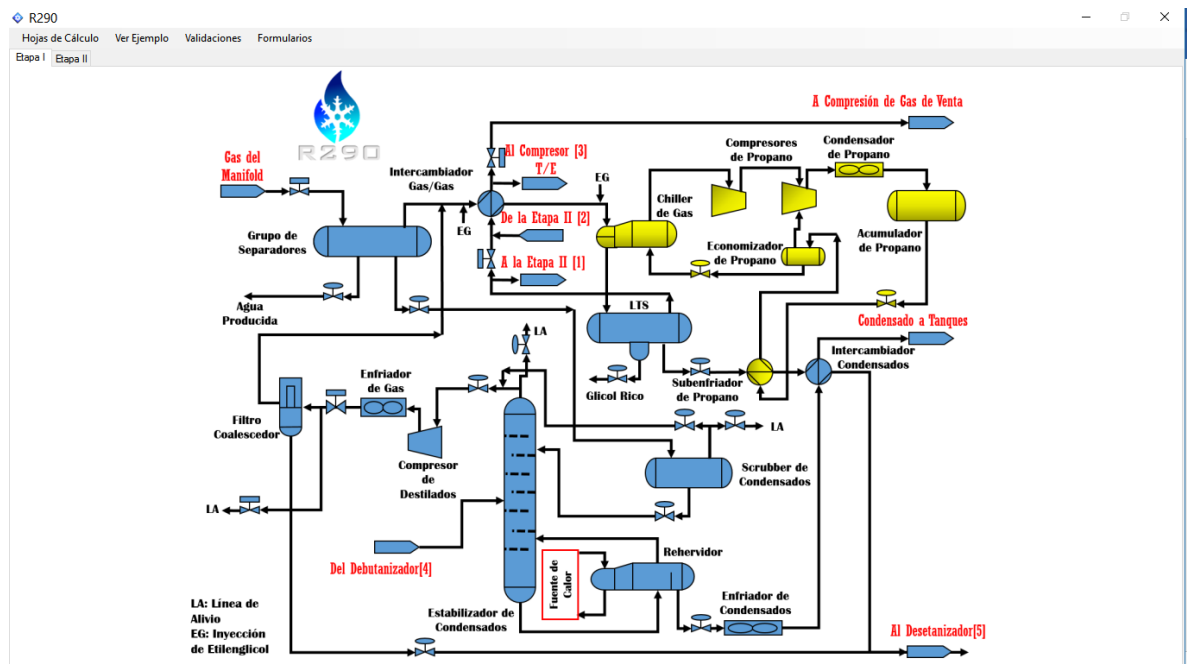
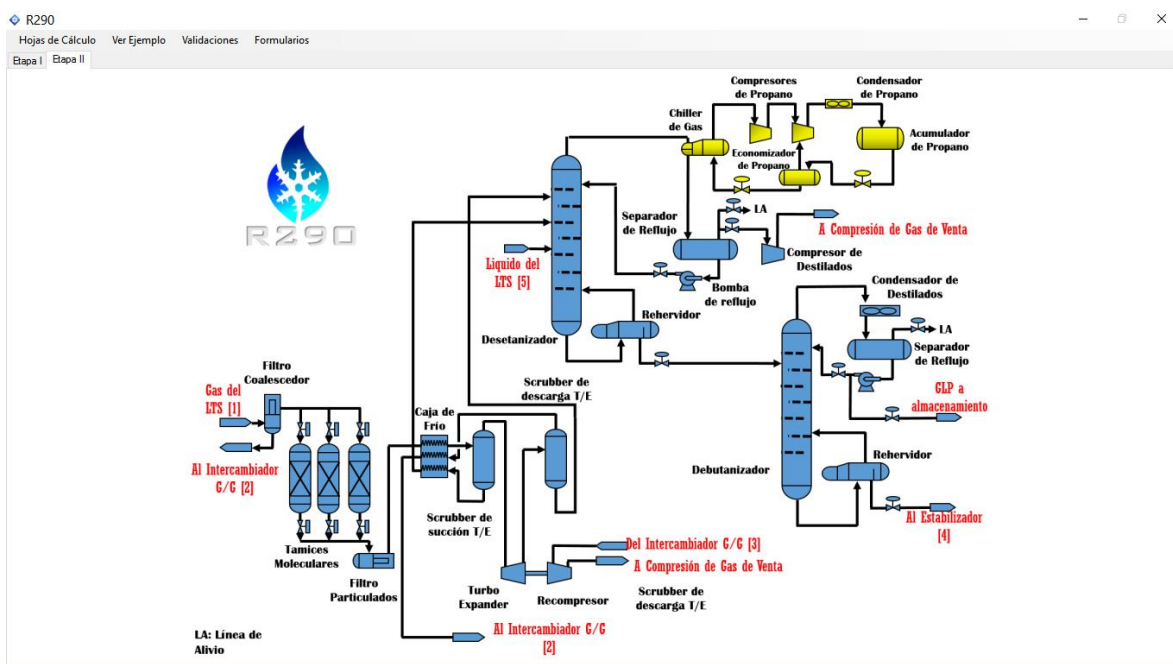


Figura 25 Etapa II Ejemplo de un Planta de Procesamiento de Gas



Adicionalmente, las otras dos pestañas, permiten al usuario acceder a las validaciones tanto para las envolventes de fases de los campos preestablecidos, como para casos de estudio de los campos Apiay y Cantagallo. En cuanto a la última pestaña, da acceso a los formularios utilizados en los módulos de cálculo.

3.2. Validación de los Cálculos

Para la validación de los cálculos se desarrolló por módulos, iniciando con el módulo de refrigeración, para esto se inicia con la validación de la envolvente, tanto para Presión y Temperatura, como para Presión Entalpía.

Nota: La entalpía al ser una propiedad sin un punto de referencia fijo, se generó un desfase estándar para poder hacer la comparación.

Tabla 1 Validación PT Envolvente

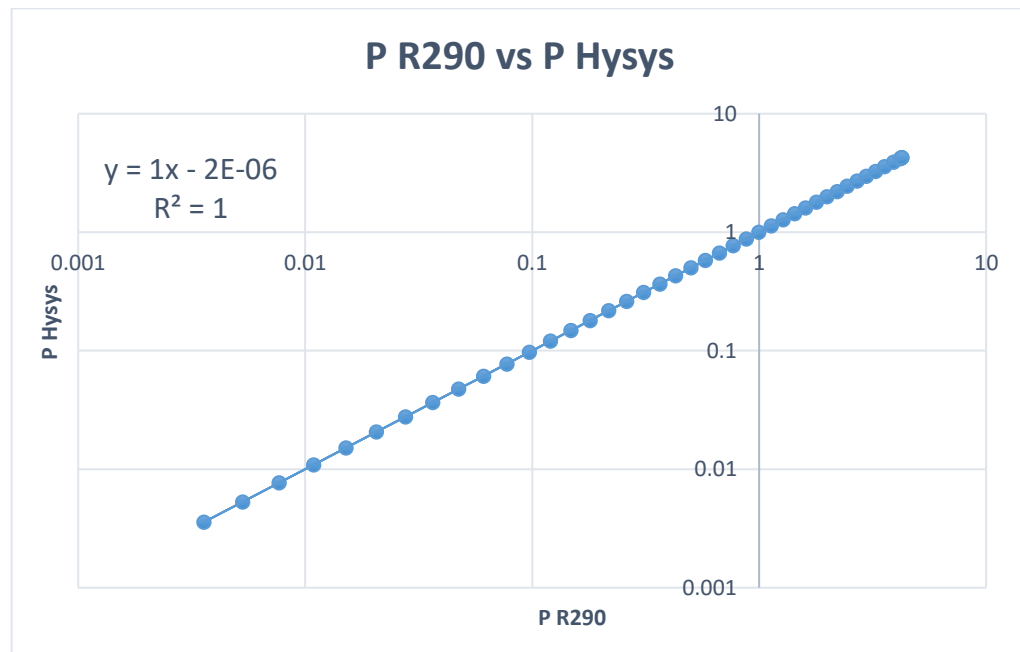
T [K]	P R290 [MPa]	P_Hysys [Mpa]	%Error
175	0.003577335	0.003577229	0.002985%

180	0.005306037	0.005305888	0.002806%
185	0.007685078	0.007684874	0.002643%
190	0.010890932	0.010890659	0.002502%
195	0.01512874	0.015128382	0.002367%
200	0.020633148	0.020632686	0.002238%
205	0.027668687	0.027668100	0.002119%
210	0.036529728	0.036528995	0.002006%
215	0.047540071	0.047539169	0.001898%
220	0.061052209	0.061051111	0.001798%
225	0.07744635	0.07744503	0.001704%
230	0.097129255	0.097127687	0.001614%
235	0.120532958	0.120531115	0.001529%
240	0.148113423	0.148111277	0.001449%
245	0.180349191	0.180346716	0.001373%
250	0.217740066	0.217737233	0.001301%
255	0.260805862	0.260802648	0.001233%
260	0.310085265	0.310081644	0.001168%
265	0.366134797	0.366130748	0.001106%
270	0.429527939	0.429523441	0.001047%
275	0.500854389	0.500849424	0.000991%
280	0.58071949	0.580714043	0.000938%
285	0.669743818	0.669737878	0.000887%
290	0.768562941	0.768556499	0.000838%
295	0.877827343	0.877820396	0.000791%
300	0.99820253	0.998195077	0.000747%
305	1.130369293	1.130361341	0.000704%
310	1.275024162	1.275015719	0.000662%
315	1.432880019	1.432871102	0.000622%
320	1.6046669	1.604657531	0.000584%
325	1.791132976	1.791123183	0.000547%
330	1.99304572	1.993035539	0.000511%
335	2.211193273	2.211182748	0.000476%
340	2.446386015	2.446375197	0.000442%
345	2.699458353	2.699447302	0.000409%
350	2.971270745	2.971259532	0.000377%
355	3.262711976	3.262700683	0.000346%
360	3.574701715	3.574690433	0.000316%
365	3.908193367	3.908182201	0.000286%
369	4.191132252	4.191121258	0.000262%
369.5	4.227537702	4.227526728	0.000260%

369.8	4.249493325	4.249482332	0.000259%
369.85	4.253160768	4.253149811	0.000258%
369.875	4.254993832	4.254984431	0.000221%

Se observa un error máximo en la envolvente de: 0.002985%

Figura 26 Comparación Visual P vs T Equilibrio Propano



La figura 15 muestra la relación entre la presión de equilibrio calculada por el software desarrollado y la presión calculada por Hysys en los mismos valores de temperatura. Se observa una cercanía bastante precisa a la relación 1:1

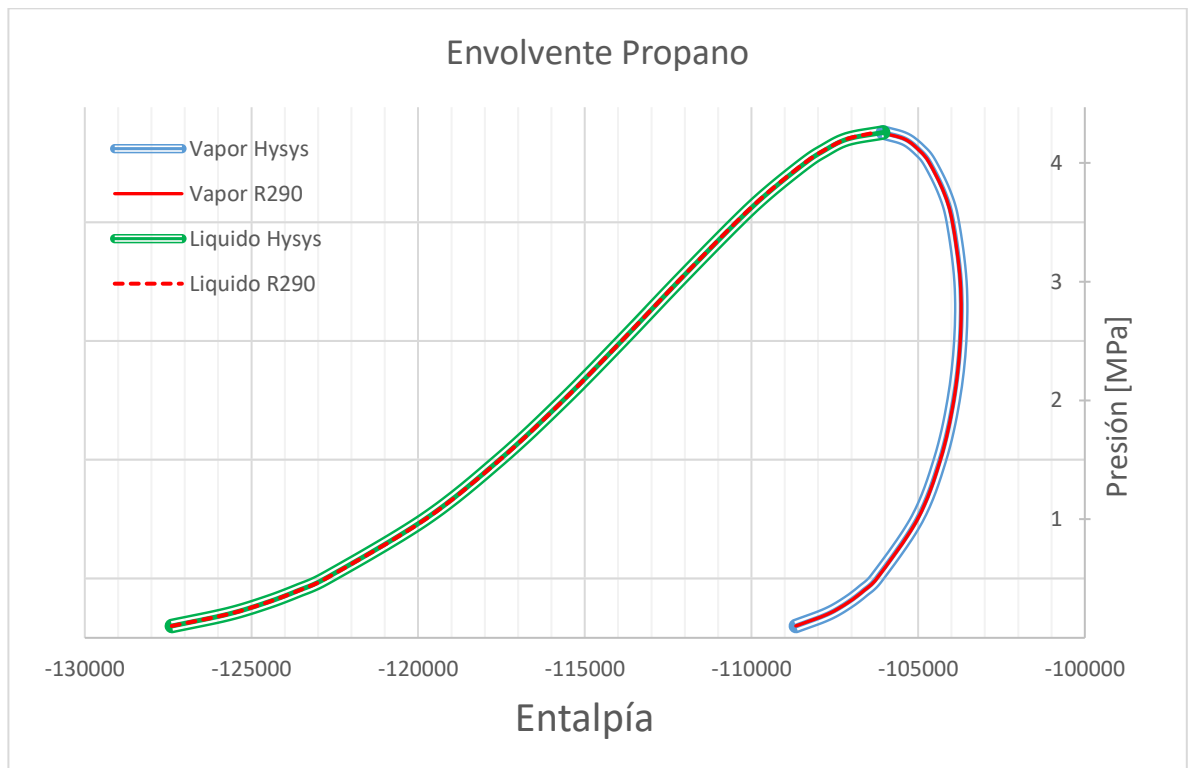
Tabla 2 Comparación entre Entalpías Hysys vs R290

P [Mpa]	Línea de Liquido	Línea de Liquido	%Error
	Hysys	R290	
0.1	-108666.8451	-108670.5594	0.00288%
0.2	-107721.4079	-107712.2917	0.00730%
0.3	-107102.5336	-107087.9897	0.01171%
0.4	-106634.728	-106617.4803	0.01399%

0.5	-106256.9869	-106238.4467	0.01512%
1	-105033.8349	-105016.4575	0.01452%
1.5	-104345.0602	-104332.8677	0.01037%
2	-103938.0647	-103931.9188	0.00531%
2.5	-103737.4555	-103737.5266	0.00008%
3	-103730.0425	-103736.1715	0.00549%
3.5	-103959.3785	-103971.4458	0.01098%
3.75	-104211.4656	-104226.6839	0.01407%
4	-104646.4933	-104664.2423	0.01645%
4.1	-104927.9047	-104946.8774	0.01770%
4.2	-105382.0304	-105403.0038	0.01981%
4.25625	-106053.7571	-106143.1705	0.22143%

En la Tabla 2 se observa que el error máximo es cuando se alcanza el punto crítico obteniendo un error del 0.22143%, el resto de valores presentan un error menor al 0.02%, lo que es conveniente al momento de realizar el ciclo de refrigeración para no tener desfases tan grandes.

Figura 27 Comparación Envolverte Propano



4. CONCLUSIONES

- Queda evidenciado que el desarrollo de software desde la academia es posible generando productos útiles para ser usados en la misma sin sacrificar exactitud de los resultados obtenidos, brindando al estudiante una herramienta de apoyo a su aprendizaje y logrando el fomento de un trabajo independiente y agradable.
- Se logró desarrollar una herramienta cuya secuencia permite al usuario hacerse una idea de lo que ocurre en un proceso de refrigeración de gas natural, en donde se evidencian procesos tales como intercambio de calor, expansión Joule Thompson y compresión. Además, se presenta con una interfaz agradable al usuario y de fácil acceso logrando el entendimiento de los fenómenos presentes, ya que permite al usuario tener una idea de los cálculos necesarios para continuar con los cálculos posteriores del proceso.
- Se desarrolló una herramienta basada inicialmente en calcular las propiedades del gas a partir de su composición para luego determinar su comportamiento a ciertas condiciones de presión y temperatura, arrojando excelentes resultados comparados con software comercial con un plus adicional que permite acceder a las hojas de cálculo utilizadas para su desarrollo.

5. RECOMENDACIONES

- Fomentar el desarrollo de software pedagógico permitiendo el uso de modelos de código libre con el fin de evitar esfuerzos innecesarios en la recreación de módulos, ya que desde un inicio pueden ser utilizados en varios software, facilitando tanto la actualización del pre-existente y promoviendo la generación de nuevos derivados.
- Diseñar en base al código fuente actual nuevos algoritmos que permitan la reducción de tiempos de cálculo identificando comportamientos generales de las variables, haciendo público estos avances y logrando así que el trabajo colaborativo desde diferentes áreas del conocimiento genere soluciones eficientes para ser aplicadas en ámbito académico y/o profesional.
- Implementar los algoritmos de equilibrio permitiendo generar envolventes de fase en una etapa de actualización del software con el objetivo de mejorar la versión actual, generando mejoras constantes evitando así que este quede obsoleto.
- Es recomendable el diseño de plantas de refrigeración con las otras dos tecnologías (JT y TurboExpander) con el fin de generar una suite de refrigeración robusto que permita abarcar la temática de refrigeración más ampliamente, teniendo en cuenta que las ecuaciones y el código queda disponible para facilitar el desarrollo de estas herramientas.

BIBLIOGRAFÍA

AHMED, Tarek. *Reservoir Engineering Handbook*. Houston TX : Gulf Publishing Company, 2000.

AXAOPOULOS, Petros and PITSILIS, Georgios. *Energy software programs for educational use*. 2006.

CAMACHO, Monica Yamile and MORANTES, Laura Suhey. *Análisis De Sensibilidades Aplicado A La Formación De Hidratos De Gas Natural Durante Su Transporte Por Gasoductos*. Bucaramanga : Universidad Industrial de Santander, 2013.

CAMPBELL, John M. *Gas conditioning and processing*. s.l. : Campbell Petroleum Series, 1992.

CARROLL, John. . *Natural Gas Hydrates: A Guide for Engineers*. 2da. Burlington : Gulf Professional Publishing, 2009.

GHOLAMREZA, Zahedi, ZOHRE, Karami and HAMED, Yaghoobi. *Prediction of hydrate formation temperature by both statistical models and artificial neural network approaches*. s.l. : Energy Conversion and Management 50, 2009.

GPSA. *ENGINEERING DATA BOOK*. Tulsa, Oklahoma : Gas Processors Suppliers Association , 2004.

HOWELL, John R. and BUCKIUS, Richard O. *Principios de Termodinámica para Ingeniería*. México D.F. : McGRAW HILL, 1990.

LONA, L.M.F., et al. *Developing an educational software for heat exchangers and heat exchanger networks projects*. 2000.

MARTÍN, Angel and MATO, Fidel. *Hint: An educational software for heat exchanger network design with the pinch method*. 2007.

WALAS, Stanley. *Phase equilibria in chemical engineering*. s.l. : Butterworth-Heinemann, 2013.

WHIPPLE, T. T. and TAYLOR, I. *Performance of the propane refrigeration system using centrifugal compressors*. 1951.

**Anexo A Ecuación de Peng-Robinson
(Fluido Puro)
Generación Diagrama de Mollier**

$$T_r = \frac{T}{T_c}$$

$$P_r = \frac{P}{P_c}$$

$$m = \begin{cases} 0.37464 + 1.5426\omega - 0.26992\omega^2 \\ 0.379642 + 1.48503\omega - 0.164423\omega^2 + .016666\omega^3 \text{ si } \omega > 0.49 \end{cases}$$

$$\alpha = [1 + m(1 - T_r^{0.5})]^2$$

$$a = 0.4572355289 \frac{(RT_c)^2}{P_c} \alpha$$

$$b = 0.0777960739 \frac{RT_c}{P_c}$$

$$A = \frac{aP}{(RT)^2}$$

$$B = \frac{bP}{RT}$$

$$Z^3 + (1 - B)Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad 25$$

$$Cp(T) = C_{pA}T + C_{pB}T^2 + C_{pC}T^3 + C_{pD}T^4 + C_{pE}T^5$$

$$H^{ig} - H_R^{ig} = C_{pA}(T - T_{ref}) + \frac{C_{pB}}{2}(T^2 - T_{ref}^2) + \frac{C_{pC}}{3}(T^3 - T_{ref}^3) + \frac{C_{pD}}{4}(T^4 - T_{ref}^4) \\ + \frac{C_{pE}}{5}(T^5 - T_{ref}^5)$$

$$H - H^{ig} = RT(Z - 1 - \frac{A}{B2^{1.5}}(1 + m \sqrt{\frac{T_r}{\alpha}} \ln \left[\frac{Z + (1 + \sqrt{2})B}{Z + (1 - \sqrt{2})B} \right])$$

$$H_{ref} = ZRT \text{ si } U_R = 0 \quad \text{ó} \quad H_{ref} = 0 \text{ si } U_R = -ZRT$$

$$H = (H - H^{ig}) + (H^{ig} - H_R^{ig}) - (H - H^{ig})_{ref} + H_{ref} \quad 26$$

²⁵ La metodología de cálculo para las raíces está disponible en el Anexo B del presente documento.

²⁶ El termino $(H - H^{ig})_{ref}$ es el valor calculado de $(H - H^{ig})$ a las condiciones de Presión y Temperatura de referencia seleccionadas por el usuario.

$$S^{ig} - S_R^{ig} = C_{pA} \text{Log} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right) + C_{pB} (T - T_{ref}) + \frac{C_{pC}}{2} (T^2 - T_{ref}^2) + \frac{C_{pD}}{3} (T^3 - T_{ref}^3) \\ + \frac{C_{pE}}{4} (T^4 - T_{ref}^4) - R \text{Ln} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)$$

$$S - S^{ig} = R \text{Ln}(Z - B) - \frac{AR}{B2^{1.5}} m \sqrt{\frac{T_r}{\alpha}} \text{Ln} \left[\frac{Z + (1 + \sqrt{2})B}{Z + (1 - \sqrt{2})B} \right]$$

$$S_{ref} = 0$$

$$S = (S - S^{ig}) + (S^{ig} - S_R^{ig}) - (S - S^{ig})_{ref} + S_{ref}$$

$$\varphi_i = P \exp \left[Z - 1 - \text{Ln}(Z - B) - \frac{A}{B2^{1.5}} \text{Ln} \left[\frac{Z + (1 + \sqrt{2})B}{Z + (1 - \sqrt{2})B} \right] \right]$$

Donde:

$$R = \text{Contante de los gases } 8.314472 \left[\frac{\text{cm}^3 \text{MPa}}{\text{mol K}} \right]$$

$T = \text{Temperatura [K]}$

$T_c = \text{Temperatura Crítica [K]}$

$P = \text{Presión [MPa]}$

$P_c = \text{Presión Crítica [MPa]}$

$\omega = \text{Factor Acéntrico}$

$C_p(T) = \text{Capacidad Calorífica del gas ideal} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right]$

$H = \text{Entalpía} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \right]$

$S = \text{Entropía} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}} \right]$

$\varphi_i = \text{Fugacidad de la fase } i \text{ [Mpa]}$

Anexo B Determinación de las raíces de una función cúbica Cálculo de Z

$$Z^3 + a_2 Z^2 + a_1 Z + a_3 = 0$$

$$p = \frac{3a_1 - a_2^2}{3}$$

$$q = \frac{2a_2^3 - 9a_2 a_1 + 27a_3}{27}$$

$$R = \frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}$$

Si $R > 0$ entonces solo hay una raíz real

Si $R < 0$ entonces hay tres raíces reales

Si $R = 0$ entonces hay tres raíces (dos de ellas iguales)

- Si solo hay una raíz real:

$$P = \sqrt[3]{\sqrt{R} - \frac{q}{2}}$$

$$Q = \sqrt[3]{-\sqrt{R} - \frac{q}{2}}$$

$$Z_0 = P + Q - \frac{a_2}{3}$$

- Si hay tres raíces reales:

$$m = 2 \sqrt{-\frac{p}{3}}$$

$$\theta = \frac{\text{Acos}\left(\frac{3q}{pm}\right)}{3}$$

$$Z_g = m \text{Cos}(\theta) - \frac{a_2}{3}$$

$$Z_l = m \text{Cos}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{a_2}{3}$$

$$Z_{intermedia}^{27} = m \text{Cos}\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) - \frac{a_2}{3}$$

²⁷ Cuando $R=0$ el valor de $Z_{intermedia}$ se iguala a una de las otras dos raíces.

Anexo C Propiedades de mezclas de fluidos

$$T_{ri} = \frac{T}{T_{ci}}$$

$$P_{ri} = \frac{P}{P_{ci}}$$

$$m_i = \begin{cases} 0.37464 + 1.5426\omega_i - 0.26992\omega_i^2 \\ 0.379642 + 1.48503\omega_i - 0.164423\omega_i^2 + .016666\omega_i^3 \text{ si } \omega_i > 0.49 \end{cases}$$

$$\alpha_i = [1 + m_i(1 - T_{ri}^{0.5})]^2$$

$$a_i = 0.4572355289 \frac{(RT_{ci})^2}{P_{ci}} \alpha_i$$

$$b_i = 0.0777960739 \frac{RT_{ci}}{P_{ci}}$$

$$a_m = \sum_i \sum_j x_i x_j \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij})$$

$$b_m = \sum_i x_i b_i$$

$$A_m = \frac{a_m P}{(RT)^2}$$

$$B_m = \frac{b_m P}{RT}$$

$$\frac{da_m}{dT} = \sum_i \sum_j x_i x_j \left(\frac{-\sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij})}{2\sqrt{T}} \left(\frac{m_j}{\sqrt{\alpha_j T_{cj}}} + \frac{m_i}{\sqrt{\alpha_i T_{ci}}} \right) \right)$$

$$Z^3 + (1 - B_m)Z^2 + (A_m - 2B_m - 3B_m^2)Z - (A_m B_m - B_m^2 - B_m^3) = 0 \quad 28$$

$$\overline{C_{pj}} = \frac{\sum_i^n x_i C_{pji}}{n}$$

$$H_m^{ig} = \overline{C_{pA}}(T - T_{ref}) + \frac{\overline{C_{pB}}}{2}(T^2 - T_{ref}^2) + \frac{\overline{C_{pC}}}{3}(T^3 - T_{ref}^3) + \frac{\overline{C_{pD}}}{4}(T^4 - T_{ref}^4) \\ + \frac{\overline{C_{pE}}}{5}(T^5 - T_{ref}^5)$$

²⁸ La metodología de cálculo para las raíces está disponible en el Anexo B del presente documento.

$$H - H_m^{ig} = 1 * 10^6 \left[RT(Z - 1) + \frac{T \frac{da_m}{dT} - a_m}{2\sqrt{2}b_m} \ln \left(\frac{Z + (\sqrt{2} + 1)B_m}{Z - (\sqrt{2} - 1)B_m} \right) \right]$$

$$H = (H - H_m^{ig}) - H_m^{ig}$$

$$S_m^{ig} = \overline{C_{pA}} \ln \left(\frac{T}{T_{ref}} \right) + \overline{C_{pB}}(T - T_{ref}) + \frac{\overline{C_{pC}}}{2}(T^2 - T_{ref}^2) + \frac{\overline{C_{pD}}}{3}(T^3 - T_{ref}^3) + \frac{\overline{C_{pE}}}{4}(T^4 - T_{ref}^4) - R * \ln \left(\frac{P}{P_{ref}} \right)$$

$$S - S_m^{ig} = 1 * 10^6 \left[R \ln(Z - B_m) + \frac{\frac{da_m}{dT}}{2\sqrt{2}b_m} \ln \left(\frac{Z + (\sqrt{2} + 1)B_m}{Z - (\sqrt{2} - 1)B_m} \right) \right]$$

$$S = (S - S_m^{ig}) - S_m^{ig}$$

Donde:

$$R = \text{Constante de los gases } 8.314472e - 6 \left[\frac{m^3 MPa}{mol K} \right]$$

$T = \text{Temperatura [K]}$

$T_{ci} = \text{Temperatura Crítica del componente } i [K]$

$P = \text{Presión [MPa]}$

$P_{ci} = \text{Presión Crítica del componente } i [MPa]$

$\omega_i = \text{Factor Acéntrico del componente } i$

$C_{pji} = \text{Coeficiente } j \text{ de la función } Cp(T) \text{ del componente } i \text{ donde } j = A, B, C, D, E$

$T_{ref} = \text{Temperatura de Referencia}$

$P_{ref} = \text{Presion de Referencia}$

$$H = \text{Entalpía} \left[\frac{kJ}{kmol} \right]$$

$$S = \text{Entropía} \left[\frac{kJ}{kmol K} \right]$$

Anexo D Contenido de Agua

Caso 1. Gas Dulce

Presiones menores a 100 psia:

$$\tau = 1 - \frac{T}{647.096}$$

$$\ln\left(\frac{P^V}{P_c}\right) = (-7.85951783\tau + 1.84408259\tau^{1.5} - 11.7866497\tau^3 + 22.6807411\tau^{3.5} - 15.9618719\tau^4 + 1.80122502\tau^{7.5}) * \left(\frac{647.096}{T}\right)$$

$$\frac{lb_m H_2O}{MMSCF} = 10^6 \left(\frac{P^V}{P}\right) \left(\frac{18 lb_m}{379.5 SCF}\right)$$

$P =$ Presión [MPa]

$T =$ Temperatura [K]

Presiones Mayores a 100 psia:

$$\frac{lb_m H_2O}{MMSCF} = \left(\frac{14.696 A}{P} + B\right) C$$

$$A = a_A e^{\left[\frac{(T-b_A)^2}{2c_A^2}\right]}$$

$$B = a_B e^{\left[\frac{(T-b_B)^2}{2c_B^2}\right]}$$

T inferior	T superior	a _A	b _A	c _A	a _B	b _B	c _B
°F	°F	FPS (Foot-Pound-Second)			FPS (Foot-Pound-Second)		
-40	32	163.1849	210.4999	66.9271	0.5464	211.1358	78.9684
32	95	1011.5279	303.5572	82.8892	2.3922	308.2169	97.0837
95	158	8012.0065	444.4736	108.1215	5.1483	367.0226	107.8714
158	212	8101.6962	450.5056	110.156	1.5611	227.12	59.4634
41	149	3698.8338	386.4605	97.5639	5.6269	376.4931	110.1694

$P =$ Presión [psia]

$T =$ Temperatura [°F]

$C = 62.5$

Temperaturas Menores a -40 °F:

$$\frac{lb_m H_2O}{MMSCF} = A_k B_k^T$$

$$A_k = 4.34322 + \frac{1.35912(P - 350)}{600} - 6.82391 \left(\frac{(P - 350)}{600} \right)^2$$

$$+ 3.95407 \left(\frac{(P - 350)}{600} \right)^3$$

$$B_k = 1.03776 - \frac{0.02865(P - 350)}{600} + 0.04198 \left(\frac{(P - 350)}{600} \right)^2$$

$$- 0.01945 \left(\frac{(P - 350)}{600} \right)^3$$

$P = \text{Presión [Psia]}$

$T = \text{Temperatura [°F]}$

Caso 2: Gas Acido

$$HEC = 0.7x_{H_2S} + x_{CO_2}$$

$$\alpha = \frac{195.262}{1 + 26.162e^{-0.0957HEC}}$$

$$\beta = -\frac{0.8374}{1 + 27.813e^{-0.0991HEC}}$$

$$\gamma = \frac{0.0011}{1 + 22.051e^{(-0.0861HEC)}}$$

$$X = \alpha + \beta T + \gamma T^2$$

$$a = 1.00 + 6.73 \times 10^{-5}P - 8.98 \times 10^{-8}P^2 + 4.48 \times 10^{-11}P^3 - 6.55 \times 10^{-15}P^4$$

$$b = 0.00059 - 1.78 \times 10^{-7}P + 5.28 \times 10^{-9}P^2 - 2.03 \times 10^{-12}P^3 + 2.79 \times 10^{-16}P^4$$

$$c = 3.18 \times 10^{-6} + 3.24 \times 10^{-8}P + 3.08 \times 10^{-11}P^2 + 2.28 \times 10^{-16}P^3 - 2.60 \times 10^{-19}P^4$$

$$F = a + bX + cX^2$$

$$\frac{lb_m H_2O}{MMSCF} = F \frac{lb_m H_2O}{MMSCF_{GAS DULCE}}$$

$x_{H_2S}, x_{CO_2} = \text{Porcentaje molar de los componentes no hidrocarburos [%]}$

$P = \text{Presión [psia]}$

***Anexo E Propiedades Generales del Gas
Natural***

$$Q_v = 41666.66 \frac{ZQT P_{sc}}{PT_{sc}}$$

$$M_{mix} = \sum x_i M_i$$

$$\rho = \frac{PM_{mix}}{ZRT}$$

$$Q_m = Q_v * \rho$$

$$Q_{mol} = \frac{Q_m}{M_{mix}}$$

$$SG_g = \frac{M_{mix}}{28.97}$$

$$API = \frac{141.5}{\gamma_l} - 131.5$$

$$\gamma_l = \frac{\rho_l}{8.4655}$$

$Z =$ Factor de compresibilidad

$P_{sc}, T_{sc} =$ Presión y Temperatura a Condiciones Estandar [14.696 psia, 520 R]

$P, T =$ Presión y Temperatura [psia, R]

$R =$ Contante de los Gases $\left[10.73 \frac{\text{psia ft}^3}{\text{R lbmol}} \right]$

$x_i =$ Componente i de la mezcla

$Q_v =$ Caudal Volumétrico $\left[\frac{\text{ft}^3}{\text{h}} \right]$

$M_{mix} =$ Peso Molecular de la Mezcla

$\rho =$ Densidad de la Mezcla

$Q_m =$ Flujo Másico $\left[\frac{\text{lb}}{\text{hr}} \right]$

$Q_{mol} =$ Flujo Molar $\left[\frac{\text{lbmol}}{\text{hr}} \right]$

$SG_g =$ Gravedad Específica del Gas

$API =$ Gravedad API [°]

$\gamma_l = \text{Gravedad Específica del Líquido}$

$\rho_l = \text{Densidad del Líquido} \left[\frac{\text{lb}}{\text{Gal}} \right]$