

DESARROLLO DE UN SOFTWARE DIDÁCTICO PARA EL DISEÑO DE
PLANTAS DE DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL CON TRIETILENGLICOL
(TEG)

ANDRÉS ESTEBAN PEÑA PIARPUSAN
ARNOLD SALAZAR STEVEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2016

DESARROLLO DE UN SOFTWARE DIDÁCTICO PARA EL DISEÑO DE
PLANTAS DE DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL CON TRIETILENGLICOL
(TEG)

ANDRÉS ESTEBAN PEÑA PIARPUSAN

ARNOLD SALAZAR STEVEZ

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 INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA

2016

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	18
1. SOFTWARE EN LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LA INGENIERIA	20
1.1. COMIENZOS DEL SOFTWARE EDUCATIVO	20
1.2. INTERACCIÓN SOFTWARE – PERSONA	21
1.3. DESARROLLOS ACTUALES DEL SOFTWARE	22
1.4. APARICIÓN DEL SOFTWARE EDUCATIVO	23
1.5. DEFINICIÓN DEL SOFTWARE EDUCATIVO	24
1.6. ROL DEL DOCENTE Y USO DEL SOFTWARE	25
2. SOFTWARE HYTEG	27
2.1. UTILIDAD INGENIERIL	27
2.2. UTILIDAD PEDAGÓGICA	28
3. FUNDAMENTACION TEÓRICA	30
3.1. PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS FLUIDOS	30
3.1.1. GAS NATURAL	30
3.1.1.1. PESO MOLECULAR APARENTE	30
3.1.1.2. GRAVEDAD ESPECÍFICA	31
3.1.1.3. ECUACIÓN DE ESTADO DE PENG-ROBINSON	31
3.1.1.4. DENSIDAD	34
3.1.1.5. CAPACIDAD CALORÍFICA	34
3.1.1.6. CONTENIDO DE AGUA EN GAS DULCE	35
3.1.1.7. CONTENIDO DE AGUA EN GAS AGRIO	35

3.1.2.	FRACCIÓN PESADA	37
3.1.2.1.	PROPIEDADES CRÍTICAS C7 PLUS	37
3.1.2.2.	FACTOR ACÉNTRICO C7 PLUS	38
3.1.3.	TRITILENGLICOL (TEG)	39
3.1.3.1.	GRAVEDAD ESPECÍFICA	39
3.1.3.2.	CAPACIDAD CALORÍFICA	40
3.1.3.3.	VISCOSIDAD DINÁMICA	40
3.1.4.	NOMENCLATURA	41
3.2.	DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL CON TEG	42
3.2.1.	CONCENTRACIÓN MÍNIMA DE TEG	44
3.2.2.	TASA DE CIRCULACIÓN DE TEG Y NÚMERO DE ETAPAS DE EQUILIBRIO	46
3.2.3.	NOMENCLATURA	48
3.3.	DISEÑO DE UNIDADES	49
3.3.1.	CONTACTOR	49
3.3.1.1.	PLATOS DE CONTACTO	49
3.3.1.2.	EMPAQUES ESTRUCTURADOS	50
3.3.2.	REHERVIDOR	53
3.3.2.1.	CARGA TÉRMICA TOTAL	54
3.3.2.2.	GAS DE DESPOJO	54
3.3.3.	INTERCAMBIADOR L/R	56
3.3.4.	BOMBA TEG	57
3.3.5.	INTERCAMBIADOR GAS/TEG	57
3.3.6.	NOMENCLATURA	58

4. METODOLOGIA DE DISEÑO	60
4.1. ANÁLISIS DE REQUISITOS	61
4.2. DISEÑO DEL SISTEMA	63
4.2.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DE NIVEL SUPERIOR	63
4.2.2. DIAGRAMA DE BLOQUES DE SEGUNDO NIVEL	64
4.2.3. DIAGRAMAS DE BLOQUES DE DETALLE	65
4.3. DISEÑO DEL PROGRAMA	67
4.3.1. DISEÑO DE ALGORITMOS DE SOLUCIÓN	67
4.3.2. DISEÑO DE LA INTERFAZ DE USUARIO	68
4.3.2.1. SEGUNDO PLANO	69
4.3.2.2. DATOS DE ENTRADA	70
4.3.2.3. ESQUEMA GENERAL	71
4.3.2.4. EQUIPOS	72
4.3.2.5. LOGOTIPO HYTEG	76
4.4. PROGRAMACIÓN	77
5. MANUAL DE USUARIO	78
6. VALIDACION DEL SOFTWARE	96
6.1. CONTENIDO DE AGUA	96
6.1.1. GAS DULCE	97
6.1.2. GAS AGRIO	100
6.2. DIAMETRO DE EMPAQUE ESTRUCTURADO	103
6.3. SISTEMA DE REGENERACIÓN DE TEG	110
6.3.1. INTERCAMBIADOR L/R	111

6.3.2. REHERVIDOR	111
6.3.3. BOMBA DE RECOMPRESIÓN	112
6.3.4. INTERCAMBIADOR TEG/GAS	113
7. CONCLUSIONES	115
8. RECOMENDACIONES	117
BIBLIOGRAFIA	118
ANEXO	122

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfica de la Correlación Generalizada de Caída de Presión modificada por Kister & Gill para empaques estructurados.....	53
Figura 2. Metodología de Cascada-	60
Figura 3. Diagrama de Bloques de Primer Nivel. Sistema de Deshidratación de Gas Natural con TEG.	64
Figura 4. Diagrama de bloques de segundo nivel. Módulos de cálculo de la torre de absorción.	65
Figura 5. Diagrama de Detalle. Modelos matemáticos para el cálculo de las propiedades físicas del gas.	66
Figura 6. Diagrama de flujo para el cálculo de la concentración de TEG pobre utilizando la correlación de Bahadori & Vuthaluru (2009).	68
Figura 7. Ventana de Segundo Plano “HYTEG”	69
Figura 8. Ventana “Datos de Entrada”.	70
Figura 9. Ventana “Esquema General”. Inicia la secuencia de diseño resaltando el contactor.	71
Figura 10. Ventana “Esquema General”. Permite la navegación entre los diferentes equipos del sistema de deshidratación de gas.	72
Figura 11. Ventana “R. Recirculación & Numero de Etapas Teóricas”	72
Figura 12. Ventana “Rehervidor”	75
Figura 13. Ventana “Filtro Separador”	75
Figura 14. Ventana “Separador Trifásico”	76
Figura 15. Logotipo HYTEG	76
Figura 16. Mensaje Inicial Ventana “Datos de Entrada”	78
Figura 17. Pestañas. Ventana “Datos de Entrada”	78
Figura 18. Pestaña 1, Ventana “Datos de Entrada”.	79
Figura 19. Pestaña 2, Ventana “Datos de Entrada”.	80
Figura 20. Pestaña 3, Ventana “Datos de Entrada”.	81

Figura 21. Pestaña 4, Ventana “Datos de Entrada”	82
Figura 22. Ventana “Esquema de Diseño”, Unidad Contactora Habilitada.	82
Figura 23. Ventana “Diseño del Contactor”, Modulo “Temperatura de Rocío de agua en el Gas”	83
Figura 24. Pestaña 1, ventana “Dewpoint“	84
Figura 25. Pestaña 2, Venta “DewPoint”	85
Figura 26. Sección Pestaña 2, Ventana “DewPoint”	86
Figura 27. “Ventana Factor de Corrección”	86
Figura 28. Ventana “Diseño del Contactor”, Modulo “Concentración en Peso TEG Pobre”	87
Figura 29. Ventana "Concentración de TEG pobre"	88
Figura 30. Ventana “Diseño del Contactor”, Modulo “Relación de Recirculación & Número de Etapas Teóricas”	89
Figura 31. Ventana “R. Recirculación y Número de Etapas Teóricas”	89
Figura 32. Ventana “Diseño del Contactor”	90
Figura 35. Ventana “Esquema de Diseño”	93
Figura 36. Ventana “Intercambiador Glicol/Glicol”	93
Figura 37. Patrón de las ventanas.	94
Figura 38. Esquema Completo	94
Figura 39. Ventana “Filtro Separador”	95
Figura 43. Comparación del contenido de agua de un gas agrio a presión constante.	102
Figura 44. Comparación de contenido de agua de gas agrio a temperatura constante.	103
Figura 45. Sistema de Deshidratación de Gas Natural con TEG.	174
Figura 46. Módulos de Cálculo para el Dimensionamiento de la Torre de Absorción.	174
Figura 46. Datos de Entrada.	175
Figura 47. Módulo de Propiedades del Gas Natural	175
Figura 48. Módulo de Propiedades del Gas Natural	176

Figura 49. Módulo de Contenido de Agua del Gas.	177
Figura 52. Módulo de Concentración de TEG pobre.....	178
Figura 53. Módulo de Relación de Recirculación TEG y Número de Etapas Teóricas.	178
Figura 54. Módulo de Tasa de Circulación de TEG.	179
Figura 55. Módulo de Concentración de TEG rico.	179
Figura 56. Módulo de Diámetro de la Torre de Platos.....	180
Figura 57. Módulo de la Altura de la Sección de Platos.....	180
Figura 58. Módulo de Diámetro de la Torre Empacada.	181
Figura 59. Módulo de Altura de la Sección de Empaques.	181
Figura 62. Propiedades Críticas de C7+.	184
Figura 63. Peso Molecular y Gravedad Especifica del Gas.	184
Figura 64. Calor Especifico del Gas.....	185
Figura 65. Gravedad Específica TEG.	186
Figura 66. Capacidad Calorífica TEG	187
Figura 67. Contenido de Agua de Gas Dulce.....	188
Figura 68. Contenido de Agua de Gas Agrio.	189
Figura 69. Temperatura de Roció del Agua en el Gas de Salida.	190
Figura 72. Diámetro de Torre Empacada.....	193

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características principales de los softwares educativos.....	25
Tabla 2. Coeficientes de Interacción Binaria k_{ij}	32
Tabla 3. Factor Acéntrico por Componente, ω	33
Tabla 4. Parámetros para la Correlación Generalizada Cp.	34
Tabla 5. Parámetros de la Correlación para Contenido de Agua de Gas Dulce....	35
Tabla 6. Parámetros de Correlación Riazi & Daubert.....	38
Tabla 7. Parámetros de la Correlación de Gravedad Específica TEG.....	39
Tabla 8. Parámetros de la Correlación de Capacidad Calorífica TEG.....	40
Tabla 9. Parámetros de la Correlación de Viscosidad Dinámica TEG.....	41
Tabla 10. Nomenclatura de la sección “Propiedades Físicas de los Fluidos”.....	41
Tabla 11. Parámetros de Correlación de Concentración Mínima TEG.....	45
Tabla 12. Parámetros de la correlación para determinar la tasa de circulación de TEG pobre y el número de etapas teóricas de la torre de absorción.	47
Tabla 13. Parámetros de la correlación para determinar la tasa de circulación de TEG pobre y el número de etapas teóricas de la torre de absorción.	47
Tabla 14. Nomenclatura de la sección “Deshidratación de Gas Natural con TEG”	48
Tabla 15. Factores de Empaque. GPDC modificada por Kister & Gill.	52
Tabla 16. Parámetros de la correlación para el cálculo de la tasa de gas de despojo en el rehervidor.	55
Tabla 17. Nomenclatura de la sección “Diseño de Unidades”.....	58
Tabla 18. Listado de Formularios.	62
Tabla 19. Comparación del contenido de agua variando la presión y temperatura del gas.	98
Tabla 20. Comparación del contenido de agua variando la temperatura del gas y el contenido de gases ácidos.	101

Tabla 21. Comparación del contenido de agua variando la presión del gas y el contenido de gases ácidos.	102
Tabla 22. Comparación diámetro de empaque Flexipack 1y, 1.6y, 2y.	104
Tabla 23. Comparación de diámetro de empaque Flexipack 3y, 4y.	105
Tabla 24. Comparación de diámetro de empaque Flexipack 1x, 1.6x.	105
Tabla 25. Comparación de diámetro de empaque Flexipack 2x, 3x.	106
Tabla 26. Comparación de diámetro de empaque Flexipack HC 1y, 2y.	106
Tabla 27. Comparación de diámetro de empaque Mellapack 500, 350.	107
Tabla 28. Comparación de diámetro de empaque Mellapack 250, 125.	107
Tabla 29. Comparación de diámetro de empaque Flexeramic 28, 48.	108
Tabla 30. Comparación de diámetro de empaque Flexeramic 88 y Sulker BX. ...	108
Tabla 31. Comparación de diámetro de empaque Gemapack 4A, 3A, 2A.	109
Tabla 32. Comparación de diámetro de empaque Gemapack 1.5A, 1A.	109
Tabla 33. Comparación de la carga térmica del intercambiador L/R.	111
Tabla 34. Comparación de la carga térmica total del rehervidor.	112
Tabla 35. Comparación de la potencia de la bomba de recompresión.	113
Tabla 36. Comparación de la carga térmica del intercambiador TEG/gas.	113
Tabla 37. Propiedades Físicas del Gas Natural.	123
Tabla 38. Propiedades Físicas Fracción C7+.	123
Tabla 39. Propiedades Físicas del TEG.	124
Tabla 40. Contenido de Agua del Gas Natural.	124
Tabla 41. Diseño del Contactador.	125
Tabla 42. Diseño Intercambiador L/R.	126
Tabla 43. Diseño Rehervidor.	126
Tabla 44. Diseño Bomba de Recompresión.	127
Tabla 45. Diseño Intercambiador TEG/gas.	127

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	122
ANEXO B	128
ANEXO C	173
ANEXO D	182

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE UN SOFTWARE DIDÁCTICO PARA EL DISEÑO DE PLANTAS DE DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL CON TRIETILENGLICOL (TEG) *

AUTOR: ANDRÉS ESTEBAN PEÑA PIARPUSAN
ARNOLD SALAZAR STEVEZ * *

PALARAS CLAVES: Deshidratación, gas natural, trietilenglicol, TEG, software.

DESCRIPCIÓN:

En el diseño de una planta de deshidratación de gas natural con TEG existe una gran cantidad de información requerida lo cual centra al estudiante en el desarrollo de los cálculos necesarios y pone en un segundo plano la metodología de diseño y el análisis de los resultados obtenidos.

La generación de un ambiente adecuado para el aprendizaje de este proceso por medio de una herramienta software didáctica es el objetivo del presente proyecto. Como resultado se desarrolló la aplicación HYTEG que permite al usuario el diseño de este tipo de plantas siguiendo una metodología secuencial y mostrando información relevante en forma de imágenes, gráficas y datos numéricos en diferentes etapas definidas en la herramienta.

Además, se creó un conjunto de formularios, tablas y graficas accesibles desde la aplicación que permiten al usuario profundizar su conocimiento tanto el desarrollo del diseño ingenieril como también en la estructura general de la herramienta y los algoritmos de solución desarrollados. Por último, se realizó una validación de los datos entregados por la aplicación tomando como referencia la herramienta comercial HYSYS.

Al usar un entorno de desarrollo dirigido a objetos para la creación de la herramienta, el resultado final es una aplicación amigable, dinámica y de fácil interacción que facilita al estudiante en su proceso cognitivo.

* Proyecto de Grado

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

ABSTRACT

TITLE: DESARROLLO DE UN SOFTWARE DIDÁCTICO PARA EL DISEÑO DE PLANTAS DE DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL CON TRIETILENGLICOL (TEG) *

AUTHOR: ANDRÉS ESTEBAN PEÑA PIARPUSAN
ARNOLD SALAZAR STEVEZ * *

KEYWORDS: Dehydration, natural gas, triethylene glycol, TEG, software.

DESCRIPTION:

In the design of a natural gas dehydration plant with TEG there is a great quantity of required information which focuses the student in the application of the necessary calculations and overshadows the design methodology and the analysis of the obtained results.

The creation of an adequate learning environment of this process by means of a didactic software is the objective of the current project. As a result, the application HYTEG was developed which allows the user to design this type of plants following a sequential methodology and displaying relevant information in the form of images, graphs and numeric data in different stages defined in the program.

Furthermore, it was created a set of forms, tables and graphs accessible from the application that enables the user to increase his knowledge in the development of this engineering design as well as in the general structure of the software and the algorithms used. Additionally, a validation of the results delivered by the application was performed taking as reference the commercial software HYSYS.

Due to the use of an object-oriented environment for the creation of this software, the final result was a friendly, dynamic and interactive application that helps the students in his cognitive process.

* 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 software didáctica de uso académico para el modelamiento y diseño de un sistema de deshidratación de gas natural por medio del contacto con TEG. En otras palabras, este software, llamado HYTEG, se centra en la determinación del contenido de agua del gas, el diseño detallado de la torre de absorción por medio de empaques estructurados y un diseño básico de los equipos utilizados en un sistema de regeneración de TEG. Al mismo tiempo, presenta al usuario una interface gráfica amigable que muestra, de forma secuencial, el desarrollo de los cálculos realizados por la aplicación.

El primer capítulo se centra en el planteamiento y justificación del problema que representa el manejo de toda la información necesaria para el diseño de este tipo de procesos por parte del estudiante. Además, se definen un conjunto de objetivos que se toman como base para la planificación y realización del presente proyecto.

El segundo capítulo pone en contexto la importancia del desarrollo y aplicación de las herramientas informáticas en el ámbito educativo mostrando las ventajas que lleva consigo la interacción software – persona en la enseñanza asistida por computador.

Posteriormente, el tercer capítulo muestra la importancia de la herramienta desarrollada describiendo su utilidad en el ámbito de la ingeniería del gas para el diseño de un sistema de deshidratación por TEG. Asimismo, establece las ventajas de la aplicación de la herramienta en el desarrollo de procesos de pensamiento durante el aprendizaje.

A continuación, el cuarto capítulo realiza una recopilación de las definiciones conceptuales y matemáticas de los fenómenos termodinámicos y las distintas propiedades físicas de TEG y gas que intervienen en la deshidratación del gas y el diseño de los equipos involucrados.

Después, el quinto capítulo describe la metodología de diseño utilizada para el desarrollo de la aplicación incluyendo un conjunto de tablas, diagramas y figuras que muestran el proceso de estructuración realizado previo a la etapa de codificación.

En el sexto capítulo se encuentra un manual de la aplicación donde se describe, paso a paso, el ingreso y la edición de los datos de entrada requeridos. Además, se describe ventana a ventana los cálculos y graficas generados por la herramienta.

Luego, el séptimo capítulo presenta una comparación de los resultados presentados por la herramienta HYTEG con los de una herramienta comercial permitiendo un realizar un análisis de validez y la determinación de la fuente de las desviaciones presentadas.

Finalmente, se resalta que los objetivos definidos en el proyecto fueron cumplidos, permitiendo la creación de una aplicación que proporciona una interacción simple y secuencial en el desarrollo de un sistema de deshidratación de gas por TEG facultando al usuario a acceder a los modelos matemáticos y algoritmos utilizados para dicho fin.

1. SOFTWARE EN LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LA INGENIERIA

1.1. Comienzos del Software Educativo

El comienzo del software educativo tiene sus orígenes en la década de los 60, en la cual surgen las primeras ideas sobre el tema, el cual tomaría un mayor auge después de la aparición de las microcomputadoras a final de la década de los 80.¹ Estos programas se desarrollaron en tres enfoques diferentes, el primero corresponde a los lenguajes para el aprendizaje y de él nace el logo, como un lenguaje que se utilizó en un sentido constructivista del aprendizaje. Es decir el alumno no descubre el conocimiento, sino que lo construye, sobre la base de su maduración, experiencia física y social (Bruner J. 1988)².

Su evolución continúa en la actualidad hacia otras formas de interacción llamados micro-mundos. A partir de ahí se ha desarrollado múltiples software de acuerdo a diferentes teorías, tanto conductistas, constructivistas como cognitivistas (Gallego M 1997)³. El segundo enfoque corresponde a la creación de lenguajes y herramientas que sirven para la generación del producto de software educativo. Ella se inicia con la aparición de los lenguajes visuales, los orientados a objetos, la aplicación de los recursos multimedia (Nielsen 1995)⁴ y las herramientas de autor, el campo del desarrollo del software se ha hecho muy complejo. Surgiendo así los productos que nacen con la enseñanza asistida por computadora (EAC) que dio la aparición del software educativo, y que su vez se difundió según tres líneas de trabajo: como tutores (enseñanza asistida por computadoras), como aprendices y herramientas (Shunk 1997)⁵.

¹ CATALDI, Zulma. Metodología de diseño, desarrollo y evaluación de software educativo. Buenos Aires: Universidad Nacional de la Plata, 2000.

² BRUNER, J. Desarrollo Cognitivo y educación. Madrid: Morata, 1988.

³ GALLEGO, M. Los Sistemas Multimediales desde una Perspectiva Pedagógica en Multimedia. Madrid: UNED, 1997.

⁴ NIELSEN, J. Multimedia and Hypertext, The Internet and Beyond. AP-Professional, 1995.

⁵ SHUNK, D. Teorías de la Educación. Prentice Hall, 1997.

Los primeros pasos en el uso del software educativo como material didáctico fueron dados por el lenguaje Logo, desarrollado en el MIT (Instituto Tecnológico de Massachusetts) fue utilizado en numerosas escuelas y universidades (Cataldi 2000)⁶.

1.2. Interacción Software – Persona

La interacción que se da en la relación software-persona da lugar al proceso cognitivo, Perkins (1985)⁷ plantea que la cognición humana, siempre se produce de una manera física, social y simbólicamente repartida. Las personas piensan y recuerdan con la ayuda de toda tipo de instrumentos físicos e incluso construyen nuevos instrumentos con el fin de obtener más ayuda. Las personas piensan y recuerdan por medio del intercambio con los otros, compartiendo información, puntos de vista y postulando ideas.

Libedinsky (1995)⁸ en el marco pedagógico de la utilización de tecnologías en el ámbito educativo, dice que uno de los principios clave que puede operar es el de las cogniciones repartidas. "Cuando se examina la conducta humana en la resolución de problemas de la vida real y en entornos laborales, las personas parecen pensar en asociarse con otros y con la ayuda de herramientas provistas por la cultura, las cogniciones parecerían no ser independientes de las herramientas con las que se resuelve un problema. Las cogniciones parecerían distribuirse físicamente con nuestros útiles y herramientas, entre ellas el computador, socialmente con quienes compartimos las tareas intelectuales y simbólicamente desde las palabras, gráficos y mapas conceptuales, entre otros, como medios de intercambio entre las personas. Los recursos físicos y sociales, participan en la

⁶ CATALDI, op. cit.

⁷ PERKINS, D. La Escuela Inteligente. Gedisa, 1995.

⁸ LIBEDINSKY, M. La utilización del correo electrónico en la escuela: Tecnología educativa. Políticas, historias, propuestas. Paidós, 1995.

cognición no sólo como fuente, sino como vehículo del pensamiento" (Libedinsky 1995)⁹.

1.3. Desarrollos Actuales del Software

En la creación de herramientas para la generación de software educativo tomó inicio con la aparición de los lenguajes visuales, los orientados a objetos, la aplicación de recursos multimedia (Nielsen 1995)¹⁰, teniendo un gran auge en los últimos años. En este auge surgen los lenguajes de alto nivel o evolucionados, a partir del FORTRAN en 1955, desarrollado por IBM; el Cobol, se creó en 1960, como un intento del Comité CODASYL de lenguaje universal para aplicaciones comerciales, el PL/I, que surge en los sesenta para ser usado en los equipos de IBM 360.

El Basic surge en 1965, lenguaje ampliamente usado en el ámbito educativo y en 1970 aparece el Pascal, creado por el matemático Niklaus Wirth, basándose en el Algol de los sesenta. Este lenguaje en particular aporta los conceptos de programación estructurada, tipo de datos y diseño descendente. La evolución continúa hacia otros más modernos como el C, creado en 1972 por Denis Ritchie y el ADA, cuya estandarización se publicó en 1983 (Alcalde E y Peñuelas 1988)¹¹.

Los lenguajes se incorporaron rápidamente al ámbito educativo, porque se consideró que permitían ayudar a mejorar el pensamiento y acelerar el desarrollo cognitivo. Los estudios en este aspecto si bien sostienen que se pueden lograr habilidades cognitivas no indican que se facilite la transferencia hacia otras áreas del saber (Liguori 1995)¹².

⁹ LIBEDINSKY, op. cit.

¹⁰ NIELSEN, op. cit.

¹¹ ALCALDE, E., GARCIA, M. y PEÑUELAS, S. Informática Básica. McGraw-Hill, 1988.

¹² LIGUORI, L. Las nuevas tecnologías de información y comunicación: Tecnología educativa. Políticas, historias, propuestas. Paidós, 1995.

1.4. Aparición del Software Educativo

El software educativo hace su aparición con la difusión de los computadores en la enseñanza, estando estos orientados hacia tres caminos (Shunk 1997)¹³:

- a. Computadores como tutores (enseñanza asistida por computador EAC).
- b. Computadores como aprendices.
- c. Computadores como herramienta.

La enseñanza asistida por computador (EAC) es un sistema que se utiliza sobre todo para efectuar ejercicios, cálculos, simulaciones y tutorías. Los programas de ejercicios son fáciles de realizar y los alumnos proceden a manejarlos en forma lineal en su repaso de información. Las tutorías presentan información y retroalimentación, de acuerdo a la respuesta de los estudiantes, que en este caso son programas ramificados. Una aplicación interesante de las computadoras son las simulaciones por que permiten al alumno ponerse en contacto con una situación real que de otro modo nunca podría hacerlo, tal es el caso de los simuladores de vuelo o de una planta nuclear. Se presenta artificialmente una situación real y con gran uso de recursos gráficos e interactivos¹⁴.

El hecho de usar simulaciones por computadora, en la enseñanza tradicional ha logrado cambios positivos en los alumnos, en cuanto a la resolución de problemas, ya que brindan la posibilidad de acceso a la enseñanza de temas de difícil comprensión y demostración. Como aprendices, sostiene Schunk (1997)¹⁵ que las computadoras permiten que los estudiantes aprendan a programar, facilitando el desarrollo de habilidades intelectuales tales como reflexión, razonamiento y resolución de problemas. Lepper (1985)¹⁶ sostiene que las computadoras pueden enseñar ciertas habilidades que no son posibles con los métodos tradicionales, y el

¹³ SHUNK, op. cit.

¹⁴ CATALDI, op. cit.

¹⁵ SHUNK, op. cit.

¹⁶ LEPPER. Microcomputer in education: Motivational and social issues. American psychologist. Prentice Hall, 1985.

aprender a programar ayuda a la resolución de problemas al modelado y división del problema en partes más pequeñas.

La otra aplicación es la utilización de los computadores como herramientas, mediante el uso de procesadores de textos, bases de datos, software para graficar, plantillas de cálculo y programas de comunicación, etc. Son herramientas que ayudan a ordenar, procesar, almacenar, transmitir información, y que pueden mejorar el aprendizaje de acuerdo al uso que de ellas haga el docente¹⁷.

1.5. Definición del Software Educativo

Se define como software educativo a “programas para computador creados con la finalidad específica de ser utilizados como medio didáctico, es decir, para facilitar los procesos de enseñanza y de aprendizaje” (Marquès 2016)¹⁸ y consecuentemente de aprendizaje, con algunas características particulares tales como: la facilidad de uso, la interactividad y la posibilidad de personalización de la velocidad de los aprendizajes.

Marquès (2016)¹⁹ sostiene que se puede usar como sinónimo del “Software educativo” el término “programa didáctico”, y “programa educativo”, recalando que solo aplica a “aquellos programas que fueron creados con fines didácticos, en el cual se excluye todo software del ámbito empresarial que se pueda aplicar a la educación aunque tenga una finalidad didáctica, pero que no fueron realizados específicamente para ello”.

El software educativo puede tratar las diferentes asignaturas (Física, Química, Procesos...), de numerosas formas y ofrecer un entorno de trabajo más perceptivo

¹⁷ CATALDI, op. cit.

¹⁸ MARQUÈS, P. El software educativo [en línea]. [citado 20 de Abril 2016]. Disponible en Internet: <URL:http://www.lmi.ub.es/te/any96/marques_software>

¹⁹ Ibíd.

con las condiciones del alumno con mayores posibilidades de interacción; pero todos comparten cinco características esenciales (Marquès 2016)²⁰:

1.6. Rol del docente y uso del Software

Las funciones del software educativo, están determinadas de acuerdo a la forma de uso de cada docente. El estilo del docente ha cambiado a casusa de la introducción de los computadores en el aula, desde el tradicional suministrador de información, mediante clases magistrales a facilitadores, pudiendo de este modo realizar un análisis más preciso del proceso de aprendizaje de sus alumnos y una reflexión acerca de su propia práctica.²¹

Tabla 1. Características principales del software educativo.²²

Características	Descripción
Finalidad didáctica	Son materiales con una finalidad didáctica, como se desprende de la definición.
Uso del computador	Utilizan el ordenador como soporte en el que los alumnos realizan las actividades que ellos proponen.
Interactividad	Son interactivos, contestan inmediatamente las acciones de los estudiantes y permiten un dialogo y un intercambio de informaciones entre el ordenador y los estudiantes.

²⁰ Ibíd.

²¹ CATALDI, op. cit.

²² MARQUÈS, Pere. El software educativo [En línea] // Laboratorio de Medios Interactivos. - 20 de Abril de 2016. - http://www.lmi.ub.es/te/any96/marques_software/.

Tabla 2. Continuación: Características principales del software educativo.

Características	Descripción
Individualizar el trabajo	Individualizan el trabajo de los estudiantes, ya que se adaptan al ritmo de trabajo cada uno y pueden adaptar sus actividades según las actuaciones de los alumnos.
Fácil uso	Los conocimientos informáticos necesarios para utilizar la mayoría de estos programas son similares a los conocimientos de electrónica necesarios para usar un video, es decir son mínimos, aunque cada programa tiene unas reglas de funcionamiento que es necesario conocer.

2. SOFTWARE HYTEG

2.1. Utilidad Ingenieril

Al ser una herramienta de cálculo, el potencial de la herramienta no se ve limitada al camino instructivo de la enseñanza, HYTEG es una herramienta de versátil y con una gran fundamentación matemática lo cual la hace una herramienta académica que genera resultados confiables y certeros, tal como los puede brindar un software comercial promedio. No obstante, el uso del software no es desarrollado para labóreles comerciales o que estén fuera del mundo académico.

Entre las funciones desarrolladas por el software HYTEG se encuentra el cálculo de las variables que intervienen en el proceso de deshidratación de gas natural con TEG, presentadas a continuación, los cuales pueden ser vistos en detalles en el capítulo 4 del presente libro:

- Peso molecular aparente del gas.
- Gravedad específica del gas.
- Factor de compresibilidad del gas.
- Factor acéntrico de por componente.
- Densidad del gas.
- Capacidad Calorífica del gas.
- Calculo del contenido de agua del gas dulce y acido.
- Factor de corrección del contenido de agua del gas acido.
- Temperatura de rocío del agua en el gas.
- Eficiencia de remoción del agua.
- Temperatura crítica del componente C7+.
- Presión crítica del componente C7+.
- Volumen crítico del componente C7+.
- Temperatura de ebullición del componente C7+.
- Factor acéntrico del componente C7+.
- Gravedad específica del TEG.

- Capacidad calorífica del TEG.
- Viscosidad dinámica del TEG.
- Concentración en peso de TEG.
- Relación de recirculación de TEG.
- Tasa de circulación.
- Número de etapas de equilibrio.
- Diámetro de la torre de platos.
- Diámetro de la torre de empaques.
- Carga térmica intercambiador TEG-TEG.
- Cargas térmicas en el rehedidor.
- Trabajo de la bomba de TEG.
- Carga térmica intercambiador TEG-GAS.
- Eficiencia termodinámica de la bomba.

2.2. Utilidad Pedagógica

El software educativo presentado, HYTEG, busca que el alumno desarrolle actividades de comprensión o “procesos de pensamiento”, al interactuar con este; se pueden mencionar:

- a. Explicar relaciones casusa efecto.
- b. Formular conclusiones válidas.
- c. Describir limitaciones de los datos.
- d. Confrontar conocimientos nuevos con previos.
- e. Clasificar y seleccionar información.
- f. Producir, organizar y expresar ideas.
- g. Integrador y expresar ideas.

Entre los objetivos del software se busca crear expectativas en el estudiante y estimular la planificación de su aprendizaje, dirigiendo la atención del estudiante por un camino de aprendizaje y razonamiento, mediante el uso de contenido multimedia,

como lo son los gráficos de los comportamientos de las diferentes variables involucradas, animaciones y representaciones de los diferentes equipos.

El software HYTEG permite ver el proceso real y los cálculos de las diferentes etapas que se ven involucradas en el diseño de una planta de deshidratación con TEG, mostrando en cada una de ellas los resultados y dando la posibilidad al alumno de acceder a formularios detallados de los modelos matemáticos, los algoritmos de solución, los artículos académicos y la bibliografía de cada uno de ellos, en un adecuado orden, guiado de una forma didáctica y que facilita el proceso cognitivo; siendo esta una forma agradable y diferente de lo que normalmente se logra apreciar en las aulas de clase.

La sencillez y dinamismo de la interfaz gráfica facilita el flujo adecuado del aprendizaje; gráficos de los comportamientos a diferentes condiciones de las variables permiten al alumno dar el criterio para formular conclusiones de las variaciones que puede tener el proceso y su resultado con el cambio de los parámetros iniciales de cálculo. Sumado la posibilidad de comprender mejor el proceso al tener herramientas adicionales, como lo son los diagramas de bloques, diagramas de flujo y formularios que están incorporados en el software HYTEG, representando de diversas formas el flujo adecuado de desarrollo del proceso, los modelos matemáticos, y el algoritmo de solución.

3. FUNDAMENTACION TEÓRICA

3.1. Propiedades Físicas de los Fluidos

Las correlaciones empleadas para el diseño de un sistema de deshidratación de gas natural por medio del contacto con TEG requieren de la utilización de propiedades físicas de los fluidos involucrados que usualmente no son conocidas y deben ser estimadas usando un conjunto de ecuaciones y correlaciones empíricas.

La exactitud de dichas correlaciones es bastante alta siempre y cuando sean utilizadas dentro de los rangos de validez determinados. Por lo tanto, es necesario tener en cuenta que las correlaciones no sean aplicadas por fuera de estos rangos puesto que su extrapolación generara un incremento en la incertidumbre.

3.1.1. Gas Natural

Este fluido homogéneo de baja densidad y viscosidad está conformado por gases hidrocarburo y no hidrocarburo. Los gases hidrocarburos que normalmente se encuentran en un gas natural son: metano (CH_4), que puede constituir hasta un 85% de la mezcla, etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butanos (C_4H_{10}), pentanos (C_5H_{12}) y mínimas cantidades de hexano (C_6H_{14}) e hidrocarburos pesados. Por otro lado, los gases no hidrocarburos (y/o impurezas que podrían requerir la eliminación) incluyen dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrogeno (H_2S), agua (H_2O) y nitrógeno (N_2).

El conocimiento de la relación presión-volumen-temperatura (PVT) y otras propiedades físicas son esenciales para resolución de problemas ingenieriles en el tratamiento del gas natural.

3.1.1.1. Peso Molecular Aparente - M_a

El peso molecular aparente de una mezcla de gases es representado matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$M_a = \sum_i y_i M_i \quad (1)$$

3.1.1.2. Gravedad Específica - γ_g

La gravedad específica se define como el ratio de la densidad del gas con respecto a la del aire. Ambas densidades son expresadas a la misma presión y temperatura. Comúnmente, la presión estándar, P_c , y la temperatura estandar, T_c , son usadas como referencia.

$$\gamma_g = \frac{\text{densidad gas @ } 14.7/60^\circ F}{\text{densidad aire @ } 14.7/60^\circ F} = \frac{\rho_g}{\rho_{air}} \quad (2)$$

Asumiendo que el comportamiento de la mezcla de gases y el aire son descritos por la ecuación de gas ideal, la gravedad específica puede ser expresada como:²³

$$\gamma_g = \frac{M_a}{M_{air}} = \frac{M_a}{28.96} \quad (3)$$

3.1.1.3. Ecuación de Estado de Peng-Robinson

Las ecuaciones de estado permiten una descripción adecuada de la relación PVT de los fluidos de hidrocarburos permitiendo la determinación del comportamiento volumétrico y de fases de los fluidos del yacimiento y en la predicción de la eficiencia de las facilidades de superficie.

La ecuación de estado de Peng – Robinson se desarrolló buscando mejorar la habilidad de la ecuación de estado de SRK para predecir densidades de líquidos y otras propiedades de fluidos, particularmente en condiciones cercanas a la región crítica.²⁴

La reorganización de la ecuación para calcular el factor de compresibilidad genera la siguiente ecuación cubica:

²³ AHMED, Tarek. Equations of State and PVT Analysis. - Houston : Gulf Publishing Company, 2007.

²⁴ AHMED, T. Op. cit.

$$Z^3 + (B-1)Z^2 + (A-3B^2-2B)Z - (AB-B^2-B^3) = 0 \quad (4)$$

Siendo A y B parámetros que tienen en cuenta la composición de la mezcla de gases, la interacción binaria entre componentes y los factores acéntricos de cada uno.

Tabla 3. Coeficientes de Interacción Binaria k_{ij} ²⁵

	CO ₂	N ₂	H ₂ S	C1	C2	C3	i-C4	n-C4	i-C5	n-C5	C6	C7	C8	C9	C10
CO ₂	0	0	0.135	0.105	0.130	0.125	0.120	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115
N ₂		0	0.130	0.025	0.010	0.090	0.095	0.095	0.100	0.100	0.110	0.115	0.120	0.120	0.0125
H ₂ S			0	0.070	0.085	0.080	0.075	0.075	0.070	0.070	0.070	0.060	0.060	0.060	0.055
C1				0	0.005	0.010	0.035	0.025	0.050	0.030	0.030	0.035	0.040	0.040	0.045
C2					0	0.005	0.005	0.010	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
C3						0	0	0	0.015	0.010	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
i-C4							0	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
n-C4								0	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
i-C5									0	0	0	0	0	0	0
n-C5										0	0	0	0	0	0
C6											0	0	0	0	0
C7												0	0	0	0
C8													0	0	0
C9														0	0
C10															0

Tener en cuenta que $k_{ij} = k_{ji}$

El parámetro A se encuentra definido de la siguiente forma:

$$A = \frac{(a\alpha)_m P}{(RT)^2} \quad (5)$$

Para determinar el valor de A, es necesario calcular los siguientes parámetros:

	$(a\alpha)_m = \sum_i \sum_j y_i y_j \sqrt{a_i a_j \alpha_i \alpha_j} (1 - k_{ij})$	(6)
	$\alpha = [1 + m(1 - \sqrt{T_r})]^2$	(7)

²⁵ AHMED, T. Op. cit.

	$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$	$\omega \leq 0.49$	(8)
	$m = 0.379642 + 1.48503\omega - 0.164423\omega^2 + 0.016667\omega^3$	$\omega > 0.49$	(9)
	$a_i = \Omega_a \frac{(RT_{ci})^2}{P_{ci}}$		(10)

Tabla 4. Factor Acéntrico por Componente, ω . ²⁶

C	ω	Componente	ω
CO ₂	0.2239	i-C5	0.2284
N ₂	0.0372	n-C5	0.2515
H ₂ S	0.1010	C6	0.2993
C1	0.0116	C7	0.3483
C2	0.0994	C8	0.3977
C3	0.1529	C9	0.4421
i-C4	0.1865	C10	0.4875
n-C4	0.2003		

Donde $\Omega_a = 0.4572$. De la misma forma, el parámetro B se encuentra definido de la siguiente forma:

$$B = \frac{b_m P}{RT} \quad (11)$$

Por otro lado, para determinar el valor de B, es necesario calcular los siguientes parámetros:

$$b_m = \sum_i [y_i b_i] \quad (12)$$

$$b_i = \Omega_B \frac{RT_{ci}}{P_{ci}} \quad (13)$$

Donde $\Omega_b = 0.07780$.

²⁶ GPSA. (2004). *Engineering Data Book* (12th ed.). Tulsa: Gas Processors Suppliers Association.

3.1.1.4. Densidad

La densidad de una mezcla de gas real es calculada teniendo en cuenta el factor de compresibilidad de la mezcla a las condiciones de presión y temperatura actual y su peso molecular aparente.

$$\rho_g = \frac{PM_a}{ZRT} \quad (14)$$

3.1.1.5. Capacidad Calorífica

La capacidad calorífica está expresada en unidades de $\frac{BTU}{lbm-\circ F}$. Un “BTU” está definido como la cantidad de calor requerido para elevar 1 lbm de agua de 60 a 61 °F. Todos los líquidos y sólidos son comparados con el agua pura, la cual posee la mayor capacidad calorífica entre las sustancias, siendo esta $1 \frac{BTU}{lbm-\circ F}$.²⁷

La correlación generalizada para capacidad calorífica es generada empíricamente para la determinación de la variación de dicha propiedad en gases naturales para amplios rangos de presión, temperatura y densidad (composición).

$$C_p = \left[ab^T T^c + de \left(\frac{P}{1000} \right)^f \right] \left(\frac{SG}{0.60} \right)^{0.025} \quad (15)$$

Donde a, b, c, d, e y f son parámetros de la correlación mostrados en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Parámetros para la Correlación Generalizada C_p .²⁸

Gas SG	a	b	c	d	e	f	T (°F)
0.60	1.1231	1.0057	-0.7351	0.5126	1.1032	0.0161	59 - 392
0.65	1.9309	1.0068	-0.9104	0.5170	1.1075	0.0195	59 - 392
0.70	1.6987	1.0108	-1.2230	0.5506	1.1062	0.0209	68 - 392
0.75	8.7046	1.0108	-1.4945	0.5437	1.1079	0.0250	86 - 392
0.80	0.0014	1.0030	0.4652	0.5372	1.1118	0.0235	104 - 392
P = 14.5 – 2900 psia							

²⁷ SPE International. (9 de Junio de 2015). Thermal recovery by steam injection: PetroWiki®.

²⁸ Moshfeghian, M. (2009, Julio 1). PetroSkills.

3.1.1.6. Contenido de Agua en Gas Dulce

Los hidrocarburos están formados en un entorno en equilibrio con el agua a condiciones de yacimiento, siendo compañeros naturales. De esta forma, el contenido de agua en el gas en un sistema depende tanto de la presión como de la temperatura de este.

$$Wc = 62.5 \left(\frac{A}{P} + B \right) \quad (16)$$

Donde

$$A = a * e^{\left[-\frac{(T-b)^2}{2c^2} \right]} \quad (17)$$

$$B = d * e^{\left[-\frac{(T-f)^2}{2g^2} \right]} \quad (18)$$

Siendo a, b y c parámetros de la correlación mostrados en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Parámetros de la Correlación para Contenido de Agua de Gas Dulce.

Baja T ° C	Alta T ° C	a _A	b _A	c _A	a _B	b _B	c _B
-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	110.1560	1.5611	227.1200	59.4634

La correlación presenta resultados aceptables dentro de un rango de temperatura de -40 – 212 °F y un rango de presión de 100 – 10000 psia.²⁹

3.1.1.7. Contenido de Agua en Gas Agrio

En el caso de un gas natural agrio, la composición del gas influye significativamente en la cantidad de agua que este contiene. Esto se debe a la presencia de gases ácidos, como sulfuro de hidrogeno (H₂S) y dióxido de carbono (CO₂), que poseen una saturación de agua mayor a la de los componentes hidrocarburos de la mezcla.

²⁹ Moshfeghian, M. (1 de Septiembre de 2014). *PetroSkills*.

El contenido de agua de un gas agrio es estimado multiplicando el contenido de agua del gas dulce por un factor de corrección por acidez.

$$W_{c, sour} = F * W_{c, sweet} \quad (19)$$

Este Factor de corrección, F, es una función de la concentración equivalente de H₂S (HEC), la temperatura y la presión.

$$HEC = \% \text{ Molar } H_2S + 0.7(\% \text{ Molar } CO_2) \quad (20)$$

Para el desarrollo de la correlación, se definió un término intermedio representado por X, como una función de la temperatura y HEC.

$$X = \alpha + \beta T + \gamma T^2 \quad (21)$$

Donde

$$\alpha = \frac{195.262}{[1 + 26.162e^{(-0.0957 HEC)}]} \quad (22)$$

$$\beta = -\frac{0.8374}{[1 + 27.813e^{-0.0991 HEC}]} \quad (23)$$

$$\gamma = \frac{0.0011}{[1 + 22.051e^{(-0.0861 HEC)}]} \quad (24)$$

De esta forma, el factor de corrección por acidez, F, es una función de X y la presión.

$$F = a + bX + cX^2 \quad (25)$$

Donde

$$a = 1 + 6.73 * 10^{-5}P - 8.98 * 10^{-8}P^2 + 4.48 * 10^{-11}P^3 - 6.55 * 10^{-15}P^4 \quad (26)$$

$$b = 5.9 * 10^{-5} - 1.78 * 10^{-7}P + 5.28 * 10^{-9}P^2 - 2.03 * 10^{-12}P^3 + 2.79 * 10^{-16}P^4 \quad (27)$$

$$c = 3.18 * 10^{-6} + 3.24 * 10^{-8}P + 3.08 * 10^{-11}P^2 + 2.228 * 10^{-16}P^3 - 2.60 * 10^{-19}P^4 \quad (28)$$

Esta correlación presenta resultados aceptables con temperaturas de hasta 350 °F, presiones de hasta 3400 psia y un contenido de H2S equivalente de hasta 50%.³⁰

3.1.2. Fracción Pesada

Casi todos los sistemas de hidrocarburos naturales contienen una cantidad de fracción pesada que no está bien definida. Una descripción adecuada de las propiedades físicas de dicha fracción es esencial en la realización de cálculos confiables de comportamiento de fase y modelamiento composicional.

Por lo tanto, para usar cualquiera de los modelos de predicción de propiedades termodinámicas, para predecir el comportamiento volumétrico y de fases en mezclas complejas de hidrocarburos, es necesario proveer el factor acéntrico, la temperatura crítica y la presión crítica de la fracción pesada de dicha mezcla.

3.1.2.1. Propiedades Críticas C7 Plus

Riazi y Daubert (1980) desarrollaron una ecuación sencilla de dos parámetros para predecir las propiedades físicas de componentes puros y mezclas de hidrocarburos indefinidas. La ecuación empírica generalizada se basa en el uso del peso molecular y la gravedad específica como parámetros de correlación.

$$\theta = a(M)^b \lambda^c \exp[d(M) + e\lambda + f(M)\lambda] \quad (29)$$

Donde θ es cualquiera de las propiedades físicas: temperatura crítica T_c , presión crítica P_c , volumen crítico V_c y temperatura de ebullición normal T_b . Las constantes de correlación a, b, c, d, e y f varían para cada propiedad y están dadas en la **Tabla 7**.

Esta correlación genera resultados aceptables con pesos moleculares entre 70 – 300 $\frac{lb}{lb-mol}$.³¹

³⁰Moshfeghian, M. (1 de Abril de 2015). *PetroSkills*

³¹ AHMED, T. *Equations of State and PVT Analysis*. Houston: Gulf Publishing Company, 2007

Tabla 7. Parámetros de Correlación Riazi & Daubert.³²

θ	a	b	c	d	e	f
T_c	544.40	0.299800	1.05550	-1.34780×10^{-4}	-0.616410	0
P_c	4.52030×10^4	-0.806300	1.60150	-1.8078×10^{-3}	-0.308400	0
V_c	1.20600×10^{-2}	0.20378	-1.30360	-2.65700×10^{-3}	0.528700	2.60120×10^{-3}
T_b	6.77857	0.401673	-1.58262	3.77409×10^{-3}	2.984036	-4.25288×10^{-3}

3.1.2.2. Factor Acéntrico C7 Plus

Kesler and Lee (1976) propusieron un conjunto de ecuaciones para estimar el factor acéntrico a partir de la gravedad específica de la fracción pesada y su punto de ebullición.

Para $\theta > 0.8$:

$$\omega = -7.904 + 0.1352K - 0.007465K^2 + 8.359\theta + \left(\frac{[1.408 - 0.01063K]}{\theta} \right) \quad (30)$$

Para $\theta < 0.8$:

$$\omega = \frac{-\ln\left[\frac{P_c}{14.7}\right] - 5.92714 + \frac{6.09648}{\theta} + 1.28862 \ln[\theta] - 0.169347\theta^6}{15.2518 - \frac{15.6875}{\theta} - 13.4721 \ln[\theta] + 0.43577\theta^6} \quad (31)$$

$$K = \frac{[T_b]^{1/3}}{GE^*} \quad (32)$$

$$\theta = \frac{T_b}{T_c} \quad (33)$$

Donde K es el factor de caracterización de Watson, K, y θ es el punto de ebullición reducido. Esta correlación presenta resultados aceptables a temperaturas de ebullición menores a 1200 R.³³

³²AHMED, T. Op. Cit.

³³ Ahmed, T. (2007). *Equations of State and PVT Analysis*. Houston: Gulf Publishing Company.

3.1.3. Trietilenglicol (TEG)

Es el glicol más comúnmente usado en sistemas de absorción. Las principales propiedades que hacen de este químico un buen candidato para este tipo de aplicaciones son su viscosidad, su presión de vapor y su solubilidad en hidrocarburos.

Además, en los sistemas de deshidratación por absorción, el solvente debe ser higroscópico, no corrosivo, de baja volatilidad, de fácil regeneración, insoluble en hidrocarburos líquidos y no reactivos con hidrocarburos, CO₂ y compuestos de azufre.³⁴

3.1.3.1. Gravedad Específica

La correlación utilizada para la estimación de esta propiedad está en función del porcentaje en peso de trietilenglicol en la solución. Además, se cuenta con un set de constantes que dependen del rango de temperatura en el que se encuentra el TEG

$$\gamma_{TEG} = A + Bx + Cx^2 \quad (34)$$

Donde A, B y C son parámetros de la correlación mostrados en la **Tabla 8**.

Tabla 8. Parámetros de la Correlación de Gravedad Específica TEG.³⁵

T ° F	A	B	C
-50	1.0502	1.8268x10 ⁻³	-5.2009x10 ⁻⁶
0	1.0319	1.7466x10 ⁻³	-4.8304x10 ⁻⁶
50	1.0121	1.5247x10 ⁻³	-2.8794x10 ⁻⁶
100	0.9920	1.7518x10 ⁻³	-5.4955x10 ⁻⁶
150	0.9804	1.5410x10 ⁻³	-4.3884x10 ⁻⁶
200	0.9627	1.4068x10 ⁻³	-3.5089x10 ⁻⁶
250	0.9413	1.3205x10 ⁻³	-2.7991x10 ⁻⁶
300	0.9177	1.2511x10 ⁻³	-2.0848x10 ⁻⁶

³⁴ Campbell, J. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. 1). U.S.A: Campbell Petroleum Series.

³⁵ DOW CHEMICAL COMPANY. Triethylene Glycol, 2007.

3.1.3.2. Capacidad Calorífica

La capacidad calorífica de TEG varía con la temperatura y su concentración en peso.

$$C_p = A + \frac{5}{9}B(T - 32) + \frac{25}{81}C(T - 32)^2 \quad (35)$$

Donde A, B y C son parámetros de la correlación mostrados en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Parámetros de la Correlación de Capacidad Calorífica TEG.³⁶

%Peso	A	B	C
0	1.00540	-2.7286E-4	2.9143E-6
10	0.96705	-2.7144E-5	2.4952E-6
20	0.92490	2.0429E-4	2.4524E-6
30	0.88012	4.3000E-4	1.6952E-6
40	0.83229	6.2286E-4	1.3714E-6
50	0.78229	7.9286E-4	1.0857E-6
60	0.72200	9.4000E-4	8.0000E-7
70	0.66688	1.0871E-3	4.7620E-7
80	0.60393	1.2043E-3	2.8571E-7
90	0.53888	1.2800E-3	1.9048E-7
100	0.48614	1.3929E-3	-5.7140E-8

3.1.3.3. Viscosidad Dinámica

La siguiente correlación permite el cálculo de esta propiedad a partir del porcentaje en peso de TEG, x, y la temperatura del fluido, T.

$$\vartheta_{TEG} = Ax 10^{Bx} \quad (36)$$

Donde A Y B son parámetros de la correlación mostrados en la **Tabla 10**. La selección de estos parámetros depende del rango de temperatura en la que se encuentre el fluido, permitiendo valores de 0 – 300 °F.

³⁶ DOW CHEMICAL COMPANY. Op. cit.

Tabla 10. Parámetros de la Correlación de Viscosidad Dinámica TEG.³⁷

T ° F	A	B
0	1.53010	2.9967x10 ⁻²
50	1.09200	1.9348x10 ⁻²
100	0.58916	1.5763x10 ⁻²
150	0.37045	1.3481x10 ⁻²
200	0.27371	1.1731x10 ⁻²
250	0.18759	9.7064x10 ⁻³
300	0.14026	8.1319x10 ⁻³

3.1.4. Nomenclatura

Tabla 11. Nomenclatura de la sección “Propiedades Físicas de los Fluidos”.

Variable	Definición	Unidades
C_p	Capacidad Calorífica	<i>BTU/lb °F</i>
F	Factor de Corrección por Acidez	
k	Coefficiente de Interacción Binaria	
K	Factor de Caracterización Watson	
HEC	Contenido de H ₂ S Equivalente	<i>%Mol</i>
M_a	Peso Molecular Aparente Gas	<i>lb/lb – mol</i>
M_i	Peso Molecular Componente	<i>lb/lb – mol</i>
P_c	Presión Critica Componente	<i>psia</i>
T_b	Temperatura de Ebullición Normal	<i>R</i>
T_c	Temperatura Critica Componente	<i>R</i>
T_r	Temperatura Reducida Gas Componente	<i>R</i>
V_c	Volumen Critico Componente	<i>ft³/lb</i>
X	Porcentaje en Peso TEG	
y_i	Fracción Molar Componente	
W_c	Contenido de Agua Gas	<i>lb H₂O/MMSCF</i>
Z	Factor de Compresibilidad	
ρ_{air}	Densidad Aire	<i>lb/ft³</i>
ρ_g	Densidad Gas	<i>lb/ft³</i>
ω	Factor Acéntrico Componente	

³⁷ DOW CHEMICAL COMPANY. Op. cit.

Tabla 11. Continuación: Nomenclatura de la sección “Propiedades Físicas de los Fluidos”.

Variable	Definición	Unidades
θ	Punto de Ebullición Reducido	
γ_g	Gravedad Especifica Gas	
γ_{TEG}	Gravedad Especifica TEG	
ϑ_{TEG}	Viscosidad Dinámica TEG	<i>cP</i>

3.2. Deshidratación de Gas Natural con TEG

La mayoría de los fluidos del yacimiento contienen agua, incluyendo el gas natural. Algunas de las razones por las cuales se deshidrata el gas son:

- El gas natural con un gran contenido de agua puede formar hidratos solidos de gas, los cuales pueden taponar válvulas, tuberías y otros equipos.
- Si no es separado del agua producida, el gas natural es corrosivo, especialmente cuando hay presencia de CO₂ y H₂S.
- El agua puede condensar en la tubería, causando baches de flujo y posible erosión y corrosión.
- El vapor de agua incrementa el volumen y disminuye el poder calorífico del gas.
- El gas de venta, y el transporte de gas tiene un máximo contenido de agua.³⁸

La deshidratación es el proceso de remover el agua que está contenida en el gas. En estado líquido, las moléculas de agua están altamente relacionadas debido a los enlaces de hidrogeno. Los hidroxilos, y los grupos éteres en glicol forman relaciones similares con las moléculas de agua. Este enlace de hidrógeno en fase líquida explica por qué los glicoles tienen una alta afinidad por el agua, y porque la presión parcial de equilibrio del vapor del agua sobre una solución de agua-glicol es mucho menor que la predicha por la ley de Raoult.³⁸

³⁸ Thompson, R. E. (1991). *Oilfield Processing of Petroleum* (Vol. 1: Natural Gas). Tulsa, Oklahoma: PennWell Books

En el proceso de absorción, un líquido higroscópico es usado para contactar el gas húmedo y remover el vapor de agua de este. El líquido más comúnmente usado en las unidades de deshidratación de tipo absorción es el trietilenglicol (TEG).³⁹

Mediante la absorción, el agua en una corriente de gas es disuelta en una corriente de un solvente relativamente puro (TEG). El proceso contrario, en cual el agua en el solvente es transferida hacia la fase gaseosa es conocido como despojo (stripping).

Regeneración y reconcentración son también usados para describir el despojo puesto que es necesario que el solvente sea regenerado para ser reutilizado en el proceso de absorción.

La absorción puede ser modelada usando la ley de Raoult y Dalton para un sistema vapor-líquido en equilibrio. En ella se expresa que la presión parcial del componente en una fase vapor que está en equilibrio con un líquido es directamente proporcional a la fracción molar del componente en la fase líquida.

$$p_i = P_i X_i \quad (37)$$

La Ley de Dalton expresa que la presión parcial de vapor de un componente es igual a la presión total multiplicada por la fracción molar de esta en la mezcla de gas.

$$p_i = P Y_i \quad (38)$$

Combinando ambas leyes se tiene:

$$\frac{p_i}{P} = \frac{Y_i}{X_i} \quad (39)$$

Dado que la presión de vapor del componente puro y la presión total no son afectadas por la composición, la ecuación es significativa. Esto significa que la relación de la fracción molar de vapor a la fracción molar de líquido para cualquier componente es independiente de las concentraciones de ese componente y de los

³⁹ Kent, A. (2011). *Gas Dehydration Field Manual*. Gulf Professional Publishing

demás componentes presentes Esta relación es comúnmente conocida como el valor K.

Dado que la presión del componente puro de vapor incrementa con la temperatura, el valor K incrementa con el incremento de temperatura y decrece con el incremento de presión. En términos físicos, esto significa que la transferencia de la fase gaseosa a la fase líquida (absorción) es más favorable a baja temperatura y alta presión. Por el contrario, la transferencia de la fase gaseosa (despojo) es más favorable a alta temperatura y baja presión.⁴⁰

3.2.1. Concentración Mínima de TEG

Si el gas saturado con agua es dispuesto en una celda estática con una solución de TEG – agua a cierta concentración a una presión y temperatura fija, se lograra un equilibrio entre las fases después de determinado tiempo. Asumiendo que el líquido tiene una concentración de agua suficientemente baja, esta sería transferida desde la fase gaseosa hacia la fase líquida.⁴¹

Por lo tanto, el diseño de un sistema de deshidratación por TEG necesita la determinación de la mínima concentración de TEG requerida para alcanzar el contenido de agua especificado en el gas de salida. Es por esta razón por la que varias correlaciones para predecir la temperatura de rocío del agua en el gas en equilibrio con una solución de TEG han sido presentadas desde 1950.⁴²

Bahadori y Vuthaluru (2009) proponen la siguiente correlación para la estimación rápida de la temperatura de rocío del agua, T_d , en el gas natural en equilibrio con la

⁴⁰ KENT, A. Gas Dehydration Field Manual. Gulf Professional Publishing, 2011.

⁴¹ CAMPBELL, J. M. Gas Conditioning and Processing (7th ed., Vol. II). Norman: Campbell Petroleum Series, 1992.

⁴² BAHADORI, A., & VUTHALURU, B. H. Rapid Estimation of Equilibrium Water Dew Point of Natural Gas in TEG Dehydration Systems. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2009.

solución de TEG a diferentes temperaturas de contactor, T, y concentraciones de TEG, W.

$$T_d = \frac{9}{5}a - 460 + b(T_d + 460) + \frac{5}{9}c(T_d + 460)^2 + \frac{25}{81}d(T_d + 460)^3 \quad (40)$$

Donde

$$a = A_1 + B_1W + C_1W^2 + D_1W^3 \quad (41)$$

$$b = A_2 + B_2W + C_2W^2 + D_2W^3 \quad (42)$$

$$c = A_3 + B_3W + C_3W^2 + D_3W^3 \quad (43)$$

$$d = A_4 + B_4W + C_4W^2 + D_4W^3 \quad (44)$$

Tabla 12. Parámetros de Correlación de Concentración Mínima TEG.⁴³

Coeficiente	90% < TEG < 99%	99% < TEG < 99.9%	99.9% < TEG < 99.999%
A ₁	2.727934205339338x10 ⁷	5.948778272003327x10 ⁹	-1.434042060305527x10 ¹³
B ₁	-8.631372857145108x10 ⁵	-1.790765203821737x10 ⁸	-1.434042060305527x10 ¹³
C ₁	9.095756908066296x10 ³	1.796891322204887x10 ⁶	-4.306461745218327x10 ⁹
D ₁	-3.192394176943851x10 ¹	-6.010038602026653x10 ³	1.436210185528952x10 ⁷
A ₂	-2.653646110218815x10 ⁵	-6.033812028658381x10 ⁷	1.377170114378799x10 ¹¹
B ₂	8.394220905037211x10 ³	1.816573929578706x10 ⁶	-4.133592993287494x10 ⁹
C ₂	-8.843532185285766x10 ¹	-1.823001079027631x10 ⁴	4.135676303556589x10 ⁷
D ₂	3.103038903374517x10 ⁻¹	6.098082812834708x10 ¹	-1.379253424664974x10 ⁵
A ₃	8.616616027595576x10 ²	2.040747181326815x10 ⁵	-4.362719886544207x10 ⁸
B ₃	-2.725023220090672x10 ¹	-6.144735183073446x10 ³	1.309475458226566x10 ⁷
C ₃	2.870185527430992x10 ⁻¹	6.167227566580564x10 ¹	-1.310135158620758x10 ⁵
D ₃	-1.006847138127057x10 ⁻³	-2.063239320629376x10 ⁻¹	4.369316890559073x10 ²
A ₄	-9.319294190023186x10 ⁻¹	-2.273886759702042x10 ²	4.616804880279627x10 ⁵
B ₄	2.946481646399538x10 ⁻²	6.847347278284538	-1.385739729044255x10 ⁴
C ₄	-3.102601747330962x10 ⁻⁴	-6.873040245312648x10 ⁻²	1.386438214526602x10 ²
D ₄	1.088073588828679x10 ⁻⁶	2.299579467606105x10 ⁻⁴	-4.623789735185614x10 ⁻¹

Los coeficientes de las ecuaciones anteriores se muestran en la **Tabla 12**. Esta correlación presenta resultados aceptables en un rango de temperatura del contactor de 50 – 176 °F y un rango de concentración de TEG de 90 – 99.999 %w.

Teóricamente, el gas deja el contacto superior de la torre de absorción estando en equilibrio con el TEG que sale del contacto, mas no con el TEG entrante. Por lo que

⁴³ BAHADORI, A., & VUTHALURU, B. H. Op. Cit.

una unidad bien diseñada y operada adecuadamente generara una temperatura de rocío de agua entre 9 – 18 °F mayor que la temperatura de equilibrio real. Es necesario entonces tener en cuenta este “approach”, el cual depende de la tasa de circulación de TEG y el número de contactos, al momento de utilizar la correlación.⁴⁴

3.2.2. Tasa de Circulación de TEG y Número de Etapas de Equilibrio

Campbell (1992) reporta que en una torre de absorción real, el gas que sale de la unidad no alcanza el equilibrio con el TEG pobre entrante por lo que se tiene en cuenta una temperatura “approach”. De esta forma, teóricamente, el contenido de agua en el gas de salida es determinado por la pureza del TEG pobre. Sin embargo, el contenido de agua real depende de la tasa de circulación de TEG y el número de platos o la altura del empaque utilizado.

Para determinar dichos aspectos del proceso, primero es necesario determinar la eficiencia de remoción de agua como función de los contenidos de agua a la entrada y salida de la unidad.

$$R = \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in}} \quad (45)$$

Bahadori y Vuthaluru (2009) también proponen una correlación que relaciona la tasa de circulación de TEG, Ψ , la concentración de TEG, W , el número de etapas de equilibrio con la eficiencia de remoción de agua, R .

$$\ln(R) = a + \frac{(119.8265) b}{\Psi} + \frac{(119.8265)^2 c}{\Psi^2} + \frac{(119.8265)^3 d}{\Psi^3} \quad (46)$$

Donde:

$$a = A_1 + \frac{B_1}{X} + \frac{C_1}{X^2} + \frac{D_1}{X^3} \quad (47)$$

$$b = A_2 + \frac{B_2}{X} + \frac{C_2}{X^2} + \frac{D_2}{X^3} \quad (48)$$

⁴⁴ Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. II). Norman: Campbell Petroleum Series.

Tabla 13. Parámetros de la correlación para determinar la tasa de circulación de TEG pobre y el número de etapas teóricas de la torre de absorción.⁴⁵

Coefficiente	# Etapas Teóricas N = 1	# Etapas Teóricas N = 1.5	# Etapas Teóricas N = 2
A ₁	1.51750000734x10 ⁵	1.36318190812x10 ⁴	-1.27155870163x10 ⁵
B ₁	-4.5287844071x10 ⁵	-4.1087635096x10 ⁴	3.78535979271x10 ⁵
C ₁	4.50515787525x10 ⁵	4.1278286256x10 ⁴	-3.75616159919x10 ⁵
D ₁	-1.49387377624x10 ⁵	-1.38224984469x10 ⁴	1.24236038846x10 ⁵
A ₂	-1.1316270524x10 ⁴	-1.07128653518x10 ³	1.16335738747x10 ⁴
B ₂	3.3777842508x10 ⁴	3.22852999323x10 ³	-3.46339151846x10 ⁴
C ₂	-3.3607087x10 ⁴	-3.24270631055x10 ³	3.43686140202x10 ⁴
D ₂	1.11455135941x10 ⁴	1.08546448915x10 ³	-1.1368271474x10 ⁴
A ₃	2.4475093673x10 ²	3.97385136272x10 ¹	-3.3397932662x10 ²
B ₃	-7.3073793526x10 ²	-1.19123690208x10 ²	9.94295556513x10 ²
C ₃	7.2722549748x10 ²	1.1902390712x10 ²	-9.8669620555x10 ²
D ₃	-2.41238559437x10 ²	-3.96388087735x10 ¹	3.2637991018x10 ²
A ₄	-1.62668383278	-3.76154014912x10 ⁻¹	2.856748838
B ₄	4.85801145745	1.1251621391	-8.50453031755
C ₄	-4.8359647407	-1.1218236382	8.4391925267
D ₄	1.6046374352	3.7281593611x10 ⁻¹	-2.7914105909

Tabla 14. Parámetros de la correlación para determinar la tasa de circulación de TEG pobre y el número de etapas teóricas de la torre de absorción.⁴⁶

Coefficiente	# Etapas Teóricas N = 2.5	# Etapas Teóricas N = 3	# Etapas Teóricas N = 4
A ₁	3.65792068453x10 ⁴	1.72521576917x10 ⁶	-7.38643001783x10 ⁷
B ₁	-1.09019787644x10 ⁵	-5.16460399496x10 ⁶	2.21479386633x10 ⁸
C ₁	1.08309529773x10 ⁵	5.1535751573x10 ⁶	-2.21365910392x10 ⁸
D ₁	-3.58689467686x10 ⁴	-1.7141869357x10 ⁶	7.37508239331x10 ⁷
A ₂	-2.59663054678x10 ³	-1.26805051527x10 ⁵	4.97389685515x10 ⁶
B ₂	7.74050225267x10 ³	3.79545983218x10 ⁵	-1.49140002987x10 ⁷
C ₂	-7.69127114067x10 ³	-3.78677891486x10 ⁵	1.4906312923x10 ⁷
D ₂	2.54739956763x10 ³	1.25936959826x10 ⁵	-4.96620947993x10 ⁶
A ₃	5.39404855899x10 ¹	3.20022637366x10 ³	-1.049098764x10 ⁵
B ₃	-1.60845322929x10 ²	-9.57833625744x10 ³	3.14566557041x10 ⁵
C ₃	1.59871276975x10 ²	9.5560237605x10 ³	-3.14403546725x10 ⁵
D ₃	-5.29664543317x10 ¹	-3.1779138752x10 ³	1.04746866096x10 ⁵
A ₄	-3.3504537023x10 ⁻¹	-2.45377077254x10 ¹	6.77322483974x10 ²
B ₄	9.9951682574x10 ⁻¹	7.34407625715x10 ¹	-2.030910371004x10 ³
C ₄	-9.93899634714x10 ¹	-7.3268643351x10 ¹	2.02985369484x10 ³
D ₄	3.2942824495x10 ⁻¹	2.43655884304x10 ¹	-6.7626580778x10 ²

⁴⁵ BAHADORI, Alireza y Hari Vuthaluru B. Simple Methodology for Sizing of Absorbers for TEG (triethylene glycol) Gas Dehydration Systems [Publicación periódica] // Energy, The International Journal. - 2009. - pág. 7.

⁴⁶ Ibid.

$$c = A_3 + \frac{B_3}{X} + \frac{C_3}{X^2} + \frac{D_3}{X^3} \quad (49)$$

$$d = A_4 + \frac{B_4}{X} + \frac{C_4}{X^2} + \frac{D_4}{X^3} \quad (50)$$

Los parámetros de correlación A, B, C y D para cada una de las etapas de equilibrio son mostrados en la **Tabla 13** y **Tabla 14**. Es necesario tener en cuenta que esta correlación presenta resultados aceptables con una relación de recirculación de TEG de hasta 7.18 *gal TEG/lb H₂O*, una concentración de TEG de hasta 99.99 %w y hasta 4 etapas de equilibrio.

La mayoría de los diseños usan una tasa de circulación de 2 – 5 *gal TEG/lb H₂O*. Según Campbell (1992), este rango se encuentra cerca al óptimo económico. Si el sistema utiliza tasas de recirculación mayores, será necesario un sistema de regeneración de mayor capacidad, mayor consumo de energía y habrá una mayor absorción de hidrocarburos aromáticos. Por el contrario, si el sistema utiliza una tasa de recirculación menor, será necesario una torre de absorción más alta generando problemas con la eficiencia de los contactores.⁴⁷

3.2.3. Nomenclatura

Tabla 15. Nomenclatura de la sección “Deshidratación de Gas Natural con TEG”.

Variable	Definición	Unidades
<i>P</i>	Presión Gas	<i>psia</i>
<i>p_i</i>	Presión Parcial de Vapor de Componente i	<i>psia</i>
<i>P_i</i>	Presión de vapor de Componente i	<i>psia</i>
<i>R</i>	Eficiencia de remoción de agua. Fracción	
<i>X_i</i>	Fracción Molar de Componente i en Líquido	
<i>X</i>	Concentración TEG pobre. Fracción másica	
<i>Y_i</i>	Fracción Molar de Componente i en Vapor	
<i>T_d</i>	Temperatura de rocío del agua.	<i>°F</i>
<i>T_c</i>	Temperatura del contactor	<i>°F</i>
<i>W</i>	Pureza TEG. Porcentaje másica	
<i>Ψ</i>	Relación de circulación TEG	<i>gal TEG/lb H₂O</i>

⁴⁷ Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. II). Norman: Campbell Petroleum Series.

3.3. Diseño de Unidades

3.3.1. Contactor

El diseño de la torre de absorción se basa en dos parámetros principalmente: el flujo de gas y el número de etapas de equilibrio. De esta manera, el diámetro del contactor depende casi exclusivamente en la tasa del gas y es prácticamente independiente de la tasa de circulación de TEG puesto que esta es relativamente baja. Además, la altura de la torre se determina con el número de etapas de equilibrio y la eficiencia en la transferencia másica de los contactos. Es necesario resaltar que los platos, usualmente las bandejas de burbujeo (bubblecap tray), y los empaques, usualmente estructurados, son los dos tipos de contactores utilizados en sistemas TEG.⁴⁸

3.3.1.1. Platos de Contacto

En este tipo de contactos, el líquido en el plato superior fluye a través de este por gravedad hacia el siguiente plato por medio de un “downcomer”. El líquido fluye a través del segundo plato y repite el mismo proceso hasta alcanzar el fondo de la torre. Además, en cada plato se dispone de un mecanismo para que el flujo de gas en contracorriente burbujee a través del líquido que cruza el plato.

El cálculo del diámetro de la torre de absorción con platos se realiza por medio de la ecuación de Souders y Brown para el diseño de separadores. Esta correlación determina la velocidad permitida del gas, v , que depende de las densidades de los fluidos y un parámetro de diseño, K_s , que para bandejas de burbujeo es 0.18 ft/s .

$$v = K_s \left(\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.5} \quad (51)$$

De esta forma, el cálculo del diámetro se realiza con la siguiente ecuación:

⁴⁸ Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. II). Norman: Campbell Petroleum Series.

$$d = \sqrt{\frac{4q_a}{\pi v}} \quad (52)$$

Donde q_a es el flujo actual (condiciones reales) del gas y puede ser determinado por la siguiente ecuación:

$$q_a = \frac{q_{std}}{86400} \left(\frac{P_{std}}{P_a} \right) \left(\frac{T_a}{T_{std}} \right) Z \quad (53)$$

Por otro lado, la altura del contactor es determinado por el número de contactos reales a partir del número de etapas de equilibrio necesarias. Campbell (1992) reporta que esta conversión se realiza usando la eficiencia de los platos que para un contactor de TEG utilizando bandejas de burbujeo se encuentra entre 25 – 30%. Sin embargo, para la mayoría de cálculos ingenieriles, una eficiencia de 25% conlleva a resultados satisfactorios.

Además, es necesario un espaciado mínimo de 24 in entre cada plato permitiendo un nivel de líquido aceptable en el “downcomer”.

3.3.1.2. Empaques Estructurados

Este tipo de contactores están conformados por una serie de capas onduladas de mallas u hojas corrugadas de metal, plástico o cerámica. El objetivo de su diseño es maximizar el área superficial efectiva permitiendo un mayor contacto entre la fase gaseosa y líquida. Además, debe permitir producir senderos de flujo de alta tortuosidad en tasas de flujo reducidas.

Kister y Gill (1992) modificaron las curvas de la Correlación Generalizada de Caída de Presión (GPDC en sus siglas en inglés) propuestas por Eckert para lograr mejores predicciones utilizando empaques estructurados. Esta correlación relaciona el parámetro de flujo, X, y el parámetro de capacidad, Y, teniendo en cuenta la caída de presión a través de la torre, ΔP , como se muestra en la **Error! Reference source not found.** Esta correlación permite la determinación de la velocidad superficial del

gas teniendo en cuenta una caída de presión determinada y un factor de empaque. Es de gran importancia tener en cuenta que los factores de empaque que se utilicen con la correlación sean los recompilados por Kister y Gill, puesto que las curvas fueron modificadas empíricamente para encajar con dichos valores.

El parámetro de flujo, X , depende principalmente de la relación entre caudales de TEG y gas y es corregido por sus densidades a condiciones de flujo.

$$X = \left(\frac{m_{TEG}}{m_{gas}} \right) \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{TEG}} \right)^{0.5} \quad (54)$$

Se ingresa con el parámetro de flujo en la abscisa de la **Error! Reference source not found.** hacia la curva de caída de presión requerida. Según Campbell (1992), la caída de presión de diseño depende del tipo de sistema y fluidos involucrados. De esta manera, recomienda utilizar caídas de presión entre 0.25 – 0.50 *in H2O/ft packing* para sistemas de absorción con líquidos con tendencia a formar espuma.

A partir del punto de corte del parámetro de flujo y la curva de caída de presión, se toma el valor del parámetro de capacidad, Y , cuya ecuación se muestra a continuación:

$$Y = C_s F_p^{0.5} \nu_{TEG}^{0.05} \quad (55)$$

Donde ν es la viscosidad cinemática de TEG y F_p es el factor de empaque que se encuentran enlistados en la **Tabla 16** para distintos tipos de empaques estructurados.

Además, C_s es la velocidad superficial del gas corregida por las densidades del gas y el líquido.

$$C_s = u_s \sqrt{\frac{\rho_{gas}}{\rho_{TEG} - \rho_{gas}}} \quad (56)$$

Tabla 16. Factores de Empaque. GPDC modificada por Kister & Gill.⁴⁹

Material	Serie	Referencia	Fp [1/ft]	Material	Serie	Referencia	Fp [1/ft]
Metal	Sulker	CY	70	Metal	Flexipack Y	4Y	7
Metal	Sulker	BX	21	Metal	Gempack	4A	32
Metal	Mellapack	500Y	34	Metal	Gempack	3A	21
Metal	Mellapack	350Y	23	Metal	Gempack	2A	16
Metal	Mellapack	250Y	20	Metal	Gempack	1.5A	12
Metal	Mellapack	125Y	10	Metal	Gempack	1A	9
Metal	Mellapack Plus	752Y	40	Metal	Gempack	0.5A	6
Metal	Mellapack Plus	454Y	21	Metal	Montz	B1300	33
Metal	Mellapack Plus	252Y	12	Metal	Montz	B1250	20
Metal	Flexipack	1	30	Metal	Intaloz	1T	20
Metal	Flexipack	2	13	Metal	Intaloz	2T	17
Metal	Flexipack	3	8	Metal	Intaloz	3T	12
Metal	Flexipack	4	6	Metal	Jeeger	--	12
Metal	Flexipack HC	700Y	68	Plástico	Flexipack X	1X	16
Metal	Flexipack HC	1Y	25	Plástico	Flexipack X	1.6X	10
Metal	Flexipack HC	1.6Y	17	Plástico	Flexipack X	2X	7
Metal	Flexipack HC	2Y	13	Plástico	Flexipack X	3X	5
Metal	Flexipack Y	1Y	30	Plástico	Mellapack	250Y	22
Metal	Flexipack Y	1.6Y	18	Cerámica	Flexeramic	28	30
Metal	Flexipack Y	2Y	15	Cerámica	Flexeramic	48	24
Metal	Flexipack Y	3Y	9	Cerámica	Flexeramic	88	15

Una vez se determina el valor de u_s , el diámetro del empaque puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$d = \sqrt{\frac{4q_a}{\pi u_s}} \quad (57)$$

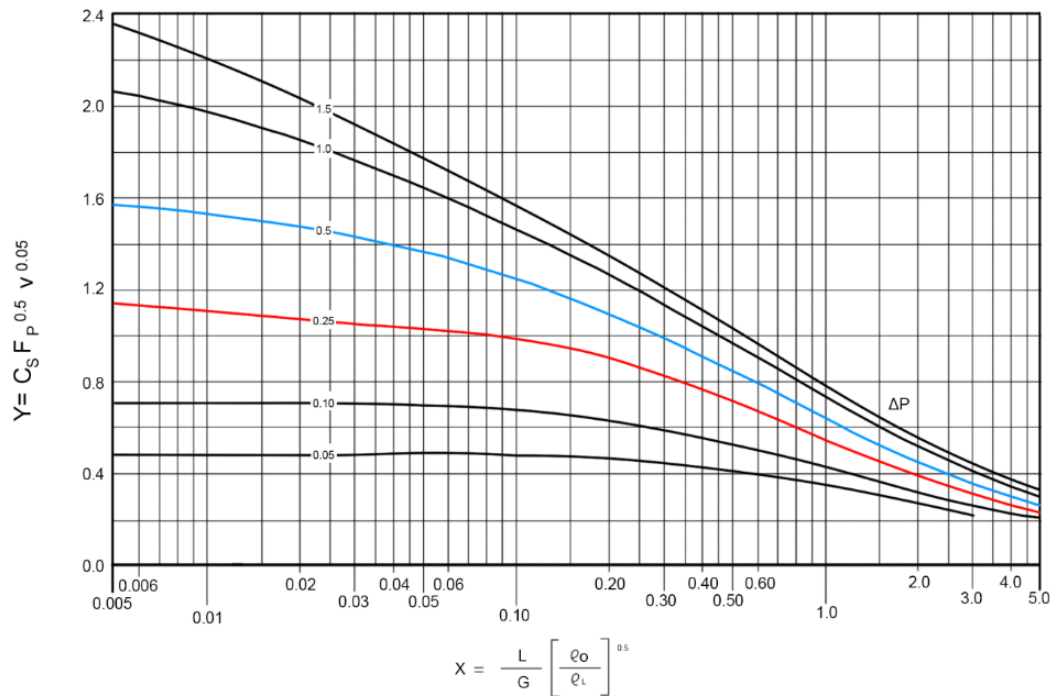
Para la determinación de la altura de la torre de absorción con empaques, las etapas de equilibrio son convertidas en alturas de empaque utilizando alturas equivalentes a un plato teórico (HETP en sus siglas en ingles). El HETP es determinado experimentalmente en laboratorios o pruebas piloto. Este es una función del tipo de empaque, densidades del líquido y gas, viscosidad del líquido, difusividad de la tensión superficial y la relación de flujos entre gas y líquido.

Por ese motivo, la altura equivalente es diferente para cada uno de los tipos de empaque disponibles en la. Sin embargo, Campbell (1992) reporta que para la realización cálculos de diseño y planeación preliminar, un HETP de 5.3 – 6.5 ft

⁴⁹ KISTER, H. Z., Scherffius, J., Afshar, K., & Abkar, E. Realistically Predict Capacity and Pressure Drop for Packed Columns. *CEP*, 2007.

puede ser usado para empaques estructurados aplicados en un sistema de deshidratación de gas.

Figura 1. Gráfica de la Correlación Generalizada de Caída de Presión modificada por Kister & Gill para empaques estructurados.⁵⁰



3.3.2. Rehervidor

Este equipo provee el calor necesario para hervir el agua mezclada con el glicol para que salga en forma de vapor. Normalmente se utilizan calentadores de contacto directo aunque estos constituyen una fuente de peligro evidente. En otras locaciones, como en plataformas costa afuera, calentadores indirectos con aceite, vapor o gases de combustión proveniente de turbinas y motora son utilizados como medio caliente logrando un ahorro de energía substancial.

Es necesario tener en cuenta que el TEG no sufre una descomposición térmica significativa si su temperatura en el rehervidor es mantenida por debajo de los 400

⁵⁰ KISTER, H. Z., Scherffius, J., Afshar, K., & Abkar, E. Realistically Predict Capacity and Pressure Drop for Packed Columns. *CEP*, 2007.

°F y la temperatura máxima en la zona de contacto con el tubo de fuego no excede los 430 °F.⁵¹

3.3.2.1. Carga Térmica Total

La carga térmica del rehervidor depende de la relación de recirculación de TEG, la eficiencia del intercambiador L/R, el radio de reflujo, el uso de corrientes de gas de despojo y la efectividad del aislante.

Por lo tanto, la carga térmica total, Q_{RT} , es la sumatoria de la carga térmica para calentar el TEG, Q_{R1} , la carga térmica para vaporizar el agua, Q_{R2} , la carga térmica por reflujo de agua, Q_{R3} y la carga térmica debido a pérdidas por calor, Q_{R4} .

$$Q_{RT} = 10^{-6} (Q_{R1} + Q_{R2} + Q_{R3} + Q_{R4}) \quad (58)$$

Donde:

$$Q_{R1} = M_{lean} C_p (T_{reb} - T_{rich}) \quad (59)$$

$$Q_{R2} = M_{H2O} H_{fg} \quad (60)$$

$$Q_{R3} = R_{reflux} Q_{R2} \quad (61)$$

Además, a partir de la carga térmica total y el flujo térmico por unidad de área característico del método de calentamiento, Q_{Flux} , es posible determinar el área de transferencia de calor para la unidad.

$$A = \frac{10^6 Q_{RT}}{Q_{flux}} \quad (62)$$

3.3.2.2. Gas de Despojo

A una presión atmosférica y la máxima temperatura permitida para TEG evitando su degradación (400°F), la máxima concentración de TEG pobre que puede ser alcanzada es de 98.5%wt en el rehervidor. Si la concentración de TEG requerida en la torre de absorción para lograr la especificación de contenido de agua deseada es

⁵¹ Manning Francis S. Oilfield Processing of Petroleum. - Tulsa : PennWell Publishing Company, 1991. - Vol. 1.

mayor a esta pureza, es necesario implementar un proceso adicional para aumentar dicha concentración

La adición de cualquier gas inerte, una porción del gas siendo deshidratado o los gases de combustión provenientes de la bomba pueden ser introducidos directamente en el rehervidor buscando generar un efecto de despojo (stripping) en el que parte del agua presente en el TEG se transfiere a la corriente de gas.

Tabla 17. Parámetros de la correlación para el cálculo de la tasa de gas de despojo en el rehervidor.⁵²

Parámetro	Numero de Etapas Teóricas en la Sección de Gas de Despojo		
	0	1	2
a	10.1283	10.1120	10.1110
b	0.329158	5.35913	10.7577
c	-1.32139	-6.35126	-11.7470
d	0.046894	-1.74132	-1.91403
e	-0.000143	0.000381	0.000408
f	0.000	0.004497	0.004911
g	380		
T	360 – 400 ° F		
X	0.9850 – 0.9995		
A	4		

Moshfeghian (2013) presenta una correlación que permite determinar la tasa de gas de despojo necesaria, TGD, a partir de la fracción másica de TEG pobre requerida, X, y la temperatura del rehervidor, T.

$$TGD = \left[\frac{ax - 10}{1 + bx + cx^2} \right] + [dy + ey^2 + fy^3] \quad (63)$$

Donde:

$$y = [g - T]x \quad (64)$$

Los parámetros a, b, c, d, e, f y g mostrados en la **Tabla 17** dependen del número de etapas necesarias en la columna de despojo. Esta correlación presenta

⁵² MOSHFEGHIAN, Mahmood. TEG Dehydration: Stripping Gas Correlations for Lean TEG Regeneration. PetroSkills, 2013.

resultados aceptables en un rango de temperatura de 360 – 400 °F y una concentración de TEG de 0.9850 – 0.9995. Si se requiere alcanzar concentraciones mayores a las anteriores, será necesario aplicar otros métodos.

3.3.3. Intercambiador L/R

En el proceso de deshidratación de gas natural existen diferentes configuraciones de los equipos que permiten mejorar la eficiencia energética del sistema permitiendo el intercambio de calor entre dos fluidos a diferente temperatura.

El intercambiador de calor de TEG rico/TEG pobre (L/R) extrae calor del TEG pobre que regresa al contactor y entrega este calor al TEG rico que se dirige a la columna regeneradora. Este intercambiador trabaja con diferencias de temperatura altas, es decir, la temperatura del TEG pobre a la salida es mucho menor que la temperatura del glicol rico a la salida. Por lo tanto, este tipo de servicios requieren un flujo en contra corriente verdadero que es logrado con el uso de intercambiadores de doble tubería o carcaza y tubos.

Usualmente dos o más intercambiadores en serie son usados para controlar la temperatura del TEG rico a la entrada del flash tank y los filtros. También, es posible lograr una mayor eficiencia en el precalentamiento del glicol rico que se dirige a la columna regeneradora al lograr la máxima recuperación del calor ganado por el glicol pobre al salir del rehervidor.⁵³

Campbell (1992) recomienda un “approach” de 27 – 30 °F en el intercambiador. Si esta diferencia es muy alta, las cargas térmicas del rehervidor y el enfriador de TEG serán demasiado altas.

Puesto que la temperatura de entrada y salida del TEG rico son conocidas (a partir del “approach”), la carga termina puede ser calculada de la siguiente forma:

⁵³ Manning Francis S. Oilfield Processing of Petroleum. - Tulsa : PennWell Publishing Company, 1991. - Vol. 1.

$$Q_{TEG\ hex} = 1 \times 10^{-6} m_{leanTEG} C_{p\ leanTEG} (T_{out-leanTEG} - T_{in-leanTEG}) \quad (65)$$

Teniendo en cuenta que el intercambio térmico entre ambos fluidos es el mismo, la temperatura de salida del TEG pobre se determina de la siguiente forma:

$$T_{out-leanTEG} = T_{in-leanTEG} - \left[(T_{out-richTEG} - T_{in-richTEG}) \left(\frac{m_{richTEG} C_{p\ richTEG}}{m_{leanTEG} C_{p\ leanTEG}} \right) \right] \quad (66)$$

Cabe recordar que el TEG pobre proveniente del rehervidor entra al intercambiador a una temperatura de 400 °F.

3.3.4. Bomba TEG

La bomba de recirculación de TEG contiene las únicas partes móviles del proceso. Se encarga de regresar el TEG pobre de baja presión a la presión de entrada del contactor. Puesto que el proceso de deshidratación se detiene por completo si no se permite la circulación de líquido, son necesarias dos bombas de glicol, cada una capaz de proveer la circulación requerida.

La potencia requerida por la bomba para comprimir el fluido puede ser calculado con la ecuación presentada a continuación.

$$BHP = \frac{0.00058333 Q_{TEG} (P_{contactor} + \Delta P_{GAS\ hex} - P_{reboiler})}{\gamma_{TEG} E} \quad (67)$$

El cambio de temperatura provocado al fluido durante la compresión puede ser determinado con la siguiente ecuación:

$$T_{out-leanTEG} = \frac{2545 BHP}{m_{leanTEG} C_{p\ leanTEG}} + T_{in-leanTEG} \quad (68)$$

3.3.5. Intercambiador Gas/TEG

Es necesario suplir el glicol pobre a la torre de absorción a una temperatura entre 5 – 15 °F por encima de la temperatura del gas natural que entra a la torre. En consecuencia, es necesario utilizar un enfriador aguas abajo del L/R HEX. Generalmente, un intercambiador TEG – gas es utilizado para este proceso.

Manning (1991) reporta que si la temperatura del glicol pobre que entra a la torre es muy alta, los platos superiores actuaran como un intercambiador de calor incrementando la presión parcial del vapor de agua y reduciendo la eficiencia del proceso de deshidratación.

Los cálculos de transferencia de calor son los mismos que para el intercambiador L/R.

$$Q_{GAS\ hex} = 10^{-6} m_{leanTEG} C_{p\ leanTEG} (T_{in-leanTEG} - T_{out-leanTEG}) \quad (69)$$

$$T_{out-GAS} = \frac{Q_{GAS\ hex}}{m_{GAS} C_{p\ GAS}} + T_{in-GAS} \quad (70)$$

La temperatura del gas a la salida de la torre de absorción es entre 1 – 2 °F mayor que la temperatura de entrada.

3.3.6. Nomenclatura

Tabla 18. Nomenclatura de la sección “Diseño de Unidades”.

Variable	Definición	Unidades
A	Área de transferencia de calor	ft^2
BHP	Trabajo de la bomba	HP
C_p	Capacidad calorífica	$BTU/lb\ ^\circ F$
d	Diámetro de la torre de absorción	ft
E	Eficiencia termodinámica de la bomba. Fracción.	
F_p	Factor de Empaque	ft^{-1}
h_{fg}	Calor latente de evaporización H2O a presión del rehervidor	
K_s	Parámetro de Diseño	ft/s
L	Flujo TEG pobre	gal/min
m	Flujo másico	lb/hr
P_a	Presión actual del flujo	$psia$
P_{std}	Presión estándar	$psia$
R_{reflux}	Relación de reflujo de agua en la columna destiladora	
q_a	Flujo actual de gas	ft^3/s

Tabla 18. Continuación: Nomenclatura de la sección “Diseño de Unidades”

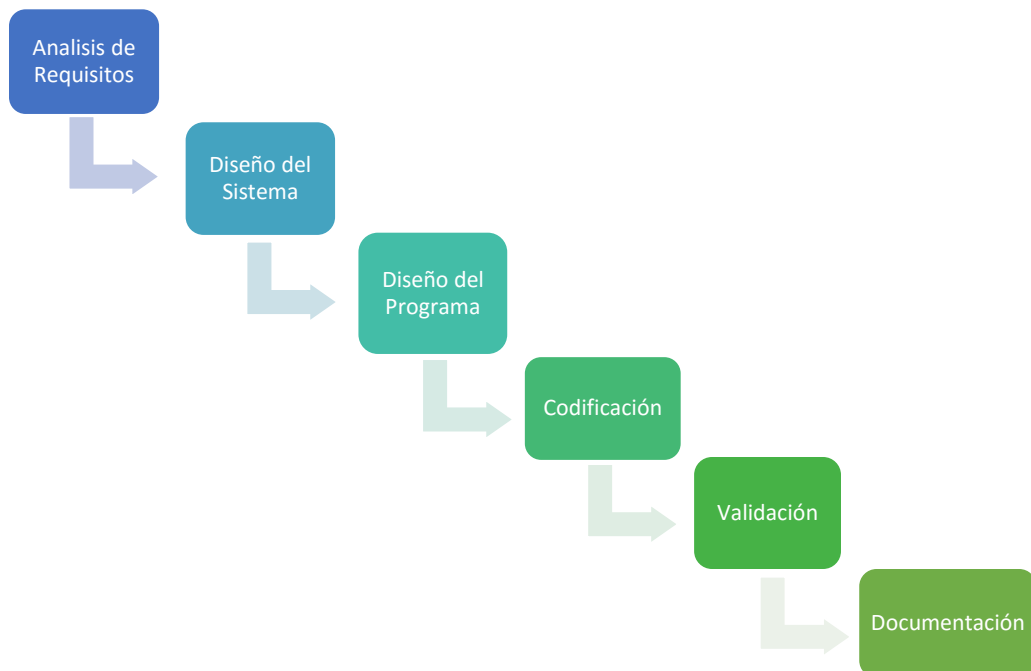
Variable	Definición	Unidades
q_{std}	Flujo de gas a condiciones estándar	SCF/d
T	Temperatura del fluido	$^{\circ}F$
T_a	Temperatura actual de flujo	R
T_{std}	Temperatura estándar	R
TGD	Tasa de gas de despojo	$SCF\ gas/gal\ TEG$
Q	Carga térmica	$MMBTU/hr$
v	Velocidad permitida de gas	ft/s
v_{TEG}	Viscosidad Cinemática TEG	cSt
X	Parámetro de flujo	
Y	Parámetro de capacidad	
Z	Factor de compresibilidad de gas	
ρ	Densidad del fluido	lb/ft^3

4. METODOLOGIA DE DISEÑO

La organización de las labores requeridas para el desarrollo de la aplicación es de vital importancia para el manejo de todas las actividades involucradas en el proceso. De la misma forma, la determinación de una metodología de diseño para el desarrollo de la aplicación HYTEG permitió definir un conjunto de etapas decididas que se debían seguir para iniciar y finalizar el proyecto. Además, la mayor ventaja de aplicar dicha metodología fue la seguridad de que ninguna tarea necesaria fue olvidada en algún punto del diseño, permitiendo cumplir con las fechas establecidas para la finalización de cada etapa.

La metodología de diseño utilizada es el modelo de cascada. Este modelo implica un desarrollo de actividades de forma secuencial (etapas) y el cual permite avanzar siempre y cuando se haya logrado la finalización de la etapa inmediatamente anterior como se puede ver en la **Figura 2**.

Figura 2. Metodología de Cascada.



Este modelo provee un método estructurado, de fácil entendimiento y con etapas definidas. Además, permite la selección de metas fácilmente identificables dando énfasis en la documentación de cada una de las actividades realizadas durante el proceso.

A continuación se describe cada una de las etapas involucradas en la metodología, los objetivos de cada una de ellas y los resultados logrados por medio de la documentación realizada.

4.1. Análisis de Requisitos

En esta fase se analizó las necesidades de los usuarios finales del software para determinar qué objetivos se debía cubrir. Por lo tanto, fue necesario la realización de un estado del arte de los fenómenos fisicoquímicos y termodinámicos involucrados en el proceso de deshidratación de gas natural con TEG así como también, los modelos matemáticos y correlaciones que hacen parte del diseño de los diferentes equipos involucrados en dicho proceso.

Toda la información recompilada fue presentada en el capítulo “Fundamentación Teórica” del presente libro. Sin embargo, se encontró que la herramienta sería de mayor utilidad si se permitía al usuario tener acceso a las correlaciones y modelos matemáticos utilizados para la generación de los datos mostrados en la aplicación. Es por esto que se decidió organizar la información en un conjunto de formularios que fueron estructurados bajo un mismo formato y que además, serían adjuntados al producto final permitiendo relacionar los datos mostrados con los modelos matemáticos usados para ser calculados.

En el anexo 1 se muestra un ejemplo del formulario correspondiente al cálculo del factor de compresibilidad de un gas natural (Z). Dicho formulario sigue la siguiente estructura:

1. Código de Identificación
2. Nombre de la correlación o fenómeno físico.
3. Listado de ecuaciones que constituyen el modelo.
4. Nomenclatura y unidades utilizadas en las ecuaciones.
5. Listado de constantes y parámetros de correlación del modelo.
6. Bibliografía.

El código de identificación fue creado para organizar los formularios de acuerdo a la estructura definida durante la etapa de diseño del sistema. Estos códigos están compuesto por una letra seguida por 2 números que representan lo siguiente:

- La letra hace referencia al equipo en el que dicha correlación es aplicada. De esta forma se tiene: contactor (A), intercambiador L/R (B), rehervidor (C), bomba TEG (D) e intercambiador TEG/gas (E).
- Los números representan la estructura modular definida durante la etapa de diseño del sistema que será mostrada más adelante.

Tabla 19. Listado de Formularios.

Código	Nombre	Código	Nombre
A – 01.01	Factor de Compresibilidad - Gas	A – 05.01	Concentración TEG pobre
A – 01.02	Propiedades Criticas C7+ - Gas	A – 06.01	Diámetro de Plato de Burbujeo
A – 01.03	Factor Acéntrico C7+ - Gas	A – 07.01	Concentración TEG rico
A – 01.04	Gravedad Especifica - Gas	A – 08.01	Tasa de Circulación TEG
A – 01.05	Densidad - Gas	A – 09.01	Numero de Etapas Teóricas Contactor
A – 01.06	Capacidad Calorífica - Gas	A – 10.01	Altura Torre de Platos
A – 01.07	Flujo Volumétrico Real - Gas	A – 11.01	Altura Total Torre de Platos
A – 02.01	Gravedad Especifica – TEG	A – 12.01	Altura Zona de Empaques
A – 02.02	Capacidad Calorífica – TEG	A – 13.01	Altura Total Torre de Empaques
A – 02.03	Flujo Másico - TEG pobre	A – 14.01	Diámetro de Empaque
A – 02.04	Flujo Másico – TEG rico	B – 01.01	Intercambiador L/R
A – 02.05	Viscosidad Cinemática - TEG	C – 01.01	Tasa de Gas de Despojo
A – 03.01	Contenido de Agua – Gas dulce	C – 02.01	Carga Térmica Rehervidor
A – 03.02	Contenido de Agua – Gas agrio	D – 01.01	Bomba TEG
A – 04.01	Temperatura de Rocío del Agua - Gas	E – 01.01	Intercambiador TEG/gas

En la **Tabla 19** se muestra el listado completo de los formularios incluidos en la herramienta. Siguiendo este mismo orden de ideas, se quiso incluir las fuentes bibliográficas utilizadas en el desarrollo de la aplicación en formato digital. Sin embargo, esta tarea se vio restringida por el tamaño y cantidad de los archivos

utilizados por lo que se incluyó únicamente los artículos académicos más relevantes.

Posteriormente, fue necesario identificar los datos que deben ser ingresados (input) por el usuario para que todos los modelos matemáticos y correlaciones puedan ser aplicados y los datos que serían mostrados (output) por la aplicación. Además, se determinó que sería de gran utilidad para el usuario tener acceso a un listado que comprenda todos los rangos (setpoints) en los que los modelos matemáticos pueden ser utilizados generando resultados aceptables. En el Anexo 2 se encuentra una serie de tablas que recopilan toda esta información y que también puede ser accedida por el usuario desde la aplicación.

4.2. Diseño del Sistema

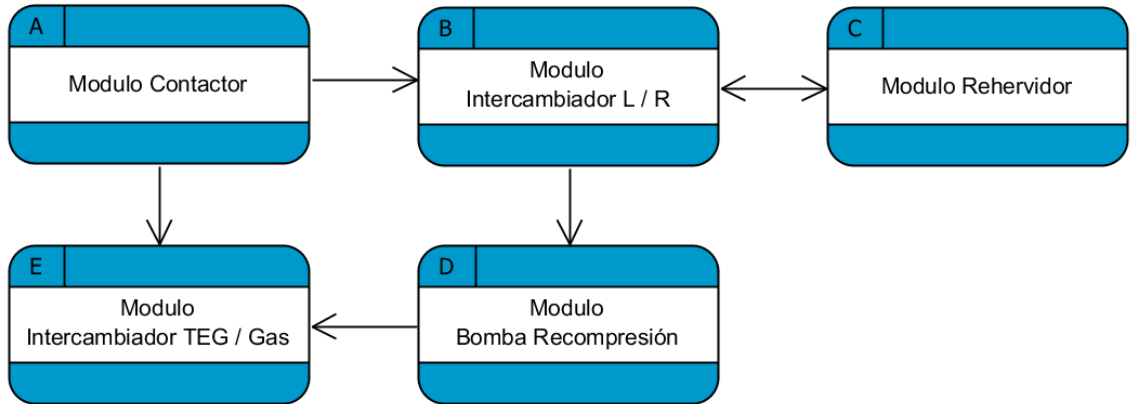
El objetivo de esta etapa es descomponer y organizar el sistema (requisitos del usuario) en un conjunto de módulos que pueden ser elaborados de forma independiente permitiendo aprovechar las ventajas del desarrollo en equipo. Esta tarea también incluye la descripción de la estructura relacional global del sistema y la especificación de lo que se debe hacer en cada una de sus partes.

Siguiendo estos objetivos se dividió esta etapa en 3 tareas principales para la creación de una serie de diagramas de bloques de primero, segundo y tercer nivel que representan la estructura global y detallada del sistema. Además, estos diagramas pueden ser accedidos por el usuario desde la aplicación.

4.2.1. Diagrama de Bloques de Nivel Superior

La **Figura 3** muestra un diagrama de nivel superior que describe, por medio de módulos, la estructura general del sistema de deshidratación de gas natural con TEG teniendo como base las unidades (facilidades) que se tuvieron en cuenta en el desarrollo de la aplicación.

Figura 3. Diagrama de Bloques de Primer Nivel. Sistema de Deshidratación de Gas Natural con TEG.



Se puede observar en **Figura 3** que cada equipo se le asignó una letra correspondiente utilizada en el código de identificación de cada formulario.

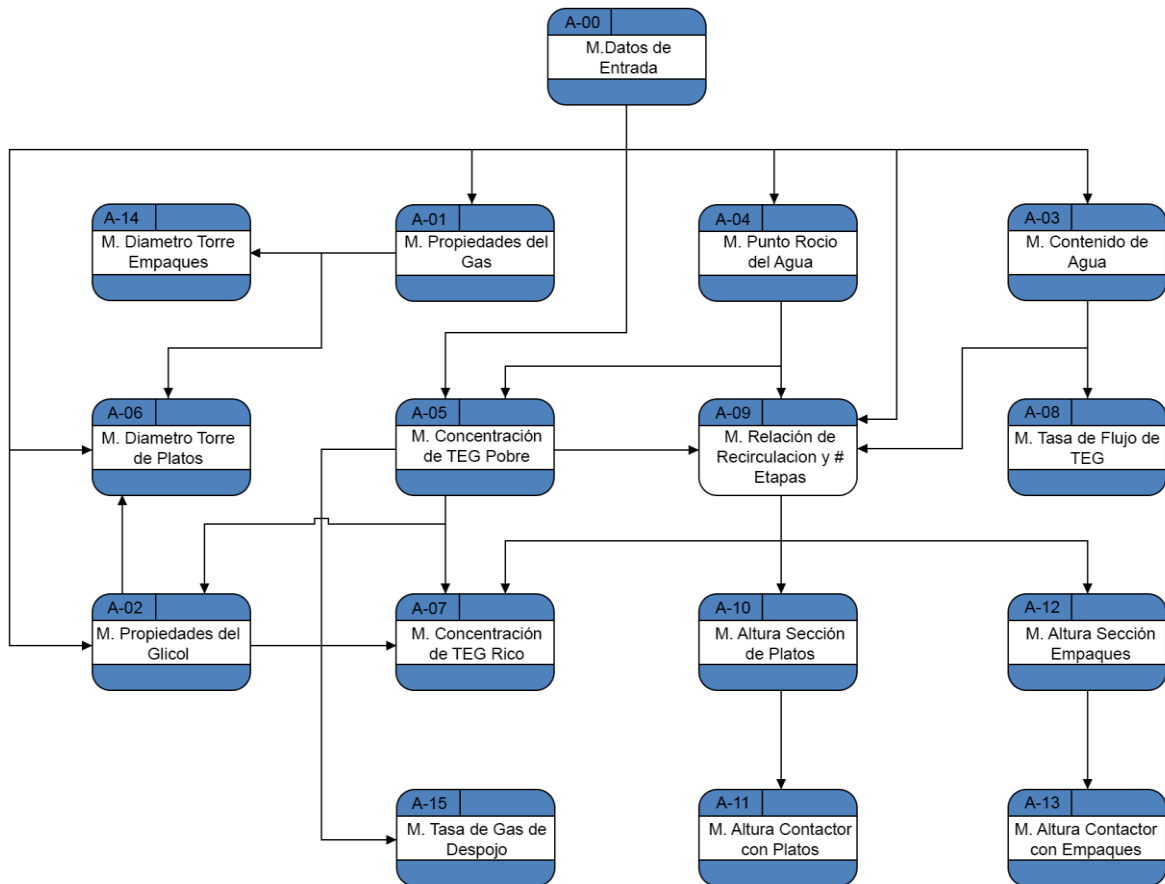
4.2.2. Diagrama de Bloques de Segundo Nivel

Teniendo en cuenta que la aplicación se centra principiante en la torre de absorción, fue necesaria la creación de un diagrama de segundo nivel que describa, por medio de módulos, la relación de los caculos necesarios para el diseño del sistema de deshidratación y el dimensionamiento de dicha unidad.

La **Figura 4** incluye los datos de entrada necesarios por el sistema, los cálculos preliminares (propiedades físicas de los fluidos TEG y gas), los cálculos para la determinación de la tasa y la concentración de TEG; y los cálculos para el dimensionamiento de la torre utilizando platos y empaques estructurados.

Cada uno de los módulos se encuentra marcado con el código utilizado para la identificación de los formularios.

Figura 4. Diagrama de bloques de segundo nivel. Módulos de cálculo de la torre de absorción.



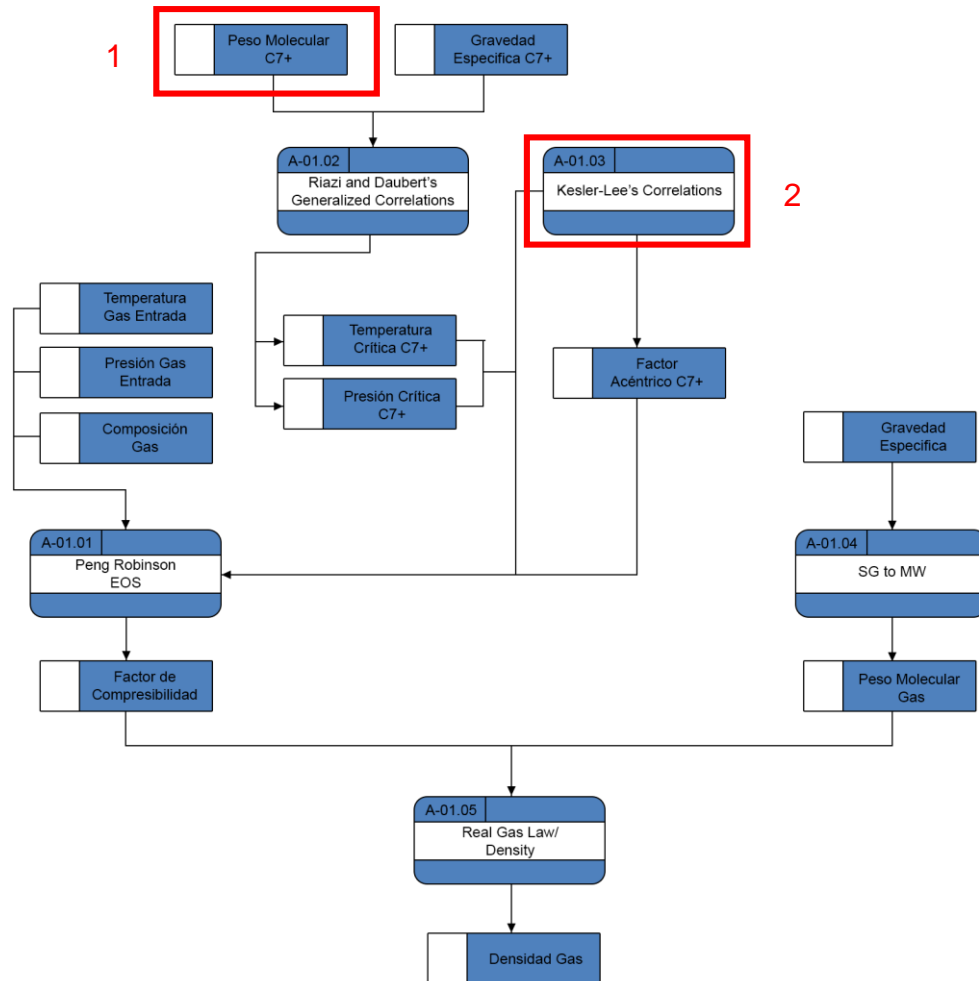
4.2.3. Diagramas de Bloques de Detalle

Se creó un conjunto de diagramas de detalle que especifican los modelos matemáticos requeridos por cada uno de las unidades del sistema y para cada uno de los módulos definidos en la torre de absorción.

El resultado fue una serie de 20 diagramas repartidos de la siguiente forma:

- Torre de absorción: 16 diagramas.
- Intercambiador L/R: 1 diagrama.
- Rehervidor 1 diagrama.
- Bomba de Recompresión: 1 diagrama.
- Intercambiador TEG / gas 1 diagrama.

Figura 5. Diagrama de Detalle. Modelos matemáticos para el cálculo de las propiedades físicas del gas.



La **Figura 5** es un diagrama de las propiedades físicas del gas requeridas por el sistema que incluye las correlaciones utilizadas para el cálculo de las propiedades críticas del C7+, el factor acéntrico del C7+, el factor de compresibilidad y la densidad del gas. Además, muestra las variables que cada correlación requiere para ejecutar los cálculos.

En la **Figura 5** se diferencian 2 tipos de bloques:

- El bloque marcado con el número 1 representa una variable que ya ha sido calculada o que ha sido ingresada por el usuario y cuyo valor se encuentra almacenado en la aplicación.

- El bloque marcado con el numero 2 representa un modelo matemático (proceso) que genera un conjunto de variables cuyo valor también es almacenado por la aplicación.

El conjunto completo de diagramas de detalle se encuentra en el anexo 3. Estos diagramas pueden ser accedidos por el usuario desde la aplicación.

4.3. Diseño del Programa

EL primer objetivo de esta etapa fue el diseño de los algoritmos de solución de los modelos matemáticos utilizados en el sistema cumpliendo con los requisitos encontrados en la etapa de análisis y siguiendo la estructura relacional definida.

Por otro lado, el segundo objetivo que incluye esta etapa fue el diseño de la interfaz gráfica de la aplicación buscando una interacción didáctica con el usuario durante el ingreso de la información de entrada y la presentación de resultados obtenidos.

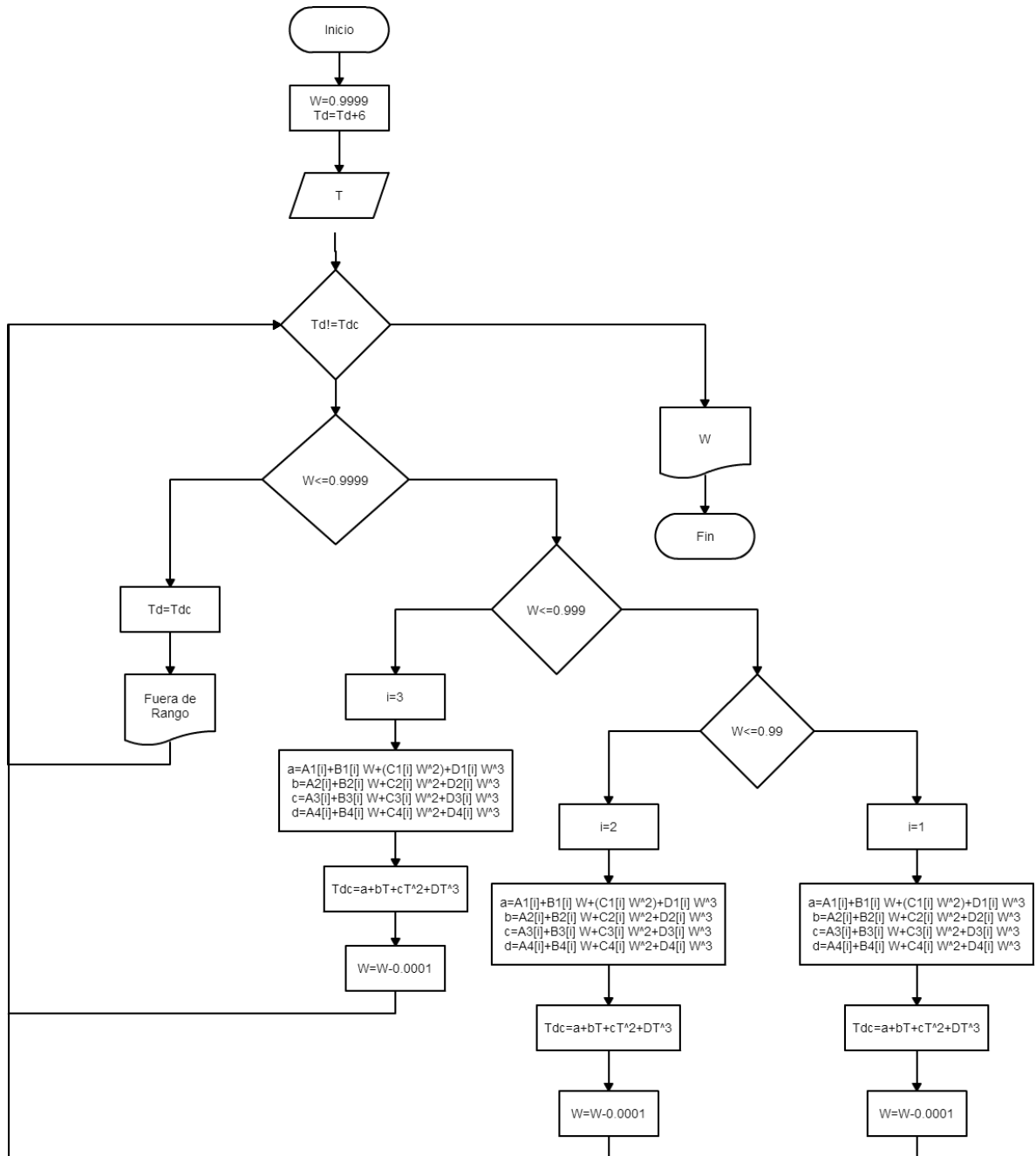
4.3.1. Diseño de Algoritmos de Solución

Se desarrollaron una serie de diagramas de flujo que representan gráficamente el algoritmo diseñado para obtener los resultados mostrados en la interfaz de la aplicación.

La **Figura 6** muestra el cálculo de la concentración de TEG pobre, W , haciendo uso de un bucle WHILE que permite iterar dentro de un rango definido el valor de W . Además, cuenta con 3 condicionales que permiten determinar el set de parámetros de la correlación que deben ser usados según el valor de W .

El anexo 4 presenta el conjunto completo de diagramas de flujo creados para representar todos los algoritmos utilizados para la utilización de los modelos matemáticos en lenguaje de programación. Estos diagramas pueden ser accedidos por el usuario desde la aplicación.

Figura 6. Diagrama de flujo para el cálculo de la concentración de TEG pobre utilizando la correlación de Bahadori & Vuthaluru (2009).



4.3.2. Diseño de la Interfaz de Usuario

Se buscó desarrollar una interfaz limpia y llamativa que permita guiar al usuario de forma secuencial a lo largo del desarrollo de los cálculos involucrados en el diseño

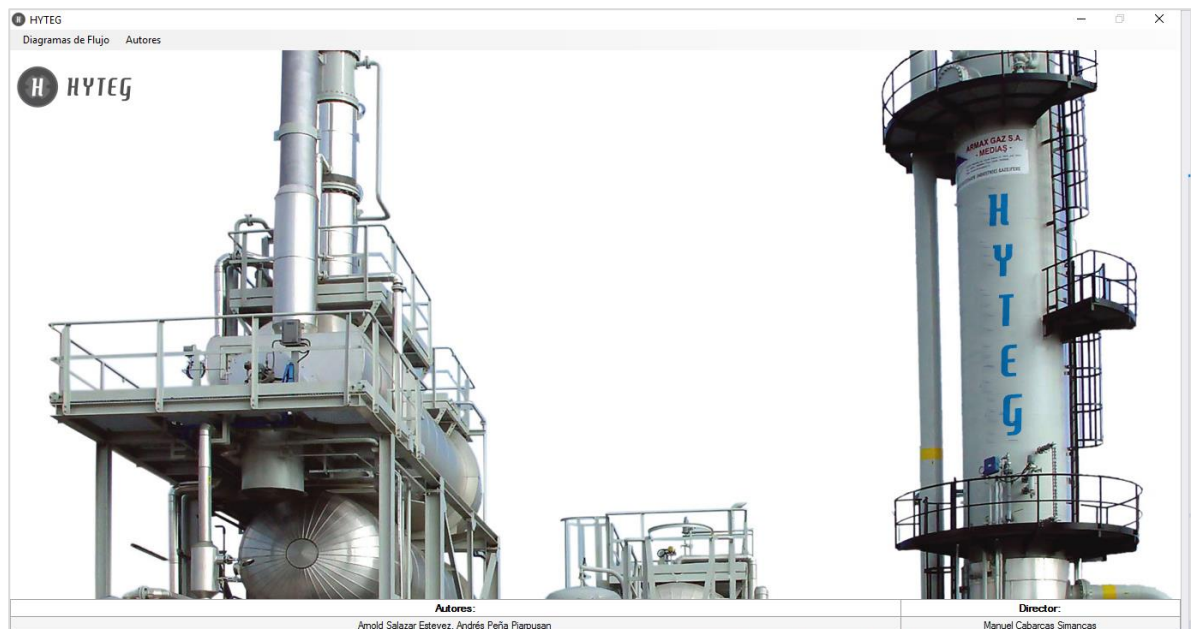
del sistema de deshidratación de gas por TEG. Dicha secuencia facilita la comprensión y aprendizaje del proceso de diseño por el usuario.

A continuación se describen los elementos principales encontrados en los diferentes tipos de interfaces que componen la aplicación.

4.3.2.1. Segundo Plano

En primer lugar, la aplicación alberga la totalidad de la pantalla del computador capturando la atención del usuario durante el uso de la misma. De esta forma, la **Figura 7** muestra una ventana que incluye una imagen de una planta de deshidratación de gas natural real la cual estará siempre presente en un segundo plano, manteniendo las otras ventanas al frente.

Figura 7. Ventana de Segundo Plano “HYTEG”.



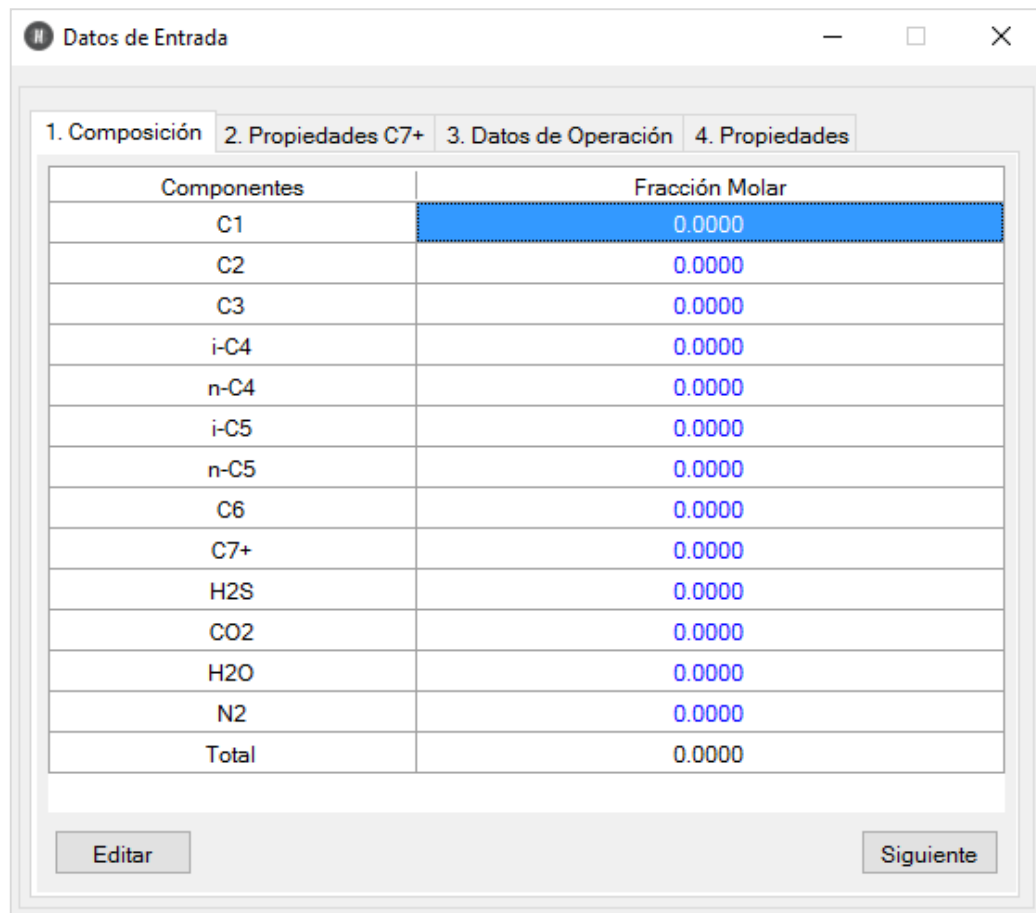
Además, esta ventana incluye un conjunto de botones en la sección del menú superior que permiten acceder a la información de los autores, diagramas de bloques, diagramas de flujo, tablas de setpoints y tablas de validación que se describen en este libro.

Así mismo, en la sección inferior de la ventana se mostrara los nombres de los autores y el director de grupo que serán siempre visibles durante el uso de la aplicación.

4.3.2.2. Datos de Entrada

Esta ventana permite el ingreso de los datos de entrada requeridos para la realización de los cálculos. Como muestra la **Figura 8**, está ventana está conformada por 4 pestañas que permiten la navegación entre diferentes conjuntos de datos requeridos por la aplicación como la composición del gas, las propiedades de la fracción C7+, las condiciones de operación y las propiedades del gas.

Figura 8. Ventana “Datos de Entrada”.



Componentes	Fracción Molar
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
C6	0.0000
C7+	0.0000
H2S	0.0000
CO2	0.0000
H2O	0.0000
N2	0.0000
Total	0.0000

4.3.2.3. Esquema General

Esta ventana muestra un diagrama completo y detallado del proceso de deshidratación del gas natural por TEG. Inicialmente, como muestra la **Figura 9**, esta ventana resalta el equipo que se requiere diseñar permitiendo seguir la secuencia definida en la estructura relacional descrita en la etapa de diseño del sistema. Para esto, este equipo cambia de color de forma intermitente indicándole al usuario que debe dar click sobre este.

Una vez terminado el diseño del contactor, rehervidor, intercambiador L/R, intercambiador TEG/gas y la bomba de recompresión, la ventana permite la navegación entre todos los diferentes equipos que intervienen en el proceso, como muestra la **Figura 10**.

Figura 9. Ventana “Esquema General”. Inicia la secuencia de diseño resaltando el contactor.

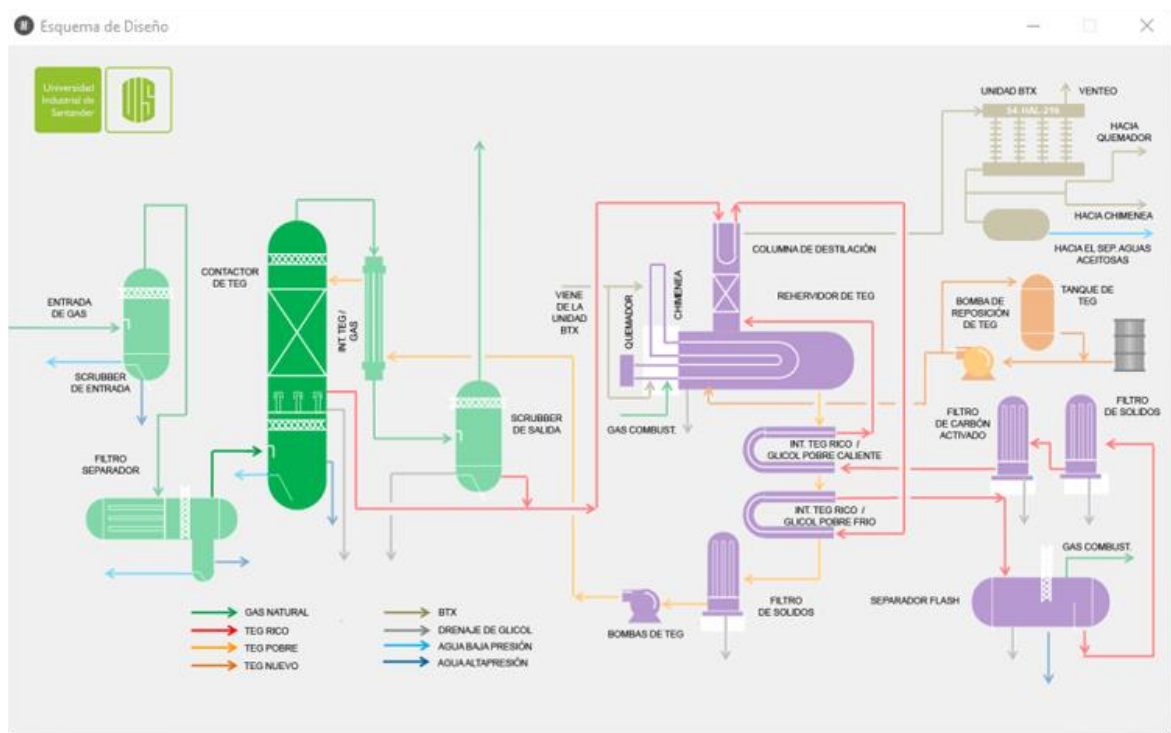
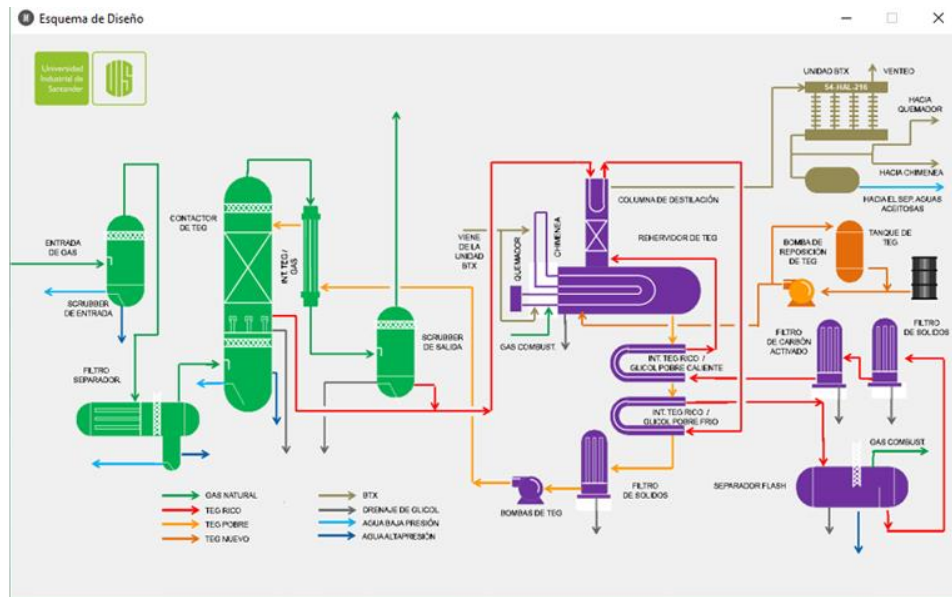


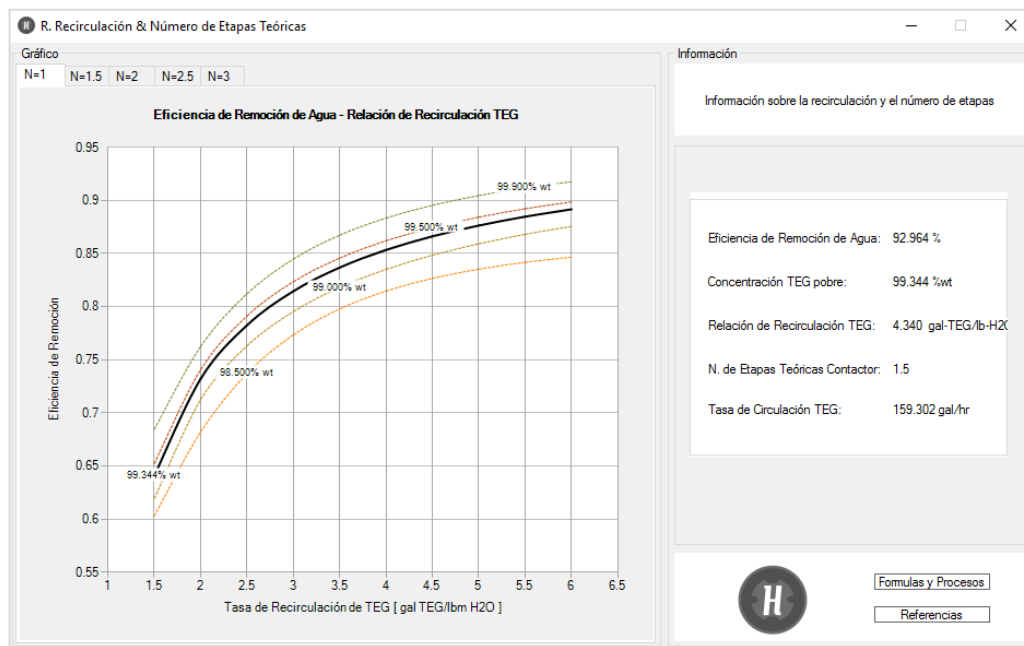
Figura 10. Ventana “Esquema General”. Permite la navegación entre los diferentes equipos del sistema de deshidratación de gas.



4.3.2.4. Equipos

Se definieron 3 tipos de formatos utilizados para mostrar la información incluida para cada uno de los equipos del sistema.

Figura 11. Ventana “R. Recirculación & Número de Etapas Teóricas”



La **Figura 11** muestra el primer formato que está dividido en dos grandes secciones. En la sección de la izquierda se encuentra un grupo de pestañas que contienen una serie de gráficos organizados que permiten visualizar los resultados de los cálculos relacionados con la relación de recirculación de TEG y el número de etapas teóricas del contactor. Por otro lado, en la sección de la derecha se encuentra una serie de resultados relevantes para esta etapa del proceso como: eficiencia de remoción de agua, concentración de TEG pobre, relación de recirculación de TEG, número de etapas teóricas del contactor y la tasa de circulación de TEG. Por último, en la parte inferior de esta sección, se encuentran dos botones (“Formulas y Procesos”; “Referencias”) que permiten al usuario acceder a los formularios creados en la etapa de análisis de requisitos y también a ciertas fuentes bibliográficas relevantes.

La

Figura 12 muestra el segundo formato utilizado que difiere levemente con el primer formato. En la sección de la izquierda se encuentra un grupo de pestañas que contienen una serie de imágenes que permiten visualizar los equipos que se están diseñando. Mientras que la sección de la derecha es igual al primer formato mostrando resultados relevantes del equipo.

La

Figura 12. Ventana “Rehervidor”.

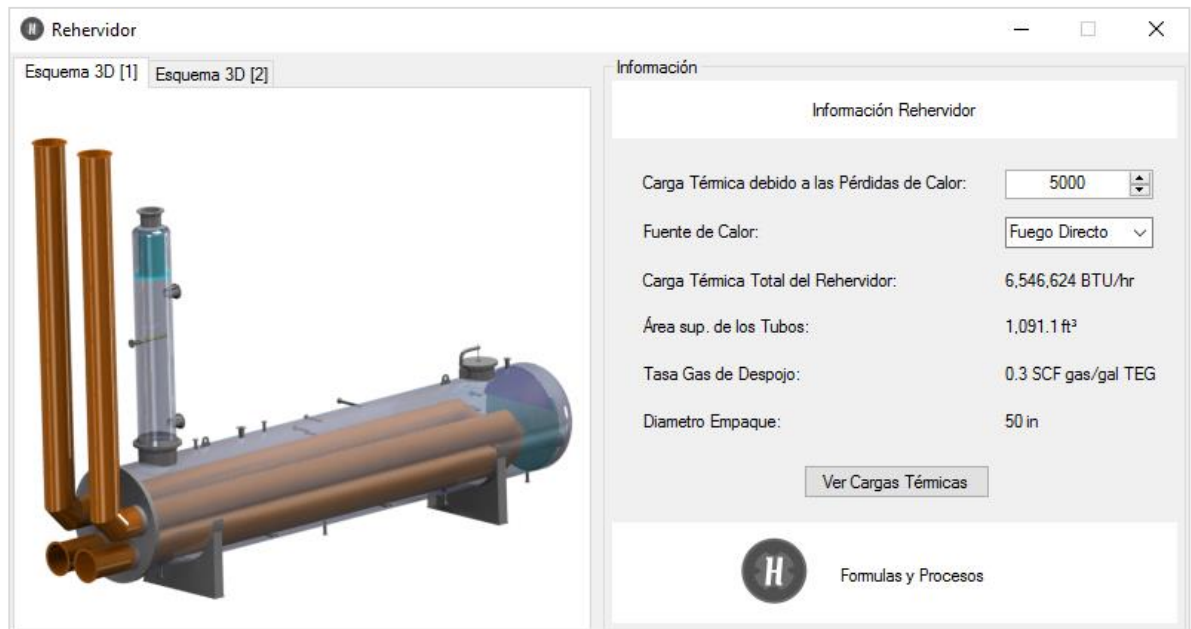


Figura 13 y la **Figura 14** muestran el tercer formato utilizado el cual contiene un conjunto de imágenes del equipo seleccionado. Este formato se utiliza con aquellos equipos que no se incluyen en el proceso de diseño pero que están incluidos en el sistema de deshidratación de gas por TEG como: scrubber de entrada, filtro separador, scrubber de salida, filtro de sólidos, separador flash y tanque de TEG.

Figura 12. Ventana “Rehervidor”.



Figura 13. Ventana “Filtro Separador”

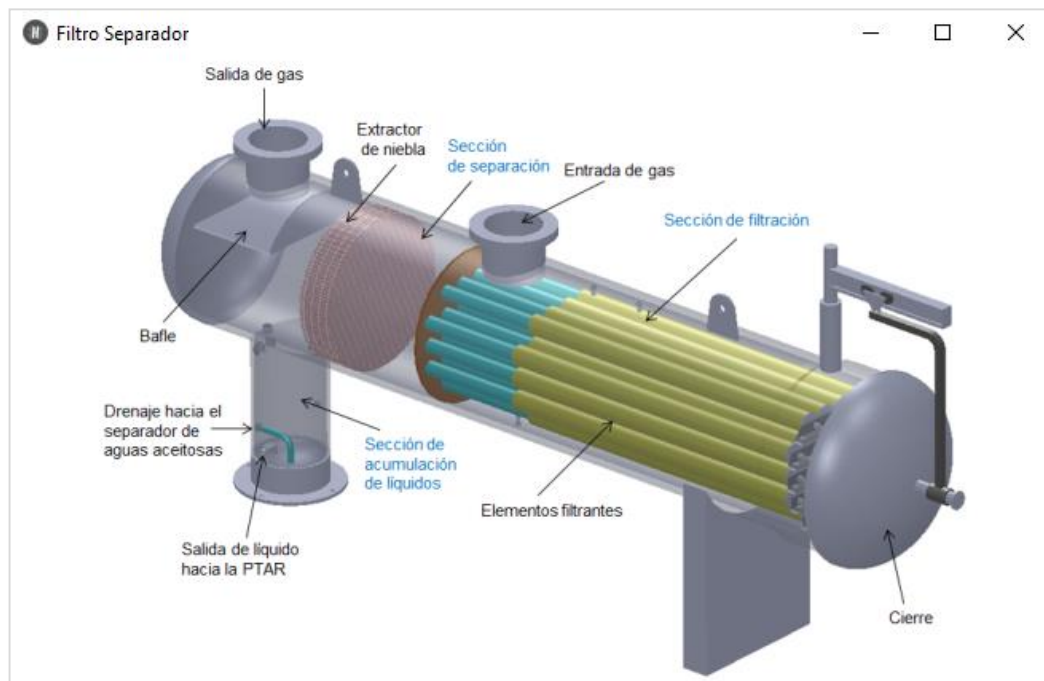
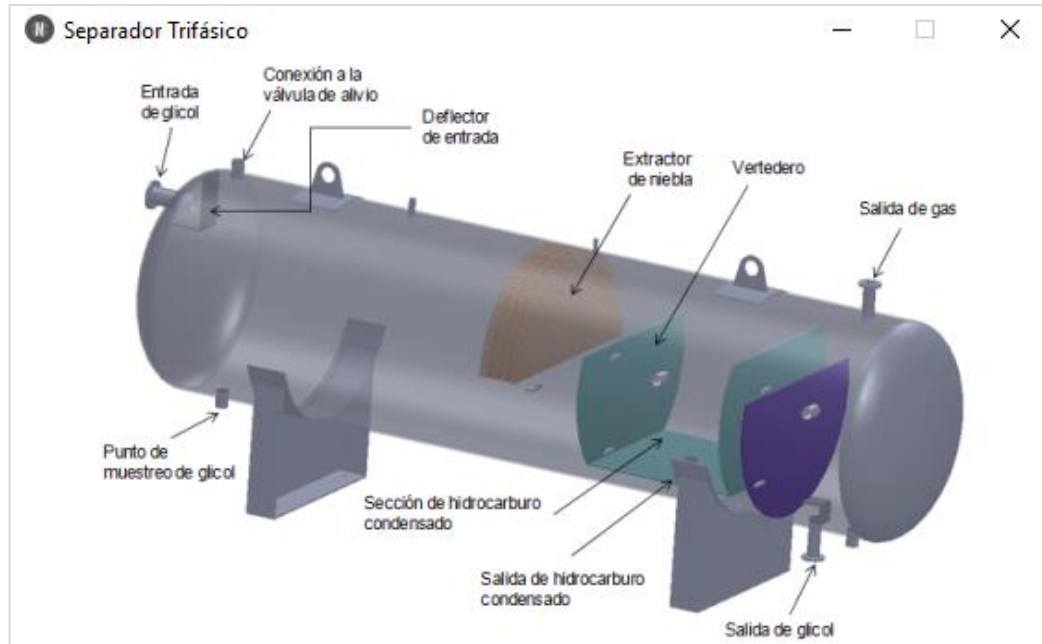


Figura 14. Ventana “Separador Trifásico”



4.3.2.5. Logotipo HYTEG

La **Figura 15** muestra el logotipo con la letra inicial del nombre de la aplicación (HYTEG) Este se creó buscando personalizar las diferentes interfaces de la aplicación y como icono de acceso a la misma.

Figura 15. Logotipo HYTEG



4.4. Programación

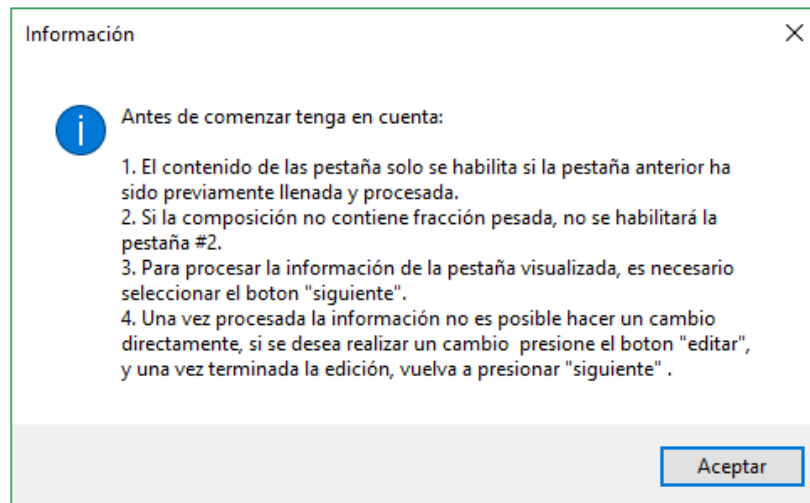
La programación de la aplicación se realizó en Visual Basic. Este es una interface de lenguaje de programación creado por Microsoft que permite a los programadores usar una interface gráfica de usuario para escoger y modificar selecciones preseleccionadas de código escritas en el lenguaje de programación BASIC.

Por esta razón, Visual Basic permite aliviar el conocimiento requerido para el desarrollo de aplicaciones complejas. Además, este lenguaje tiene la capacidad de crear archivos ejecutables (EXE), siendo este uno de los objetivos establecidos del proyecto.

5. MANUAL DE USUARIO

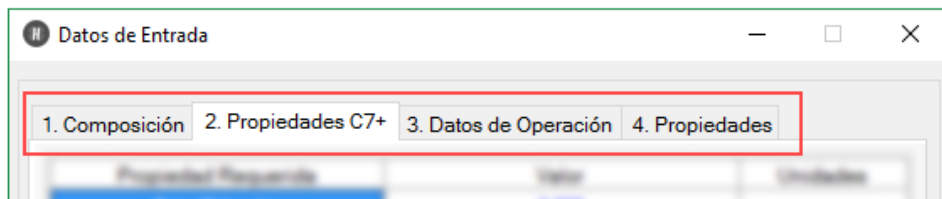
En el software HYTEG el ingreso de datos se da al comienzo del programa, luego de un mensaje informativo el cual explica la forma de interactuar en la primera ventana, tal como muestra la **figura 16**.

Figura 16. Mensaje Inicial Ventana “Datos de Entrada”.



Los datos de entrada se encuentran divididos en 4 pestañas dentro de la ventana “Datos de entrada”, esto con el fin de clasificar la información y facilitar el ingreso de la misma, así como se ve en la **figura 17**.

Figura 17. Pestañas. Ventana “Datos de Entrada”.



La **figura 18**, muestra como la pestaña 1, es habilitada una vez se ve el mensaje de información, es necesario completar la composición del gas para seguir con el proceso (Suma total de las fracciones igual a 1).

Figura 18. Pestaña 1, Ventana “Datos de Entrada”.

Componentes	Fracción Molar
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
C6	0.0000
C7+	0.0000
H2S	0.0000
CO2	0.0000
H2O	0.0000
N2	0.0000
Total	0.0000

Editar b Siguiete

- Sección de ingreso de la composición en fracción molar, del gas de entrada.
- Botones de edición:
 - Editar: Permite modificar el contenido de la pestaña una vez se validó.
 - Siguiete: Permite validar el contenido de la pestaña, dando paso a la siguiente pestaña dentro de la ventana “Datos de Entrada”.

La pestaña 2 solo se habilita si en la pestaña 1 hay fracción del componente C7+ y se ha validado la pestaña 1 dando clic en el botón “Siguiete”, al estar habilitada se pueden agregar las propiedades del componente pesado C7+, Peso Molecular del C7+, Gravedad Especifica del C7+, en esta pestaña 2 también se muestran las propiedades del C7+ calculadas, mencionadas anteriormente en el capítulo 2 del presente Libro, tal como muestra la **figura 19**.

Figura 19. Pestaña 2, Ventana “Datos de Entrada”.

The screenshot shows a software window titled "Datos de Entrada" with four tabs: "1. Composición", "2. Propiedades C7+", "3. Datos de Operación", and "4. Propiedades". The "2. Propiedades C7+" tab is active. It contains two tables. The first table, labeled 'a', is for required properties. The second table, labeled 'b', is for calculated properties. Below the tables is a section for ranges and two buttons: "Edjitar" and "Siguiete".

Propiedad Requerida	Valor	Unidades
Peso Molecular	0.000	
Gravedad Especifica	0.000	

Rangos:
Peso Molecular: 70 - 300

Propiedad Calculada	Valor	Unidades	Info
Presión Crítica	0.000	Psi	Ver
Temperatura Crítica	0.000	R	Ver
Temperatura de Ebullición	0.000	R	Ver
Factor Acéntrico	0.000		Ver

Edjitar Siguiete

- a. Sección de ingreso de datos del componente pesado C7+.
- b. Sección de resultados de las diferentes propiedades de C7+.

Los botones de edición tienen la misma función que la pestaña anterior.

La **figura 20**, nos enseña la pestaña 3, la cual es habilitada una vez se ingresa la composición si no hay fracción del componente pesado C7+ y se ha validado la pestaña 1 dando clic en el botón “Siguiete”; de no ser así, es necesario ingresar los datos de las propiedades del componente pesado C7+ y validar la pestaña 2 dando clic en el botón “Siguiete”.

Los botones de edición tienen la misma función que la pestaña anterior. El contenido de agua requerido posee un valor sugerido por defecto, pero es también una variable de entrada y su valor puede ser modificado.

Figura 20. Pestaña 3, Ventana “Datos de Entrada”.

Dato Requerido	Valor	Unidades
Caudal de Gas	0.000	MMSCFD
Presión	0.000	Psig
Temperatura	0.000	°F
Contenido de Agua Requerido	4.0	lb/MMSCF

Rangos:
Presión: 100 - 1200 Psig
Temperatura.: 75 - 115 °F

Editar Siguiente

- a. Sección de ingreso de datos de operación.

Por otra parte la **Figura 21** muestra la pestaña 4, en la que se encuentran los resultados de las propiedades calculadas del gas de entrada. En esta pestaña se ingresa al diseño de la planta dando clic en el botón “Diseñar”.

- a. Sección de resultados.
- b. Sección de información de extra por propiedad; al dar clic en cada botón “ver” se abre un formulario con el modelo matemático de la propiedad mostrada.
- c. Botón “Diseñar”; despliega la ventana de diseño.

Además, la **figura 22** muestra la ventana de diseño, en la cual se pueden observar la variedad de equipos que toman lugar en el proceso de deshidratación con TEG; una vez concluido el ingreso de la información de la ventana “Datos de Entrada”, el software habilita la unidad contactora para proceder con el diseño.

Figura 21. Pestaña 4, Ventana “Datos de Entrada”.

Datos de Entrada

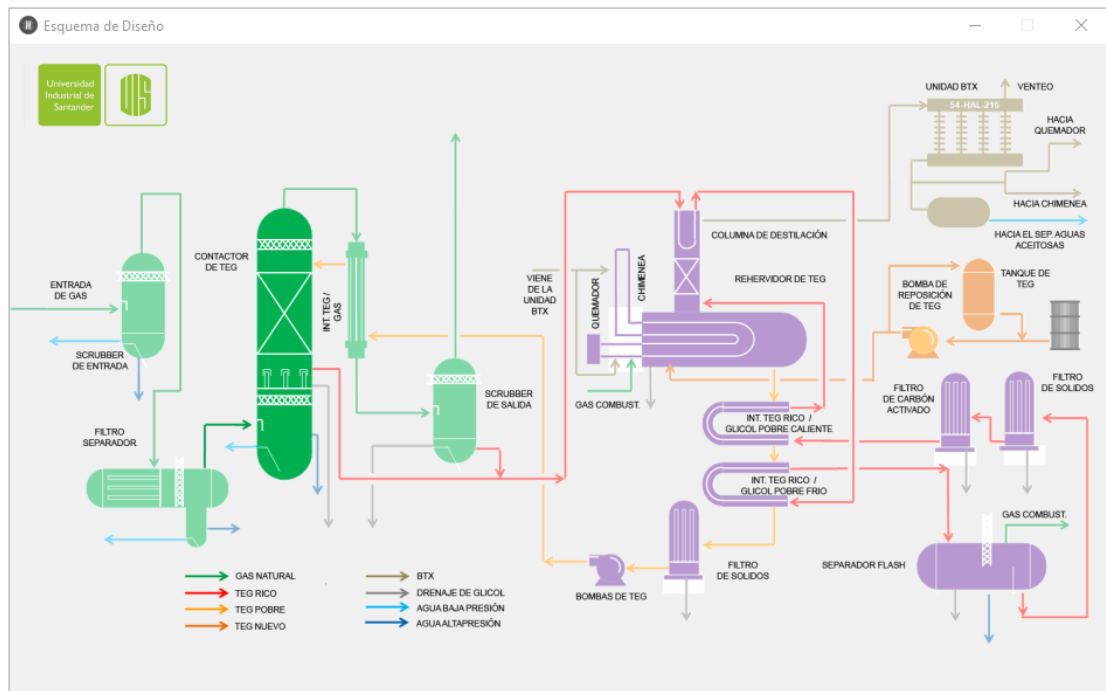
1. Composición 2. Propiedades C7+ 3. Datos de Operación 4. Propiedades

Propiedad Calculada del Gas	Valor	Unidades	Info
Flujo Volumetrico Real	5.861E+004	ft ³ /hr	Ver
Flujo Másico	1.761E+005	lb/hr	Ver
Peso Molecular	16.043		Ver
Gravedad Especifica	0.554		Ver
Factor Z	0.889		Ver
Densidad del Gas	3.005	lb/ft ³	Ver
Contenido de Agua	56.851	lb/MMSCF	Ver
Calor Especifico	0.631	BTU/lb °F	Ver

a b

c Diseñar

Figura 22. Ventana “Esquema de Diseño”, Unidad Contactora Habilitada.

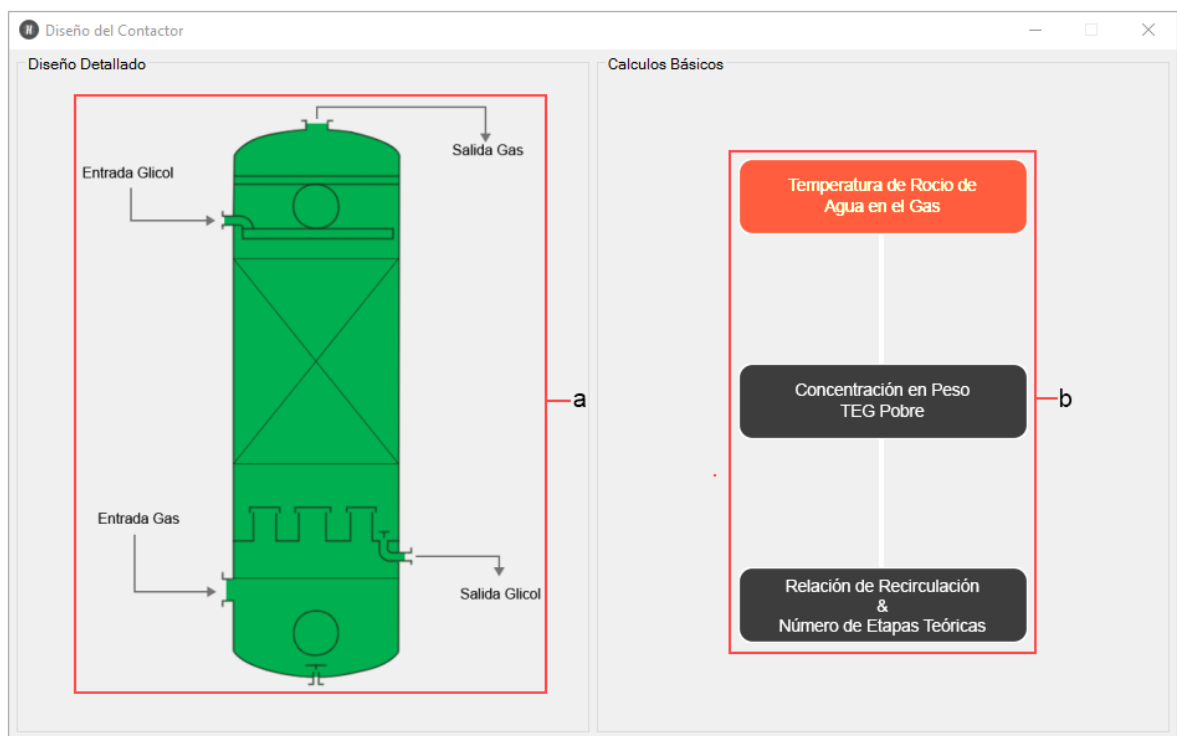


Al dar clic en la unidad contactora se podrá Ingresar a la ventana de diseño de la unidad. Ninguna de las otras unidades está disponible para su diseño.

La ventana de diseño del contactor está dividida en dos secciones, la primera, la sección de cálculos básicos, y la segunda el diseño detallado, tal como muestra la **figura 23**.

La sección de diseño detallado no se encuentra habilitada mientras la sección de cálculos básico no sea terminada. El color naranja intermitente sobre el botón indica la disponibilidad de ingreso a la ventana, una vez terminado el proceso en el primer botón de cálculos básicos, es habilitado el segundo botón, tornándose azul el primero y naranja intermitente el segundo.

Figura 23. Ventana “Diseño del Contactor”, Modulo “Temperatura de Rocío de agua en el Gas”.

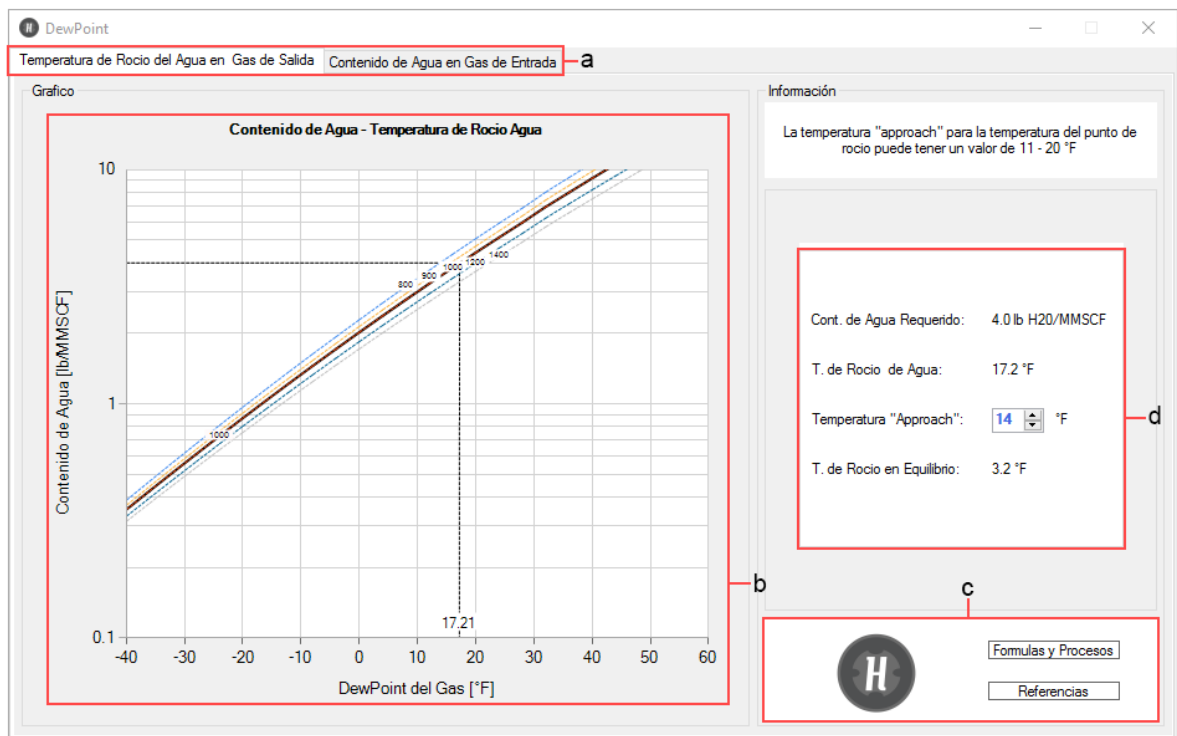


- a. Sección de “Diseño Detallado”.
- b. Sección de “Cálculos Básicos”.

A continuación la **figura 24**, nos muestra la ventana “Temperatura de Rocío de Agua en el Gas” se encuentran dos pestañas de información gráfica, la primera muestra el grafico “Temperatura de Rocío vs Contenido de Agua” y la segunda pestaña el grafico “Contenido de agua vs Temperatura de Rocío”.

En la región información se detalla el valor del “approach” para la temperatura del punto de rocío el cual debe ser ingresado manualmente por el estudiante, pero que por defecto se encuentra en un valor de 14 ° F.

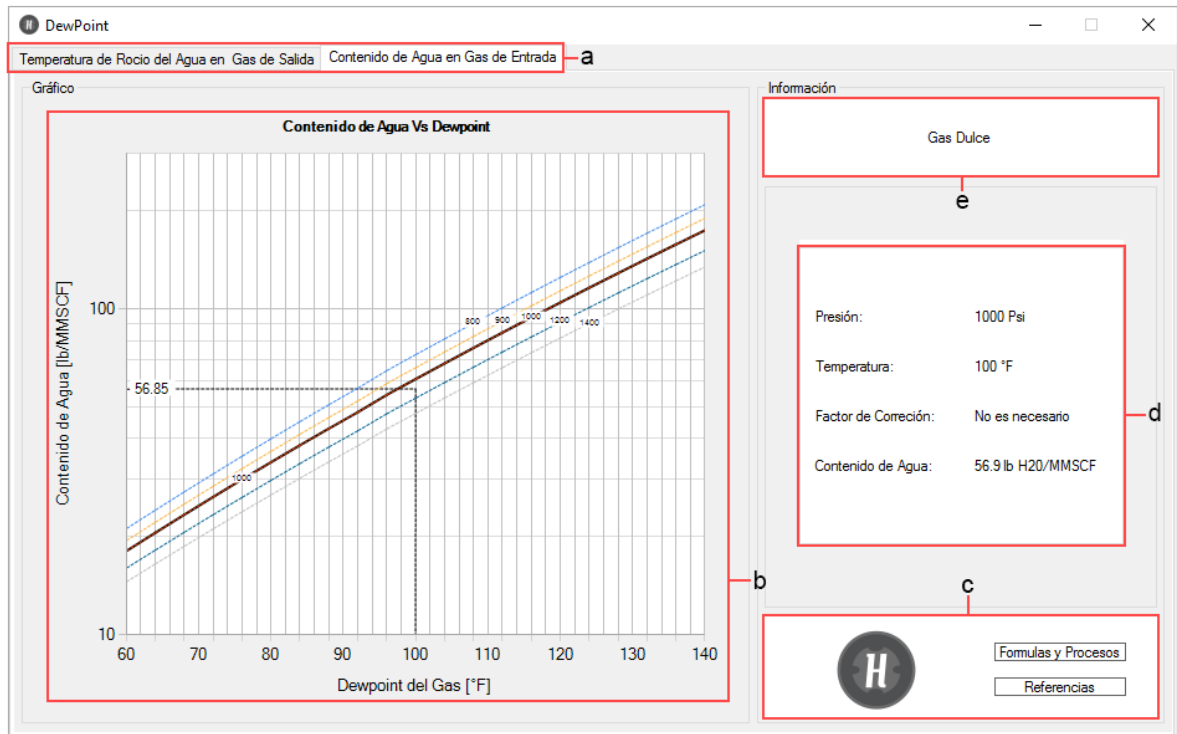
Figura 24. Pestaña 1, ventana “Dewpoint”.



- Sección de selección de pestañas.
- Sección de gráfico del comportamiento del contenido de agua vs la temperatura de rocío a diferentes presiones, incluyendo la presión del gas de entrada (línea continua negra de mayor grosor); en la cual se puede ver gráficamente el cálculo de la temperatura de rocío del agua.
- Sección de fórmulas, procesos y referencias.
- Sección de muestra de resultados e ingreso del approach de la temperatura.

En la **figura 25**, se puede observar la pestaña de contenido de agua en el gas de entrada, en la muestra el tipo de gas, el contenido de agua y el factor de corrección de ser necesario.

Figura 25. Pestaña 2, Venta “DewPoint”.



- Sección de selección de pestañas.
- Sección de gráfico del comportamiento del contenido de agua vs la temperatura de rocío a diferentes presiones, incluyendo la presión del gas de entrada (línea continua negra de mayor grosor); en el cual se puede ver gráficamente el cálculo del contenido de agua a la temperatura de entrada del gas a la torre contactora.
- Sección de fórmulas, procesos y referencias.
- Sección de información del contenido de agua.
- Bloque de información, suministra la información sobre el tipo de gas (gas dulce o gas ácido), si el gas es ácido, al dar clic sobre el bloque se despliega una ventana la cual permite ver el factor de corrección del gas ácido.

Si la composición del gas de entrada posee componentes ácidos, la pestaña 2, de la ventana “Temperatura de Rocío del Agua”, cambia y permite desplegar una ventana nueva con la información gráfica del factor de corrección, tal como muestra la **figura 26** y la **figura 27**.

Figura 26. Sección Pestaña 2, Ventana “DewPoint”.

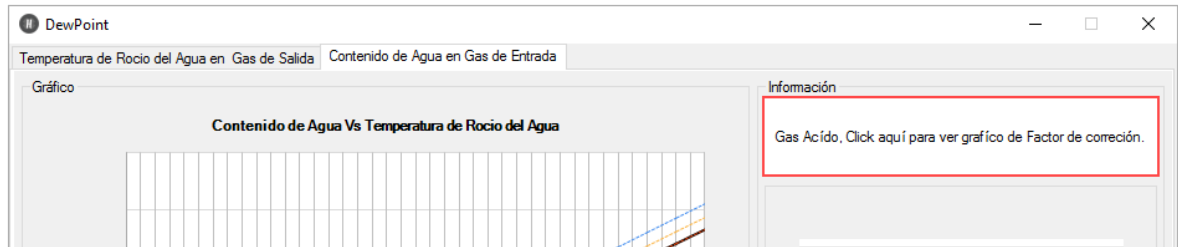
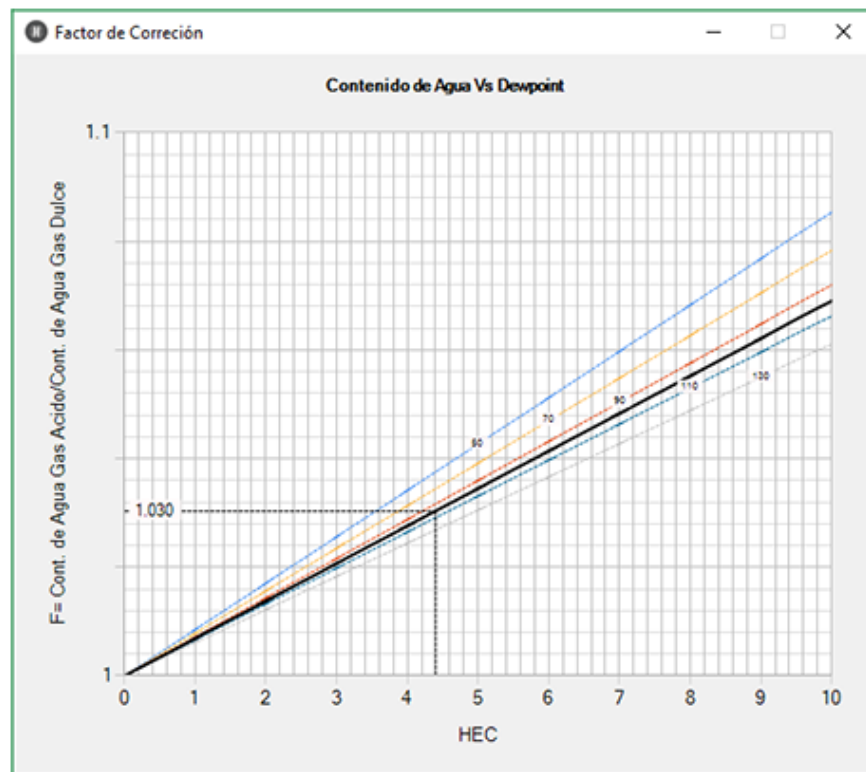


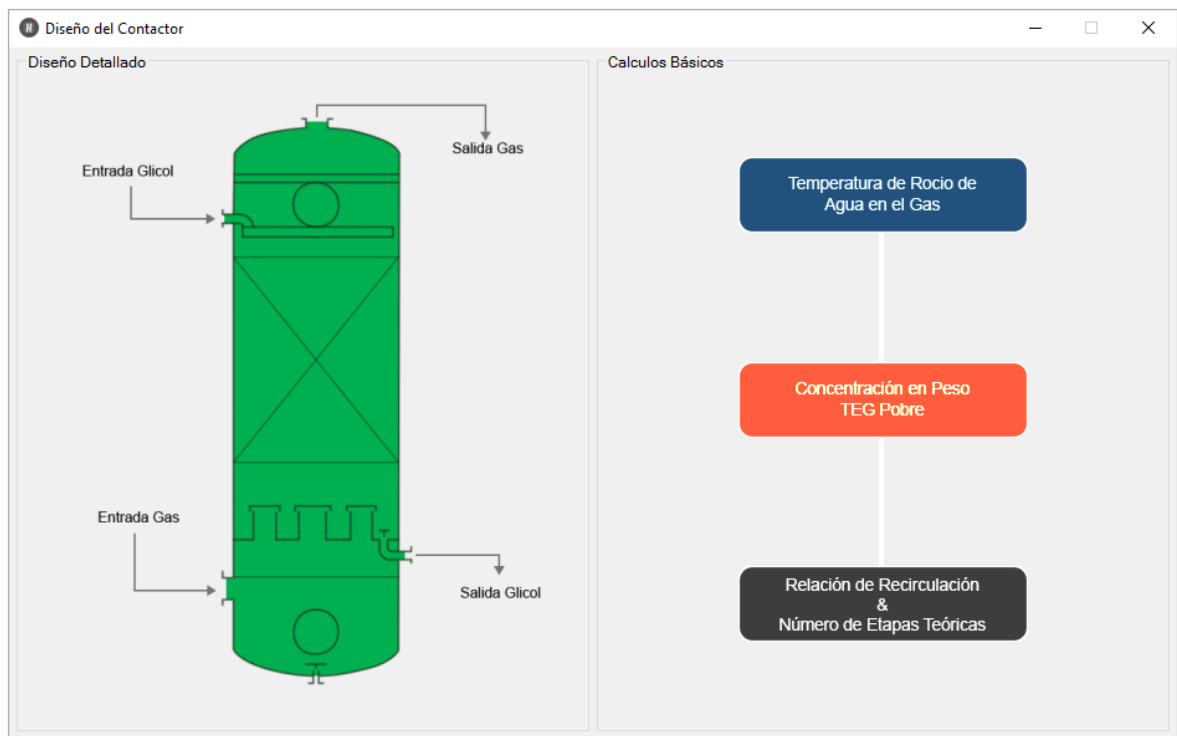
Figura 27. “Ventana Factor de Corrección”.



En la ventana se encuentra el grafico del Factor de corrección vs Concentración equivalente de H₂S (HEC).

Una vez finalizado el proceso de la ventana “DewPoint”, en la **figura 28** se observa que el módulo de temperatura de rocío de agua en el gas es deshabilitado y se habilita el módulo de concentración en peso TEG pobre; el módulo de temperatura de rocío de agua en el gas cambia a color azul, indicando que se finalizó ese subproceso y el módulo de concentración en peso TEG pobre cambia a color naranja indicando que el módulo está habilitado.

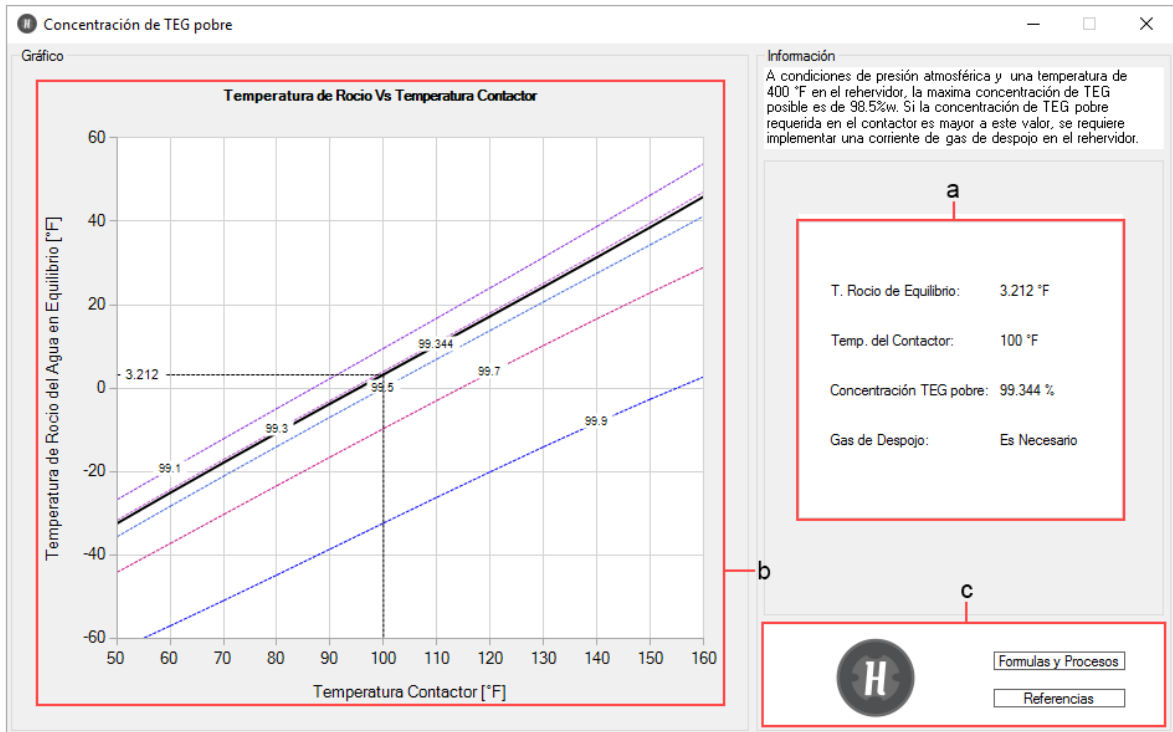
Figura 28. Ventana “Diseño del Contactador”, Modulo “Concentración en Peso TEG Pobre”.



La **figura 29**, muestra la ventana “Concentración de TEG Pobre” en la cual se encuentra el grafico de temperatura de rocío vs temperatura contactor y también se puede observar si es necesario gas de stripping.

- a. Sección de resultados del proceso de cálculo de la concentración de TEG pobre.
- b. Sección grafica del proceso.
- c. Sección de fórmulas, procesos y referencias.

Figura 29. Ventana "Concentración de TEG pobre".



Una vez finalizado el proceso de la ventana “Concentración de TEG Pobre”, el módulo de concentración en peso TEG pobre es deshabilitado y se habilita el módulo de relación de recirculación & número de etapas teóricas; tal como lo muestra la **figura 30**, el módulo de concentración en peso TEG pobre cambia a color azul, indicando que se finalizó ese subproceso y el módulo de relación de recirculación & número de etapas teóricas cambia a color naranja indicando que el módulo está habilitado.

En la ventana de recirculación y número de etapas teóricas (**figura 31**) se encuentra el grafico de eficiencia de remoción vs tasa de recirculación de TEG, para diferentes etapas teóricas, las cuales se pueden apreciar en una serie de pestañas en la parte superior izquierda de la ventana, en la sección de resultados se muestra la etapa más eficiente para el proceso en el caso de que más de una etapa cumpla con las condiciones, y junto con ella la relación de recirculación para el número de etapas que se ha calculado.

Figura 30. Ventana “Diseño del Contactor”, Modulo “Relación de Recirculación & Número de Etapas Teóricas”.

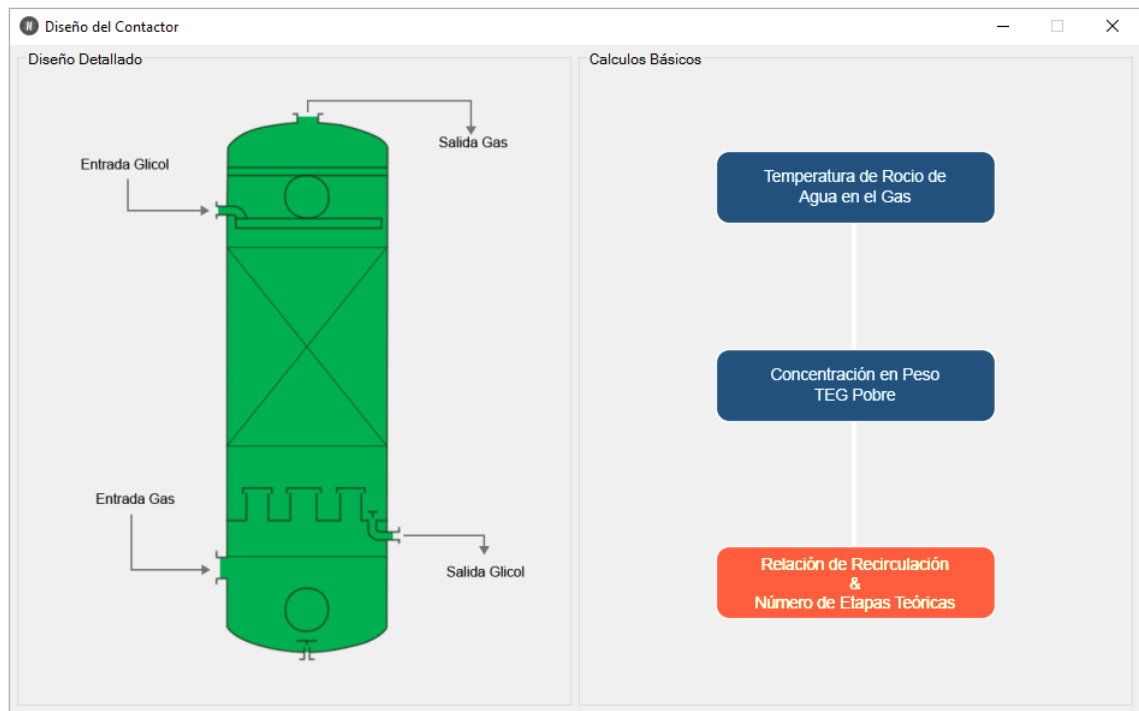
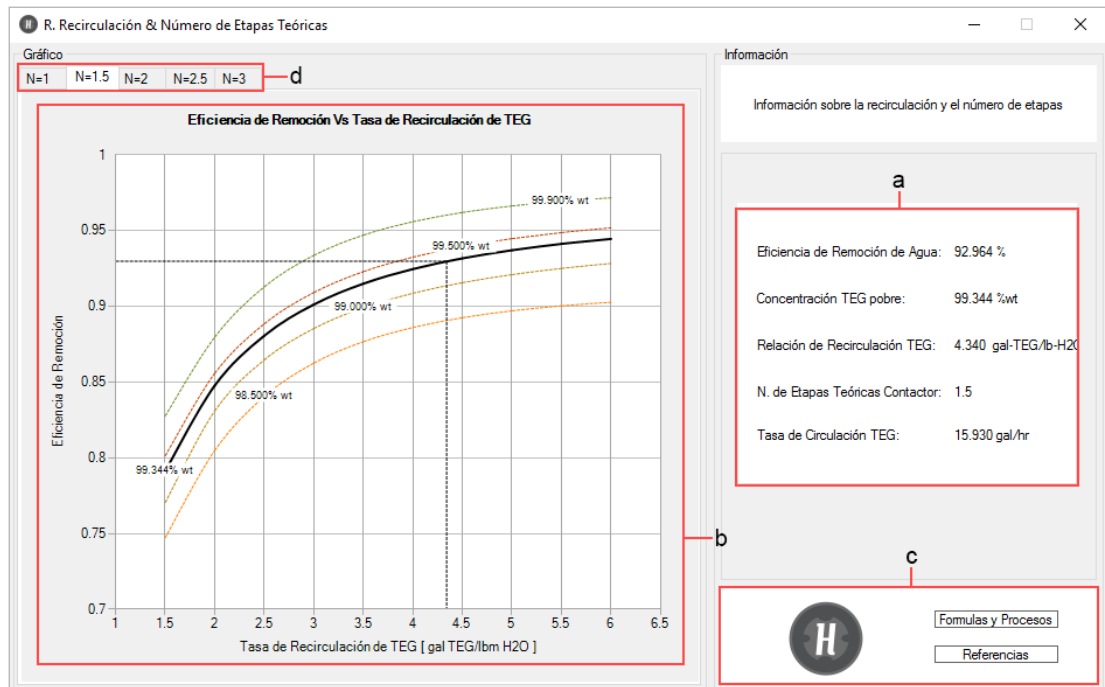


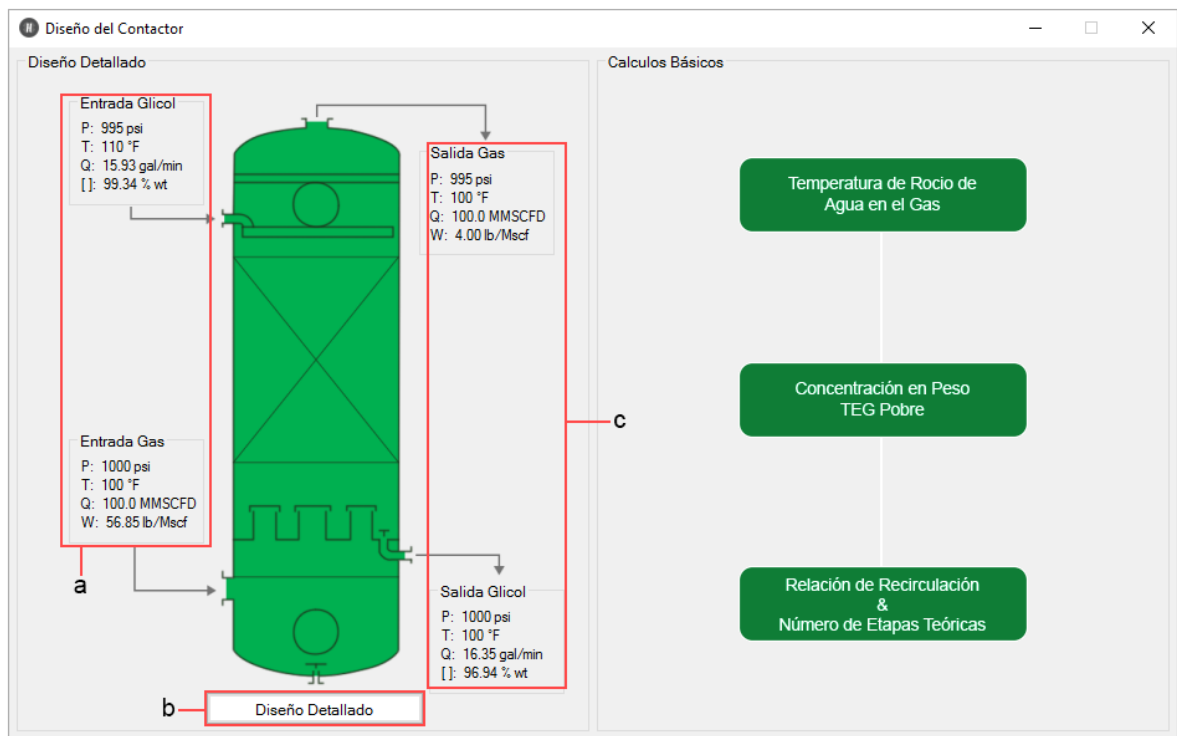
Figura 31. Ventana “R. Recirculación y Número de Etapas Teóricas”.



- Sección de resultados.
- Sección de gráficos de cada etapa.
- Sección de fórmulas, procesos y referencias.
- Selección de número de etapas.

Finalizado el proceso de cálculos básicos la ventana de diseño del contactor, aparece y se habilita el botón de diseño detallado como se ve en la **figura 32**, se habilitan los resultados de las variables operacionales y propiedades a la entrada y salida del contactor.

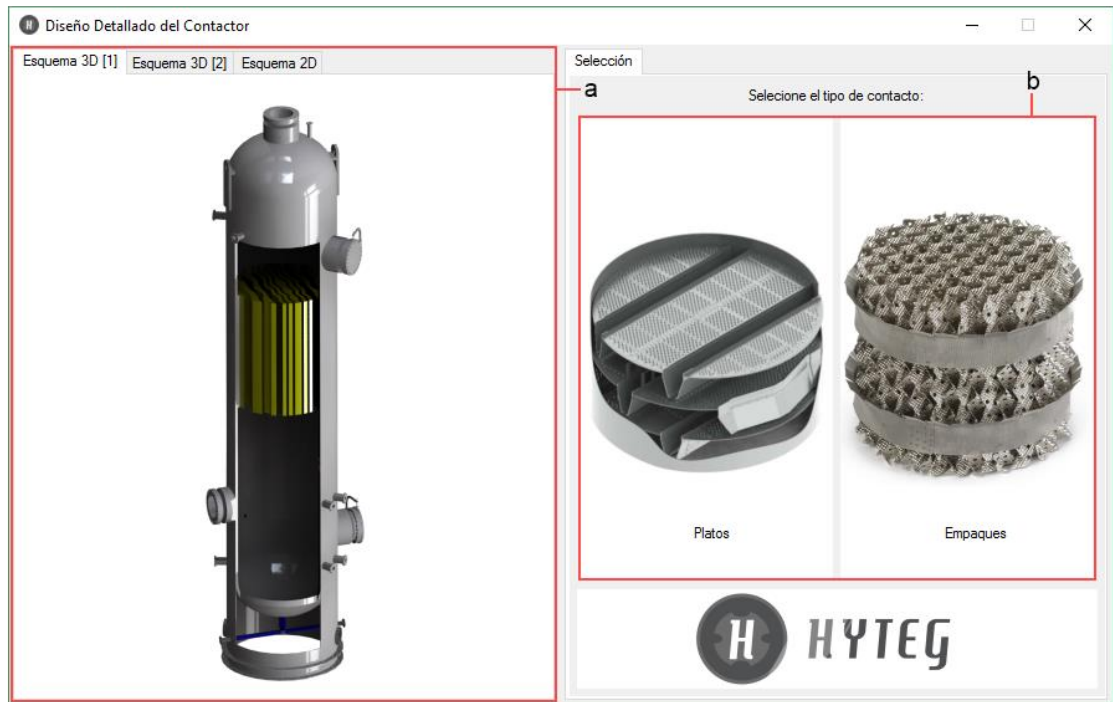
Figura 32. Ventana “Diseño del Contactor”.



- Sección de resultados a la entrada.
- Botón de diseño detallado.
- Sección de resultados a la salida.

La siguiente ventana, mostrada en la **figura 33**, posee la selección del tipo de contacto y una sección grafica de la unidad contactora.

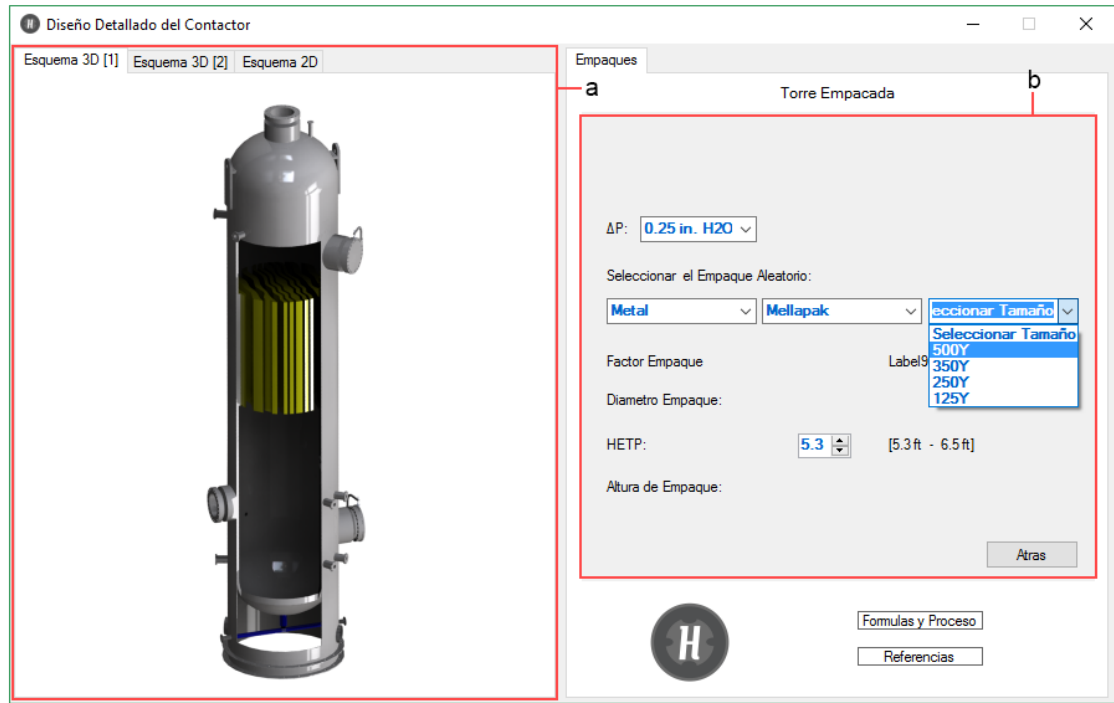
Figura 33. Ventana “Diseño Detallado del Contactor”.



- a. Sección gráfica.
- b. Sección de selección de tipo de contacto.

La **figura 34** muestra como al seleccionar un tipo de contacto se desplegará una sección de diseño del tipo de contacto.

Figura 34. Ventana “Diseño Detallado del Contactor”.



- a. Sección gráfica.
- b. Sección de diseño del tipo de contacto.

Las siguientes unidades a diseñar pertenecen al sistema de regeneración de TEG. Como por ejemplo el intercambiador L/R como se muestra en las **Figura 33** al ser resaltada en el esquema general y la información que se genera para cada este equipo, como se muestra en la **Figura 34**.

Las otras unidades a diseñar siguen el mismo patrón (**figura 37**), la unidad adquiere una tonalidad clara intermitente, habilitando la unidad para diseñar; la ventana de la unidad en diseño mostrara los resultados de cálculo y los esquemas 3D siguiendo el mismo diseño de interfaz mostrado con el intercambiador L/R.

Figura 33. Ventana “Esquema de Diseño”.

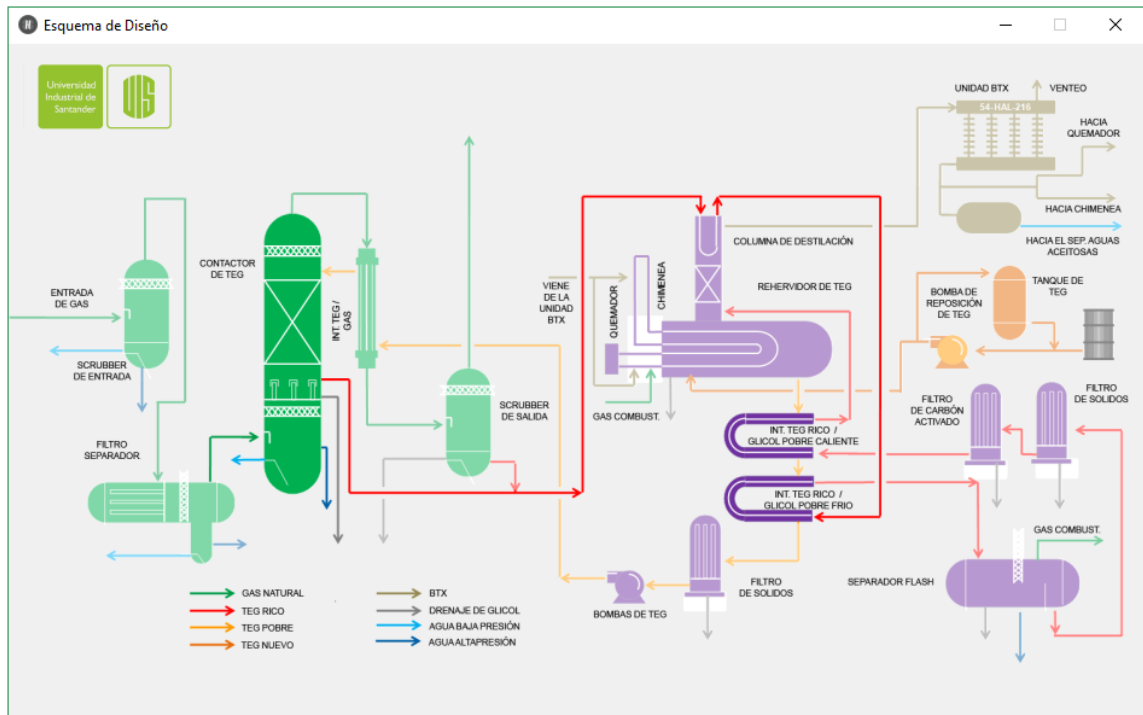


Figura 34. Ventana “Intercambiador Glicol/Glicol”.

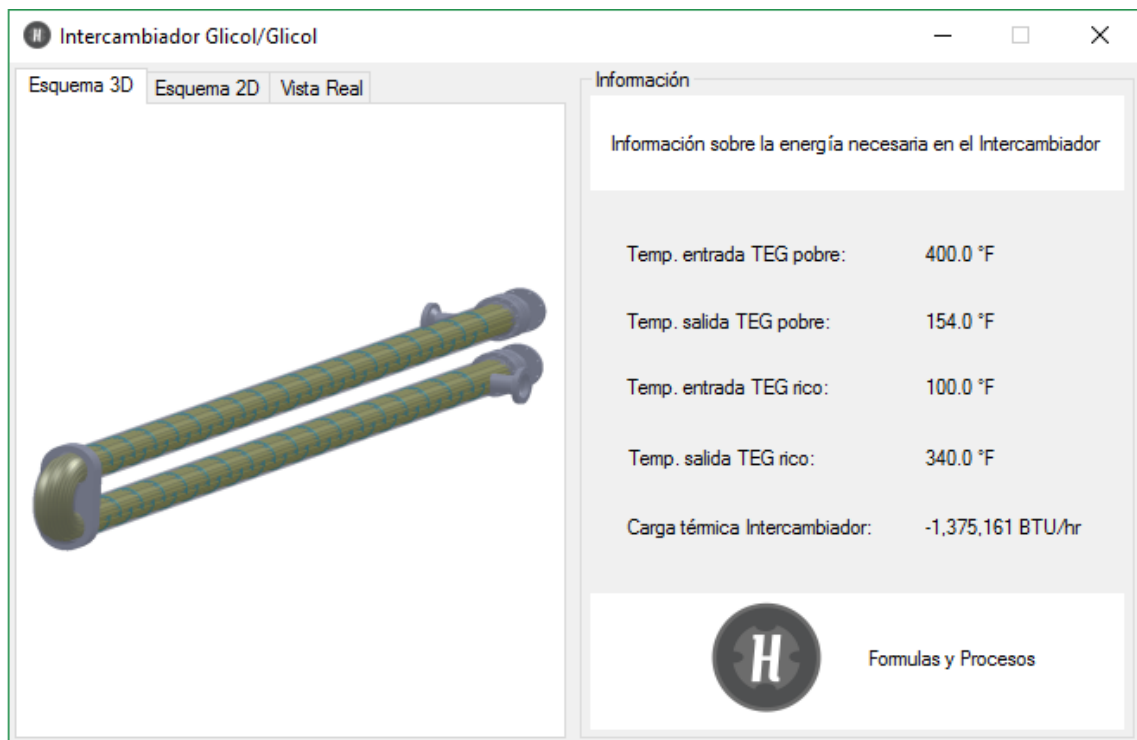


Figura 35. Patrón de las ventanas.

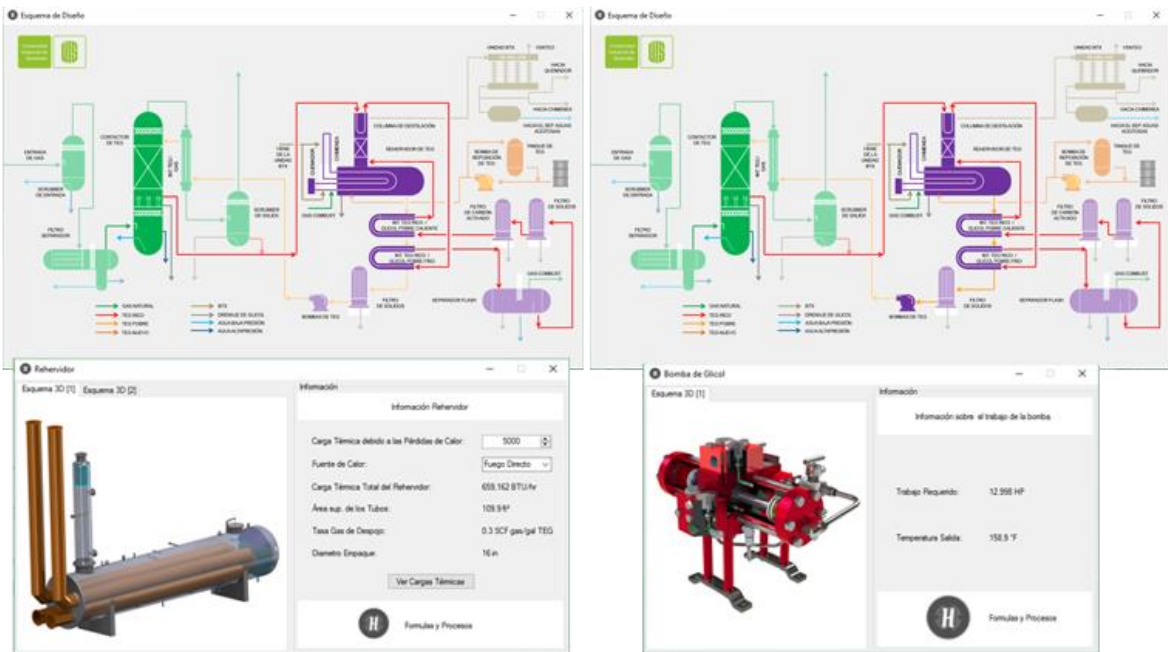
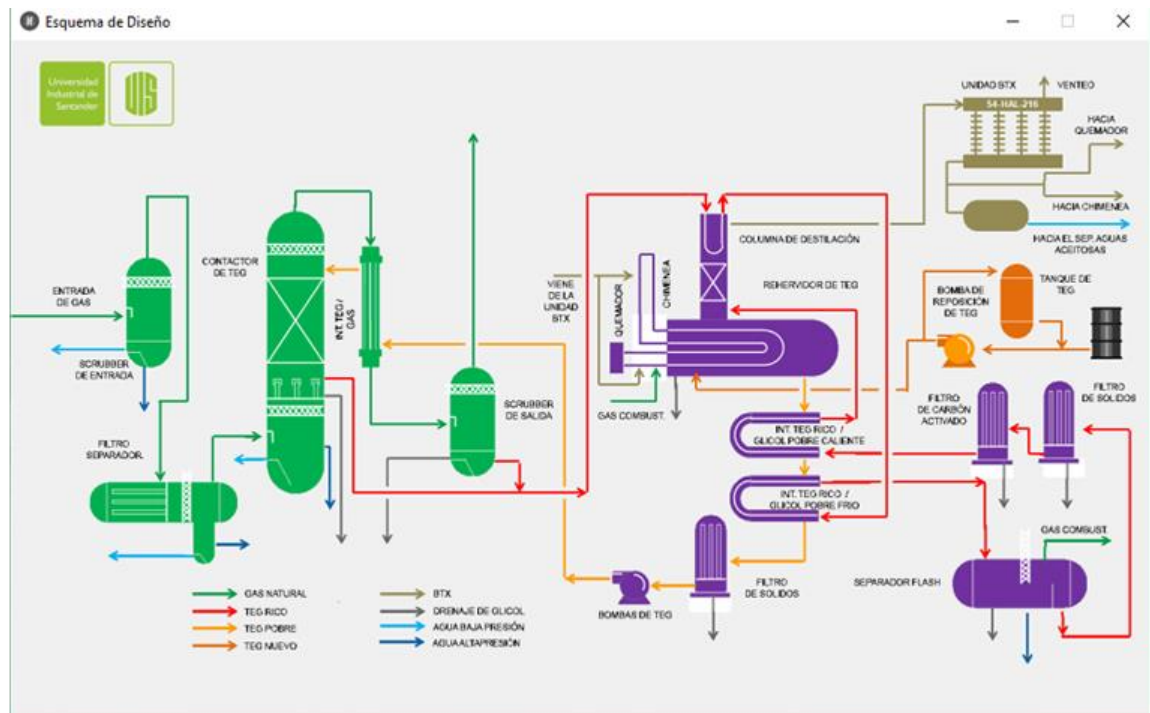
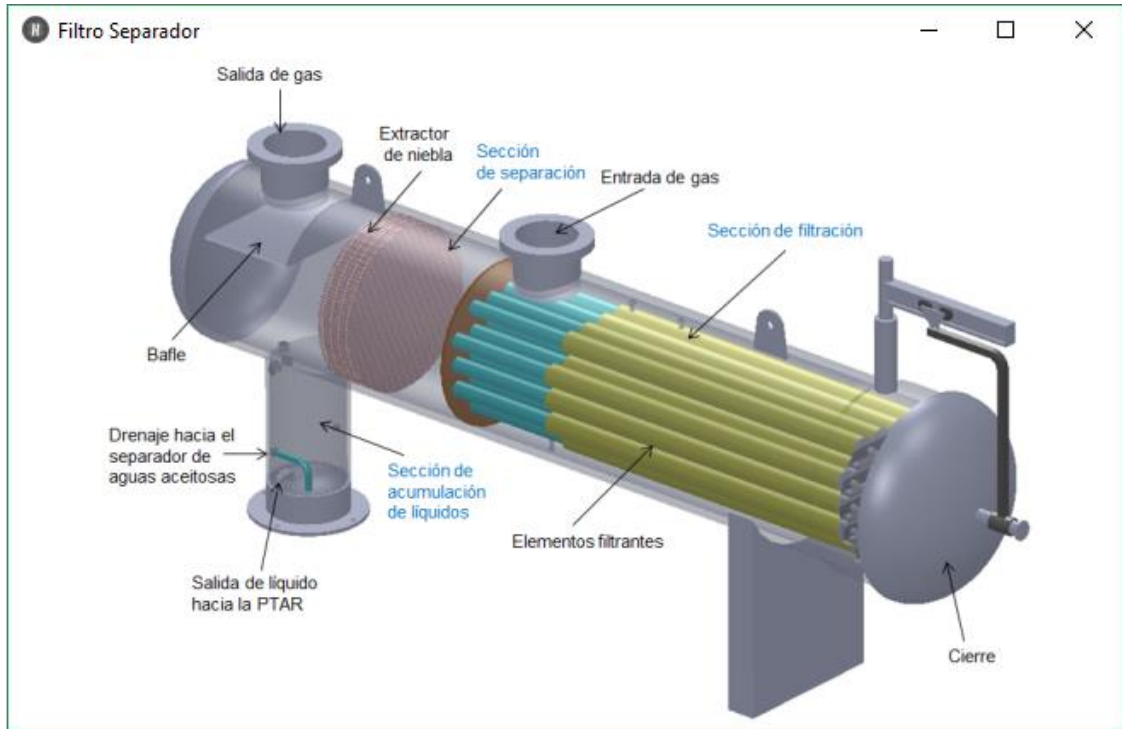


Figura 36. Esquema Completo



Al completar las unidades disponibles para diseño, se habilita todo el esquema de la planta permitiendo el acceso a otras unidades, como muestra la **figura 38**, en las cuales se encuentran sus gráficos en 3D, uno de los ejemplos es la unidad de filtro separador.

Figura 37. Ventana “Filtro Separador”.



6. VALIDACION DEL SOFTWARE

La validación del software provee información objetiva de los resultados de dicha aplicación analizando la consistencia y exactitud de su diseño y su documentación de soporte. En otras palabras, permite observar el desempeño global de la herramienta.

Por esta razón, uno de los objetivos planteados en el proyecto fue la validación de la aplicación HYTEG por medio de la comparación de sus resultados tomando como referencia los resultados entregados por la herramienta comercial Aspen HYSYS enfocándose en 3 criterios principales: contenido de agua del gas natural, diámetro del empaque estructurado y el sistema de regeneración de TEG.

6.1. Contenido de Agua

La determinación de la cantidad de agua presente en el gas es la propiedad física de mayor influencia en el diseño del sistema. Su medición correcta (calculado) definirá la eficiencia requerida por la torre de absorción, la altura de la torre, el caudal y la concentración de TEG mínima requerida.

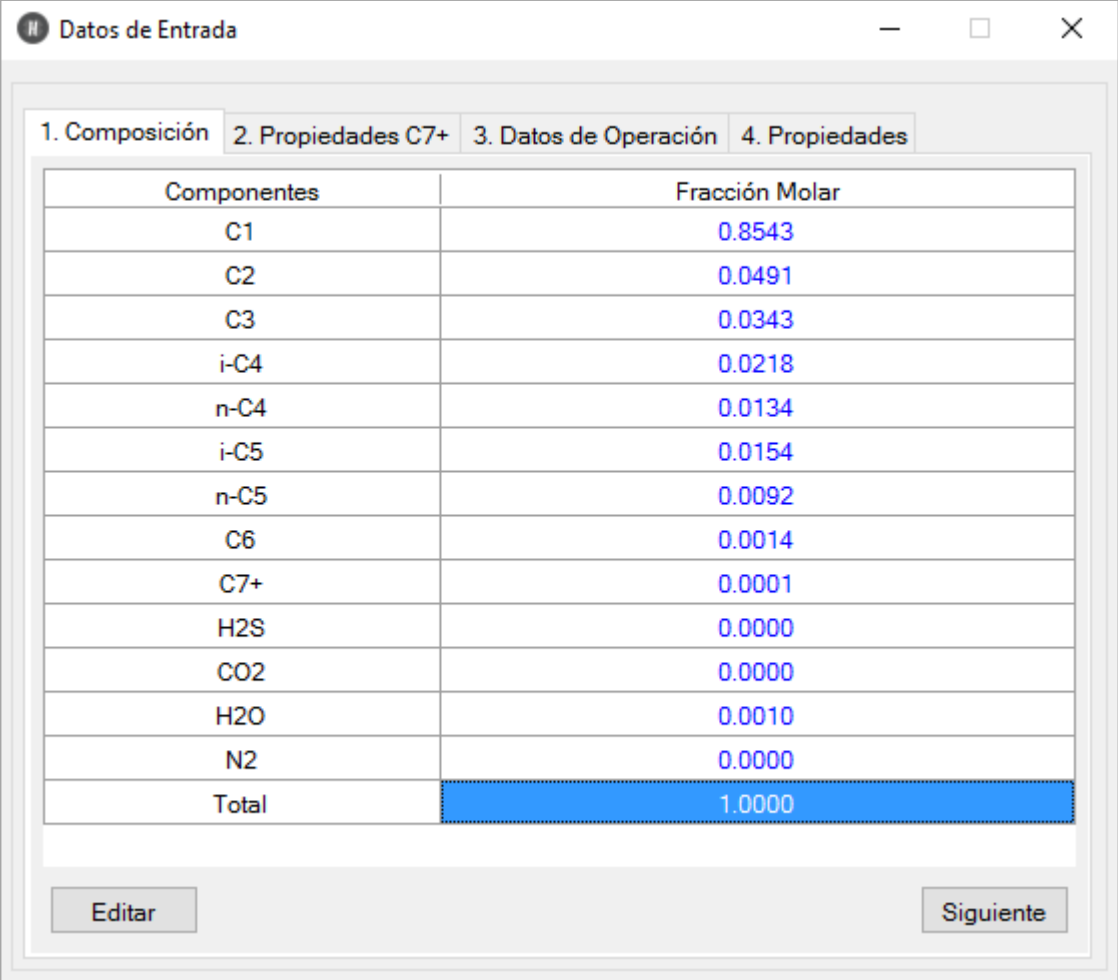
Además, el cálculo de esta propiedad depende principalmente de las condiciones de operación del sistema de deshidratación. Al contrario, la presencia de gases ácidos (CO₂, H₂S), aunque aumentan la solubilidad del agua en el gas, juegan un papel secundario.

Por lo tanto, teniendo en cuenta el rango de aplicabilidad de los modelos utilizados, se decidió hacer un análisis de la sensibilidad de esta propiedad con respecto a la temperatura del gas (75 – 115 °F), la presión del gas (800 – 1200 psig) y la presencia de gases ácidos (0 – 10% HEC). A su vez, los resultados generados por la aplicación fueron comparados con aquellos generados por la herramienta HYSYS.

6.1.1. Gas Dulce

La **Figura** muestra el set de composición de gas natural dulce utilizado para el análisis. Esta mezcla contiene una fracción pesada cuyo peso molecular es $150 \frac{lb\ m}{lb\ mol}$ y una gravedad específica de 0.78.

Figura 40. Composición de gas dulce utilizada para la comparación del contenido de agua



The screenshot shows a software window titled "Datos de Entrada" with four tabs: "1. Composición", "2. Propiedades C7+", "3. Datos de Operación", and "4. Propiedades". The "1. Composición" tab is active, displaying a table with two columns: "Componentes" and "Fracción Molar". The table lists various hydrocarbon components and their molar fractions, with a total of 1.0000. The "Total" row is highlighted in blue. At the bottom of the window, there are two buttons: "Editar" and "Siguiete".

Componentes	Fracción Molar
C1	0.8543
C2	0.0491
C3	0.0343
i-C4	0.0218
n-C4	0.0134
i-C5	0.0154
n-C5	0.0092
C6	0.0014
C7+	0.0001
H2S	0.0000
CO2	0.0000
H2O	0.0010
N2	0.0000
Total	1.0000

La **Tabla 20** muestran el contenido de agua calculado con la variación de la temperatura y la presión para HYTEG y HYSYS. Se puede observar que el contenido de agua del gas presenta una mayor sensibilidad a la variación de la temperatura que a la variación de la presión.

Tabla 20. Comparación del contenido de agua variando la presión y temperatura del gas.

	HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG	
Presión [psig]	800			900			1000		
Temperatura [°F]	Wc [lb/MMSCF]	Wc [lb/MMSCF]	% Error Abs.	Wc [lb/MMSCF]	Wc [lb/MMSCF]	% Error Abs.	Wc [lb/MMSCF]	Wc [lb/MMSCF]	% Error Abs.
75	31.09	31.412	1.04%	28.58	29.105	1.84%	26.61	27.218	2.28%
80	36.58	36.623	0.12%	33.59	33.904	0.93%	31.24	31.68	1.41%
85	42.89	42.568	-0.75%	39.35	39.375	0.06%	36.56	36.762	0.55%
90	50.12	49.326	-1.58%	45.94	45.589	-0.76%	42.64	42.532	-0.25%
95	58.34	57.452	-1.52%	53.44	53.045	-0.74%	49.55	49.44	-0.22%
100	67.67	66.145	-2.25%	61.94	61.033	-1.46%	57.4	56.851	-0.96%
105	78.26	76.005	-2.88%	71.59	70.088	-2.10%	66.28	65.247	-1.56%
110	90.24	87.163	-3.41%	82.49	80.33	-2.62%	76.32	74.739	-2.07%
115	103.8	99.765	-3.89%	94.79	91.889	-3.06%	87.65	85.444	-2.52%
	MAPE (temperatura)		1.94%	MAPE (temperatura)		1.51%	MAPE (temperatura)		1.31%

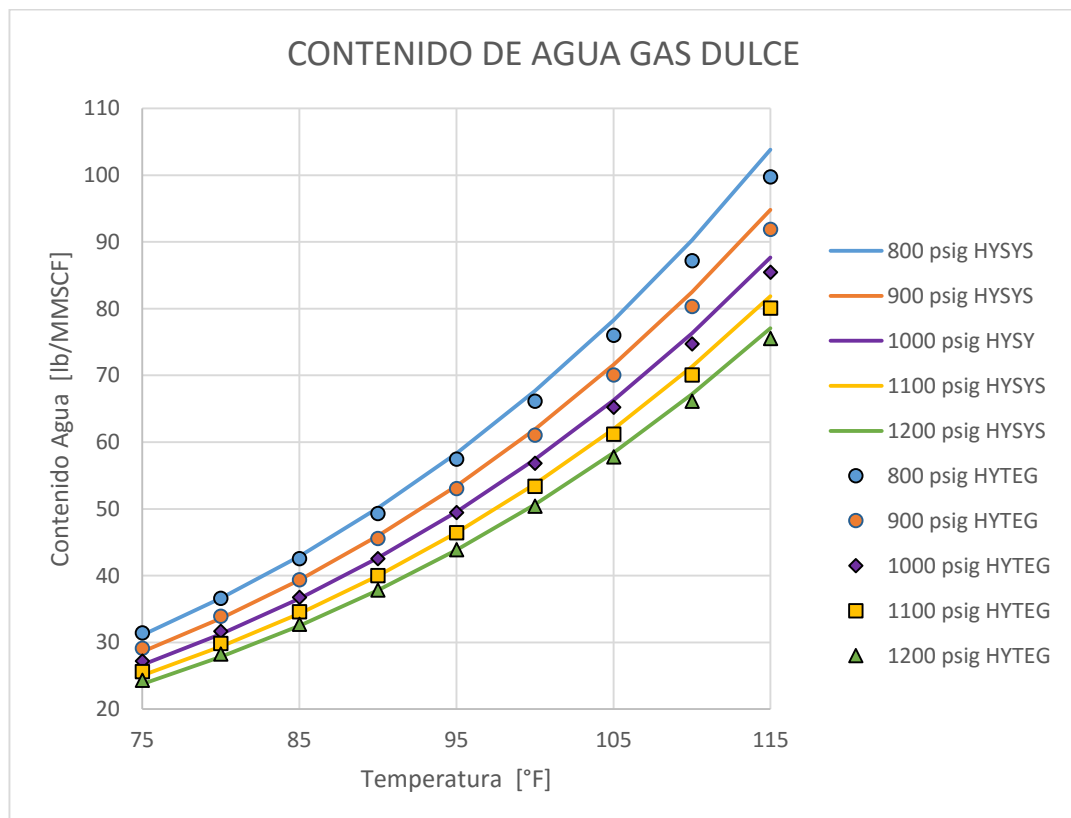
Tabla 19. (Continuación) Comparación del contenido de agua variando la presión y temperatura del gas.

	HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG		
Presión [psig]	1100			1200			
Temperatura [°F]	Wc [lb/MMSCF]	Wc [lb/MMSCF]	% Error Absoluto	Wc [lb/MMSCF]	Wc [lb/MMSCF]	% Error Absoluto	MAPE (Presión)
75	25.03	25.646	2.46%	23.75	24.315	2.38%	2.00%
80	29.36	29.826	1.59%	27.82	28.257	1.57%	1.12%
85	34.32	34.585	0.77%	32.48	32.743	0.81%	0.59%
90	39.98	39.984	0.01%	37.79	37.828	0.10%	0.54%
95	46.41	46.435	0.05%	43.83	43.893	0.14%	0.54%
100	53.71	53.366	-0.64%	50.67	50.417	-0.50%	1.16%
105	61.98	61.213	-1.24%	58.43	57.8	-1.08%	1.77%
110	71.32	70.079	-1.74%	67.19	66.137	-1.57%	2.28%
115	81.85	80.074	-2.17%	77.06	75.53	-1.99%	2.72%
	MAPE (temperatura)		1.19%	MAPE (temperatura)		1.13%	

Además, se determinó el error porcentual absoluto tomando como valores reales los resultados de HYSYS y como valores experimentales los resultados de HYTEG. Por último, se determinó el error porcentual absoluto medio (MAPE, mean absolute percentage error) tanto para la variación de la temperatura manteniendo la presión constante como para la variación de la presión manteniendo la temperatura constante.

Al respecto, se obtuvo que el cálculo del contenido de agua para un gas dulce presenta un MAPE con el cambio de temperatura de hasta 1.94%. Dicho error es máximo para valores de presión bajos. Del mismo modo, el MAPE con el cambio de presión es de hasta 2.72%. Dicho error es máximo para valores de temperatura altos.

Figura 41. Comparación del contenido de agua de un gas dulce.



La **Figura** sirve como una recopilación de las comparaciones descritas anteriormente. Esta permite visualizar ambos conjuntos de datos (HYSYS, HYTEG) mostrando que los resultados de la aplicación HYTEG son bastante acertados, especialmente en la región de temperaturas bajas.

6.1.2. Gas Agrio

La **Figura** muestra el set de composición de gas natural dulce utilizado para el análisis. Esta mezcla contiene una fracción pesada cuyo peso molecular es $150 \frac{lb\ m}{lb\ mol}$ y una gravedad específica de 0.78.

Figura 42. Composición de gas agrio utilizada para la comparación del contenido de agua.

The screenshot shows a window titled "Datos de Entrada" with four tabs: "1. Composición", "2. Propiedades C7+", "3. Datos de Operación", and "4. Propiedades". The "1. Composición" tab is active, displaying a table with two columns: "Componentes" and "Fracción Molar". The table lists various hydrocarbon components (C1 to C7+), H2S, CO2, H2O, and N2, along with a "Total" row. The molar fractions are listed in blue text. At the bottom of the window, there are two buttons: "Editar" and "Siguiente".

Componentes	Fracción Molar
C1	0.7898
C2	0.0970
C3	0.0520
i-C4	0.0096
n-C4	0.0071
i-C5	0.0015
n-C5	0.0012
C6	0.0010
C7+	0.0001
H2S	0.0000
CO2	0.0400
H2O	0.0007
N2	0.0000
Total	1.0000

La **Tabla 21** muestra el contenido de agua calculado con la variación de la temperatura y el contenido de gases ácidos manteniendo una presión de 1000 psig. Como se había mencionado previamente, la sensibilidad de esta propiedad con respecto al contenido de gases ácidos es reducida. Sin embargo hay una ligera tendencia a una mayor solubilidad de agua en el gas a mayores temperaturas.

Tabla 21. Comparación del contenido de agua variando la temperatura del gas y el contenido de gases ácidos.

	HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG		
HEC	0%			5%			10%			
Temperatura [°F]	Wc [lb/MMSCF]		% Error Abs.	Wc [lb/MMSCF]		% Error Abs.	Wc [lb/MMSCF]		% Error Abs.	MAPE (HEC)
75	26.3	27.218	3.49%	27.65	28.262	2.21%	29.1	29.305	0.70%	2.14%
80	30.84	31.68	2.72%	32.38	32.868	1.51%	34.02	34.057	0.11%	1.45%
85	36.06	36.762	1.95%	37.81	38.113	0.80%	39.66	39.464	-0.49%	1.08%
90	42.04	42.532	1.17%	44.01	44.062	0.12%	46.09	45.592	-1.08%	0.79%
95	48.85	49.44	1.21%	51.07	51.181	0.22%	53.41	52.923	-0.91%	0.78%
100	56.6	56.851	0.44%	59.09	58.813	-0.47%	61.72	60.774	-1.53%	0.81%
105	65.39	65.247	-0.22%	68.18	67.452	-1.07%	71.12	69.658	-2.06%	1.11%
110	75.33	74.739	-0.78%	78.45	77.213	-1.58%	81.73	79.687	-2.50%	1.62%
115	86.55	85.444	-1.28%	90.03	88.216	-2.01%	93.68	90.988	-2.87%	2.06%

Como resultado se obtuvo que el cálculo del contenido de agua para un gas ácido presenta un MAPE con el cambio del contenido de gases ácidos de hasta 2.14%. Dicho error es máximo para valores de temperatura bajos.

Asimismo, la **Tabla 22** muestra el contenido de agua calculado con la variación de la presión y el contenido de gases ácidos manteniendo la temperatura igual a 100 °F. La sensibilidad de esta propiedad con respecto al contenido de gases ácidos es reducida.

De la misma forma, se obtuvo que el cálculo del contenido de agua para un gas ácido presenta un MAPE con el cambio del contenido de gases ácidos de hasta 1.99%. Dicho error es máximo para valores de presiones bajas.

Tabla 22. Comparación del contenido de agua variando la presión del gas y el contenido de gases ácidos.

HEC	HYSYS		HYTEG		HYSYS		HYTEG		HYSYS		HYTEG		MAPE (HEC)
	0%			5%			10%						
P [psig]	Wc [lb/MMSCF]		% Error Abs.	Wc [lb/MMSCF]		% Error Abs.	Wc [lb/MMSCF]		% Error Abs.				
800	67.04	66.145	-1.34%	69.35	67.991	-1.96%	71.75	69.838	-2.66%				
850	63.96	63.454	-0.79%	66.32	65.327	-1.50%	68.77	67.199	-2.28%				
900	61.23	61.033	-0.32%	63.63	62.933	-1.10%	66.14	64.833	-1.98%				
950	58.79	58.843	0.09%	61.24	60.772	-0.76%	63.81	62.702	-1.74%				
1000	56.6	56.851	0.44%	59.09	58.813	-0.47%	61.72	60.774	-1.53%				
1050	54.62	55.033	0.76%	57.16	57.028	-0.23%	59.85	59.024	-1.38%				
1100	52.83	53.366	1.01%	55.41	55.398	-0.02%	58.16	57.429	-1.26%				
1150	51.19	51.833	1.26%	53.82	53.902	0.15%	56.64	55.972	-1.18%				
1200	49.7	50.417	1.44%	52.38	52.527	0.28%	55.25	54.636	-1.11%				

Figura 38. Comparación del contenido de agua de un gas agrio a presión constante.

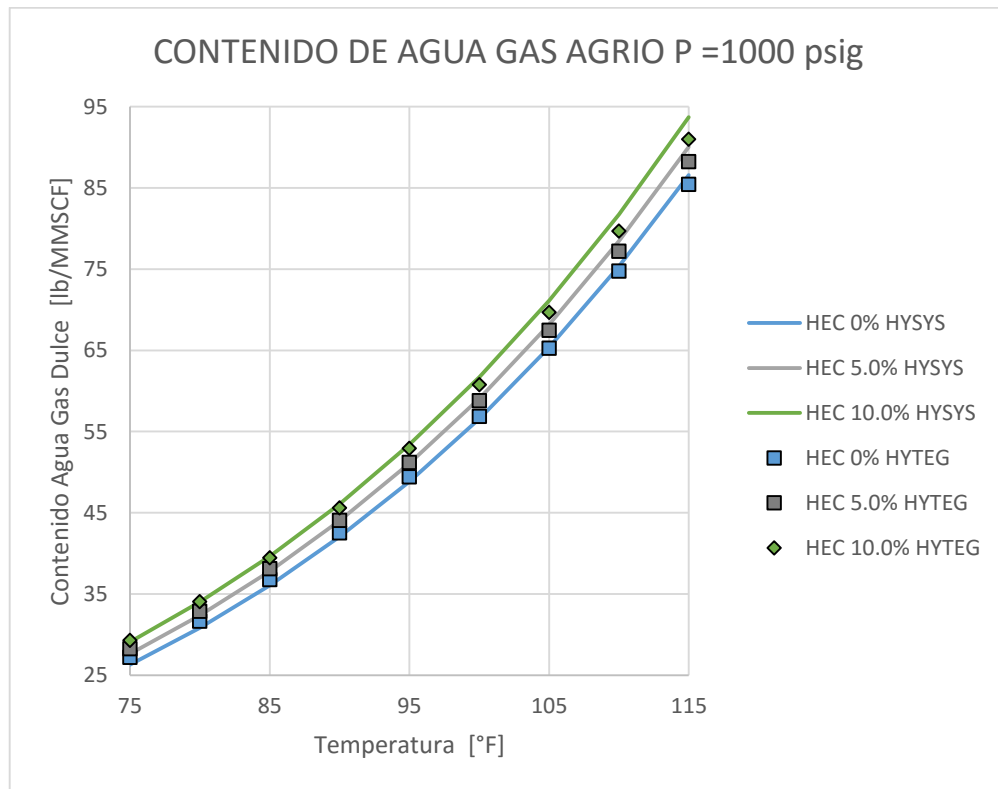
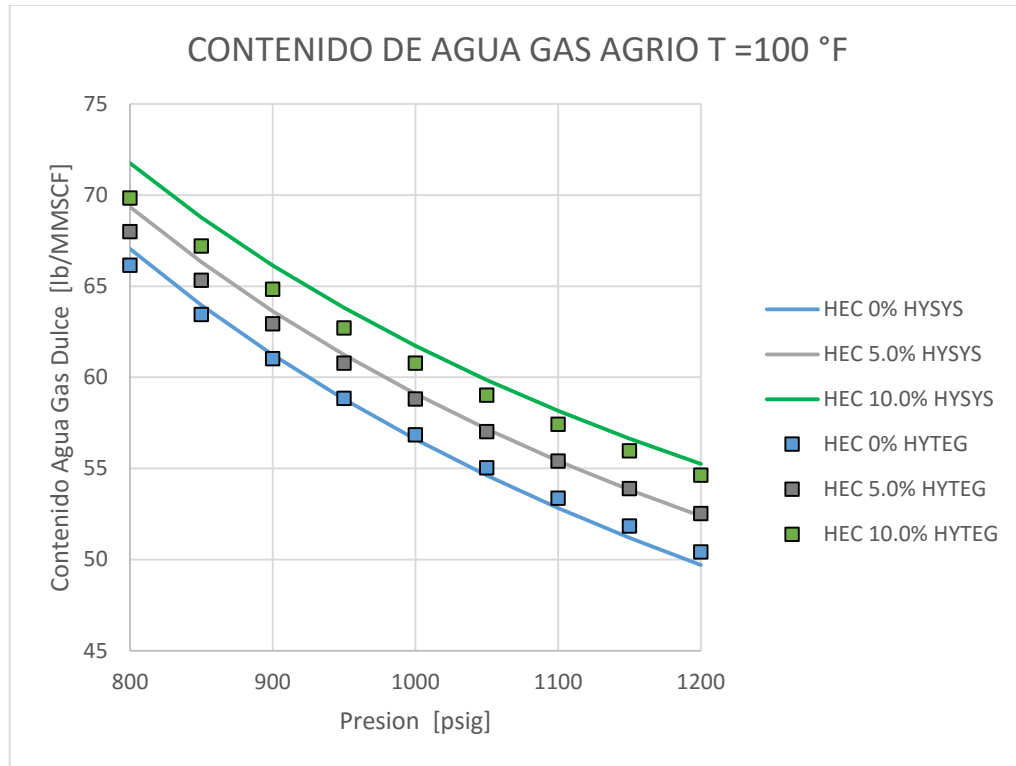


Figura 39. Comparación de contenido de agua de gas agrio a temperatura constante.



La **Figura 38** y la **Figura 39** sirven como una recopilación de las comparaciones descritas anteriormente. Esta permite visualizar ambos conjuntos de datos (HYSYS, HYTEG) mostrando que los resultados de la aplicación HYTEG pierden exactitud con el aumento de la presencia de gases ácidos. Sin embargo se logra una buena aproximación en condiciones de presión y temperatura intermedias.

6.2. DIAMETRO DE EMPAQUE ESTRUCTURADO

Teniendo en cuenta que el cambio de la relación entre el caudal de gas y el caudal de TEG es mínimo, este parámetro depende primordialmente de la magnitud del caudal de gas utilizado para el diseño. De la misma forma, las propiedades físicas de TEG y las densidades de los fluidos del sistema modifican mínimamente este parámetro.

Por lo tanto, el análisis de la sensibilidad de este parámetro se hará con la variación del caudal de gas (5 – 200 MMSCFD) manteniendo una temperatura de 100 °F, una presión de 1000 psig y una caída de presión en la torre de $0.50 \frac{\text{in HO}_2}{\text{ft}}$. Además, la figura muestra la composición de gas utilizada. A su vez, los resultados generados por la aplicación fueron comparados con aquellos generados por la herramienta HYSYS.

Es necesario tener en cuenta que los cálculos entregados por la aplicación HYTEG se basan únicamente en la máxima caída de presión permitida para las torres de absorción de este tipo de sistemas que según Campbell (1992) es de $0.50 \frac{\text{in HO}_2}{\text{ft}}$. Asimismo, HYSYS aproxima el resultado del diámetro del empaque al múltiplo de 0.5 ft superior al resultado obtenido por lo que la comparación se hará realizando esta mismo redondeo.

A continuación se encuentra una serie de tablas que muestran los resultados encontrados para los empaques cuya información de diseño está disponible tanto en HYSYS como en HYTEG.

Tabla 23. Comparación diámetro de empaque Flexipack 1y, 1.6y, 2y.

		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG (gpm)	D (ft)	D (ft)	% Error	D (ft)	D (ft)	% Error	D (ft)	D (ft)	% Error
5.000	0.81	1.50	1.00	-33.3%	1.50	1.00	-33.3%	1.00	1.00	0.0%
10.000	1.63	2.00	1.50	-25.0%	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.50	0.0%
20.000	3.25	2.50	2.00	-20.0%	2.50	2.00	-20.0%	2.00	2.00	0.0%
30.000	4.88	3.00	2.50	-16.7%	3.00	2.50	-16.7%	2.50	2.50	0.0%
40.000	6.51	3.50	3.00	-14.3%	3.00	2.50	-16.7%	3.00	2.50	-16.7%
60.000	9.76	4.50	3.50	-22.2%	4.00	3.50	-12.5%	3.50	3.00	-14.3%
80.000	13.01	5.00	4.00	-20.0%	4.50	4.00	-11.1%	4.00	3.50	-12.5%
100.000	16.26	5.50	4.50	-18.2%	5.00	4.00	-20.0%	4.50	4.00	-11.1%
150.000	24.39	6.50	5.50	-15.4%	6.00	5.00	-16.7%	5.50	5.00	-9.1%
200.000	32.52	7.50	6.50	-13.3%	7.00	6.00	-14.3%	6.50	5.50	-15.4%
		Flexipack 1y			Flexipack 1.6y			Flexipack 2y		

Tabla 24. Comparación de diámetro de empaque Flexipack 3y, 4y.

		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG (gpm)	D (ft)	D (ft)	% Error	D (ft)	D (ft)	% Error
5.000	0.81	1.00	1.00	0.0%	1.00	1.00	0.0%
10.000	1.63	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.00	-33.3%
20.000	3.25	2.00	1.50	-25.0%	2.00	1.50	-25.0%
30.000	4.88	2.50	2.00	-20.0%	2.00	2.00	0.0%
40.000	6.51	2.50	2.50	0.0%	2.50	2.00	-20.0%
60.000	9.76	3.00	3.00	0.0%	3.00	2.50	-16.7%
80.000	13.01	3.50	3.00	-14.3%	3.50	3.00	-14.3%
100.000	16.26	4.00	3.50	-12.5%	3.50	3.50	0.0%
150.000	24.39	5.00	4.50	-10.0%	4.50	4.00	-11.1%
200.000	32.52	5.50	5.00	-9.1%	5.00	4.50	-10.0%
		Flexipack 3y			Flexipack 4y		

Tabla 25. Comparación de diámetro de empaque Flexipack 1x, 1.6x.

		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG (gpm)	D (ft)	D (ft)	% Error	D (ft)	D (ft)	% Error
5.000	0.81	1.00	1.00	0.0%	1.00	1.00	0.0%
10.000	1.63	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.50	0.0%
20.000	3.25	2.50	2.00	-20.0%	2.00	2.00	0.0%
30.000	4.88	3.00	2.50	-16.7%	2.50	2.00	-25.0%
40.000	6.51	3.00	2.50	-16.7%	3.00	2.50	-20.0%
60.000	9.76	4.00	3.00	-25.0%	3.50	3.00	-16.7%
80.000	13.01	4.50	3.50	-22.2%	4.00	3.50	-14.3%
100.000	16.26	5.00	4.00	-20.0%	4.50	3.50	-28.6%
150.000	24.39	6.00	5.00	-16.7%	5.50	4.50	-22.2%
200.000	32.52	7.00	5.50	-21.4%	6.00	5.00	-20.0%
		Flexipack 1X			Flexipack 1.6X		

Tabla 26. Comparación de diámetro de empaque Flexipack 2x, 3x.

		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG (gpm)	D (ft)	D (ft)	% Error	D (ft)	D (ft)	% Error
5.000	0.81	1.00	1.00	0.0%	1.00	1.00	0.0%
10.000	1.63	1.50	1.00	-33.3%	1.50	1.00	-33.3%
20.000	3.25	2.00	1.50	-25.0%	2.00	1.50	-25.0%
30.000	4.88	2.50	2.00	-20.0%	2.00	2.00	0.0%
40.000	6.51	2.50	2.00	-20.0%	2.50	2.00	-20.0%
60.000	9.76	3.00	2.50	-16.7%	3.00	2.50	-16.7%
80.000	13.01	3.50	3.00	-14.3%	3.50	3.00	-14.3%
100.000	16.26	4.00	3.50	-12.5%	3.50	3.00	-14.3%
150.000	24.39	5.00	4.00	-20.0%	4.50	3.50	-22.2%
200.000	32.52	5.50	4.50	-18.2%	5.00	4.50	-10.0%
		Flexipack 2X			Flexipack 3X		

Tabla 27. Comparación de diámetro de empaque Flexipack HC 1y, 2y.

		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG (gpm)	D (ft)	D (ft)	% Error	D (ft)	D (ft)	% Error
5.000	0.81	1.50	1.00	-33.3%	1.00	1.00	0.0%
10.000	1.63	2.00	1.50	-25.0%	1.50	1.50	0.0%
20.000	3.25	2.50	2.00	-20.0%	2.00	2.00	0.0%
30.000	4.88	3.00	2.50	-16.7%	2.50	2.00	-20.0%
40.000	6.51	3.50	3.00	-14.3%	3.00	2.50	-16.7%
60.000	9.76	4.00	3.50	-12.5%	3.50	3.00	-14.3%
80.000	13.01	4.50	4.00	-11.1%	4.00	3.50	-12.5%
100.000	16.26	5.00	4.50	-10.0%	4.50	4.00	-11.1%
150.000	24.39	6.50	5.50	-15.4%	5.50	4.50	-18.2%
200.000	32.52	7.00	6.50	-7.1%	6.50	5.50	-15.4%
		Flexipac 1y HC			Flexipac 2Y HC		

Tabla 28. Comparación de diámetro de empaque Mellapack 500, 350.

		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG (gpm)	D (ft)	D (ft)	% Error	D (ft)	D (ft)	% Error
5.000	0.81	1.50	1.50	0.0%	1.00	1.00	0.0%
10.000	1.63	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.50	0.0%
20.000	3.25	2.50	2.50	0.0%	2.00	2.00	0.0%
30.000	4.88	3.00	3.00	0.0%	2.50	2.50	0.0%
40.000	6.51	3.00	3.00	0.0%	3.00	3.00	0.0%
60.000	9.76	4.00	4.00	0.0%	3.50	3.50	0.0%
80.000	13.01	4.50	4.50	0.0%	4.00	4.00	0.0%
100.000	16.26	5.00	5.00	0.0%	4.50	4.50	0.0%
150.000	24.39	6.00	6.00	0.0%	5.50	5.50	0.0%
200.000	32.52	7.00	7.00	0.0%	6.50	6.00	-7.7%
		Mellapack 500			Mellapack 350		

Tabla 29. Comparación de diámetro de empaque Mellapack 250, 125.

		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG (gpm)	D (ft)	D (ft)	% Error	D (ft)	D (ft)	% Error
5.000	0.81	1.00	1.00	0.0%	1.00	1.00	0.0%
10.000	1.63	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.50	0.0%
20.000	3.25	2.00	2.00	0.0%	2.00	2.00	0.0%
30.000	4.88	2.50	2.50	0.0%	2.00	2.00	0.0%
40.000	6.51	3.00	3.00	0.0%	2.50	2.50	0.0%
60.000	9.76	3.50	3.50	0.0%	3.00	3.00	0.0%
80.000	13.01	4.00	4.00	0.0%	3.50	3.50	0.0%
100.000	16.26	4.50	4.50	0.0%	3.50	3.50	0.0%
150.000	24.39	5.50	5.00	-9.1%	4.50	4.50	0.0%
200.000	32.52	6.00	6.00	0.0%	5.00	5.00	0.0%
		Mellapack 250			Mellapack 125		

Tabla 30. Comparación de diámetro de empaque Flexeramic 28, 48.

		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG (gpm)	D (ft)	D (ft)	% Error	D (ft)	D (ft)	% Error
5.000	0.81	1.50	2.00	33.3%	1.50	1.00	-33.3%
10.000	1.63	2.00	2.00	0.0%	1.50	1.50	0.0%
20.000	3.25	3.00	2.50	-16.7%	2.50	2.00	-20.0%
30.000	4.88	3.50	3.00	-14.3%	3.00	2.50	-16.7%
40.000	6.51	4.00	3.50	-12.5%	3.00	3.00	0.0%
60.000	9.76	5.00	4.00	-20.0%	4.00	3.50	-12.5%
80.000	13.01	5.50	4.50	-18.2%	4.50	4.00	-11.1%
100.000	16.26	6.00	5.00	-16.7%	5.00	4.50	-10.0%
150.000	24.39	7.50	6.00	-20.0%	6.00	5.50	-8.3%
200.000	32.52	8.50	7.00	-17.6%	7.00	6.00	-14.3%
		Flexeramic 28			Flexeramic 48		

Tabla 31. Comparación de diámetro de empaque Flexeramic 88 y Sulker BX.

		HYSYS	HYTEG		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG (gpm)	D (ft)	D (ft)	% Error	D (ft)	D (ft)	% Error
5.000	0.81	1.00	1.00	0.0%	1.00	1.00	0.0%
10.000	1.63	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.50	0.0%
20.000	3.25	2.00	2.00	0.0%	2.00	2.00	0.0%
30.000	4.88	2.50	2.50	0.0%	2.50	2.50	0.0%
40.000	6.51	3.00	2.50	-16.7%	2.50	3.00	20.0%
60.000	9.76	3.50	3.00	-14.3%	3.50	3.50	0.0%
80.000	13.01	4.00	3.50	-12.5%	3.50	4.00	14.3%
100.000	16.26	4.50	4.00	-11.1%	4.00	4.50	12.5%
150.000	24.39	5.50	5.00	-9.1%	5.00	5.00	0.0%
200.000	32.52	6.00	5.50	-8.3%	5.50	6.00	9.1%
		Flexeramic 88			Sulker BX		

Tabla 32. Comparación de diámetro de empaque Gemapack 4A, 3A, 2A.

Qg (MMSCFD)	TEG (gpm)	HYSYS	HYTEG	% Error	HYSYS	HYTEG	% Error	HYSYS	HYTEG	% Error
		D (ft)	D (ft)		D (ft)	D (ft)		D (ft)	D (ft)	
5.000	0.81	1.50	1.50	0.0%	1.00	1.00	0.0%	1.00	1.00	0.0%
10.000	1.63	2.00	1.50	-25.0%	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.50	0.0%
20.000	3.25	2.00	2.50	25.0%	2.00	2.00	0.0%	2.00	2.00	0.0%
30.000	4.88	3.00	2.50	-16.7%	2.50	2.50	0.0%	2.50	2.50	0.0%
40.000	6.51	3.50	3.00	-14.3%	3.00	3.00	0.0%	2.50	2.50	0.0%
60.000	9.76	4.50	4.00	-11.1%	3.50	3.50	0.0%	3.00	3.00	0.0%
80.000	13.01	5.00	4.50	-10.0%	4.00	4.00	0.0%	3.50	3.50	0.0%
100.000	16.26	5.50	5.00	-9.1%	4.50	4.50	0.0%	4.00	4.00	0.0%
150.000	24.39	6.50	6.00	-7.7%	5.50	5.00	-9.1%	5.00	5.00	0.0%
200.000	32.52	7.50	6.50	-13.3%	6.00	6.00	0.0%	5.50	5.50	0.0%
		Gemapack 4A			Gemapack 3A			Gemapack 2A		

Tabla 33. Comparación de diámetro de empaque Gemapack 1.5A, 1A.

Qg (MMSCFD)	TEG (gpm)	HYSYS	HYTEG	% Error	HYSYS	HYTEG	% Error
		D (ft)	D (ft)		D (ft)	D (ft)	
5.000	0.81	1.00	1.00	0.0%	1.50	1.00	-33.3%
10.000	1.63	1.50	1.50	0.0%	1.50	1.50	0.0%
20.000	3.25	2.00	2.00	0.0%	1.50	1.50	0.0%
30.000	4.88	2.00	2.00	0.0%	2.00	2.00	0.0%
40.000	6.51	2.50	2.50	0.0%	2.00	2.50	25.0%
60.000	9.76	3.00	3.00	0.0%	2.50	3.00	20.0%
80.000	13.01	3.50	3.50	0.0%	3.00	3.00	0.0%
100.000	16.26	3.50	3.50	0.0%	3.50	3.50	0.0%
150.000	24.39	4.50	4.50	0.0%	4.00	4.50	12.5%
200.000	32.52	5.00	5.50	10.0%	4.50	5.00	11.1%
		Gemapack 1.5 a			Gemapack 1A		

Como se puede observar en las tablas, el diámetro del empaque incrementa con el caudal de gas. Además, la exactitud de los resultados varía desde 0% hasta un 33% dependiendo del empaque. Estas diferencias se deben principalmente al método utilizado para la determinación del parámetro. Por un lado, se desconoce la metodología utilizada por HYSYS para la realización de estos cálculos mientras que la aplicación HYTEG se basa únicamente en la máxima caída de presión permitida para el sistema de deshidratación por TEG.

Sin embargo, se puede observar que existe una gran similitud en los resultados con los empaques de la serie Gemapack (4A, 3A, 2A, 1.5A, 1A) y Mellapack (500, 350, 250, 125) especialmente para los caudales de menor magnitud.

6.3. Sistema de Regeneración de TEG

Parámetros como las cargas térmicas de los intercambiadores de calor y el rehervidor y la potencia de la bomba de recompresión depende principalmente del caudal de TEG que circula por el dicho sistema. A su vez, el caudal de TEG depende de la eficiencia de remoción de agua requerida y el caudal de gas deshidratado.

Por lo tanto, el análisis de la sensibilidad de estos parámetros se hará con la variación del caudal de gas (5 – 200 MMSCFD) manteniendo una temperatura de 100 °F, una presión de 1000. Además, se usó la misma composición de gas utilizada para la validación del gas agrio. A su vez, los resultados generados por la aplicación fueron comparados con aquellos generados por la herramienta HYSYS.

A continuación se encuentra una serie de tablas que muestran los resultados encontrados para cada uno de los equipos del sistema de regeneración de TEG.

6.3.1. Intercambiador L/R

La **Tabla 34** muestra la carga térmica del intercambiador con la variación del caudal de gas (5 – 100 MMSCFD) manteniendo una temperatura de 100 F y una presión de 1000 psig.

Tabla 34. Comparación de la carga térmica del intercambiador L/R.

		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG Pobre (gpm)	Qt (MMBTU/hr)	Q (MMBTU/hr)	% Error
5	0.81	67972	70187	3.3%
10	1.63	135943	140374	3.3%
20	3.25	271886	289181	6.4%
30	4.88	407828	433772	6.4%
40	6.51	543850	578363	6.3%
60	9.76	815733	867544	6.4%
80	13.01	1087619	1156726	6.4%
100	16.26	1359547	1445907	6.4%
150	24.39	2039298	2168861	6.4%
200	32.52	2719089	2891815	6.4%
			MEPA	5.7%

Como resultado se obtuvo que el cálculo de la carga térmica del intercambiador L/R presenta un MAPE con el cambio del caudal de TEG de 5.7%. Este error se genera principalmente por la diferencia en la determinación del contenido de agua del gas y las propiedades de TEG que modifican el caudal de TEG rico y la capacidad calorífica del mismo.

6.3.2. Rehervidor

La **Tabla 35** muestra la carga térmica del rehervidor con la variación del caudal de gas (5 – 100 MMSCFD) manteniendo una temperatura de 100 F y una presión de 1000 psig.

Tabla 35. Comparación de la carga térmica total del rehervidor.

		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG Pobre (gpm)	Q (MMBTU/hr)	Q (MMBTU/hr)	% Error
5	0.81	30742	37885.000	23.2%
10	1.63	61354	70770.00	15.3%
20	3.25	122963	114437.00	-6.9%
30	4.88	184450	169155.00	-8.3%
40	6.51	245960	223874.00	-9.0%
60	9.76	368959	333311.00	-9.7%
80	13.01	491924	442748.00	-10.0%
100	16.26	614870	552184.00	-10.2%
150	24.39	922366	825777.00	-10.5%
200	32.52	1229831	1099369.00	-10.6%
			MEPA	11.4%

Se puede observar que el cálculo de la carga térmica del intercambiador L/R para la aplicación HYTEG presenta un MAPE con el cambio del caudal de TEG de 11.4%. Unas de las razones por la presencia de esta error es por diferencia en la determinación del contenido de agua del gas y las propiedades de TEG que modifican el caudal de TEG rico y la capacidad calorífica del mismo.

6.3.3. Bomba de Recompresión

La **Tabla 36** muestra la potencia requerida por la bomba con la variación del caudal de gas (5 – 100 MMSCFD) manteniendo una temperatura de 100 F y una presión de 1000 psig.

Los resultados muestran que la potencia requerida por la bomba de recompresión calculada por la aplicación HYTEG presenta un MAPE con el cambio del caudal de TEG de 1.21%. Esta mínima diferencia es generada por el cálculo de la gravedad específica de TEG y el caudal de TEG rico.

Tabla 36. Comparación de la potencia de la bomba de recompresión.

		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG Pobre (gpm)	WT (HP)	W (HP)	% Error
5	0.81	0.669	0.663	-0.86%
10	1.63	1.338	1.327	-0.79%
20	3.25	2.675	2.64	-1.31%
30	4.88	4.013	3.961	-1.29%
40	6.51	5.351	5.281	-1.31%
60	9.76	8.026	7.921	-1.31%
80	13.01	10.701	10.562	-1.30%
100	16.26	13.376	13.202	-1.30%
150	24.39	20.065	19.803	-1.30%
200	32.52	26.753	26.404	-1.30%
			MEPA	1.21%

6.3.4. Intercambiador TEG/gas

La **Tabla 37** muestra la carga térmica del intercambiador TEG/gas con la variación del caudal de gas (5 – 100 MMSCFD) manteniendo una temperatura de 100 F y una presión de 1000 psig.

Tabla 37. Comparación de la carga térmica del intercambiador TEG/gas.

		HYSYS	HYTEG	
Qg (MMSCFD)	TEG Pobre (gpm)	Q (MMBTU/hr)	Q (MMBTU/hr)	% Error
5	0.81	14902	17614.00	18.2%
10	1.63	29806	35229.00	18.2%
20	3.25	59603	70458.00	18.2%
30	4.88	89409	105686.00	18.2%
40	6.51	119235	140915.00	18.2%
60	9.76	178867	211373.00	18.2%
80	13.01	238468	281831.00	18.2%
100	16.26	298024	352288.00	18.2%
150	24.39	447132	528432.00	18.2%
200	32.52	596184	704576.00	18.2%
			MEPA	18.19%

Se puede observar que el cálculo de la carga térmica del intercambiador TEG/gas para la aplicación HYTEG presenta un MAPE con el cambio del caudal de TEG de 18.19%. Este error se genera principalmente por la diferencia en la determinación del contenido de agua del gas y las propiedades de TEG que modifican el caudal de TEG rico y la capacidad calorífica del mismo.

Es necesario tener en cuenta que en este caso en particular el error generado en el intercambiador L/R repercute significativamente en los resultados de este equipo puesto que la temperatura de TEG pobre que entra al intercambiador TEG/gas se calculada en el primer intercambiador.

7. CONCLUSIONES

- El uso del software se ha incorporado rápidamente al ámbito educativo, debido a las amplias herramientas que facilitan el proceso cognitivo, reduciendo tiempos de enseñanza, tiempos en la resolución de problemas y estimulando el aprendizaje del alumno al tener un amplia gama de posibilidades de interacción.
- El implemento de este software tuvo como objetivo, el cultivar el carácter autónomo y autodidacta en el estudiante, facilitando la labor del docente sin disminuir su importancia en el proceso cognitivo; un software con la capacidad de cálculo necesaria para dar resultados confiables en los múltiples cálculos realizados en la labor de diseño de una planta de deshidratación con TEG.
- Al usar un entorno de desarrollo dirigido a objetos el resultado final es un software amigable, dinámico, de fácil interacción con el estudiante el cual sigue una secuenciación que dirige el proceso por el algoritmo establecido en la metodología de diseño de la planta de deshidratación con TEG.
- La planificación fue la base fundamental para el éxito en el desarrollo de la aplicación. La metodología de diseño utilizada permitió la recopilación y organización de información necesaria así como también la estructuración global y detallada del software dando como resultado una interface gráfica de usuario acorde con los lineamientos expuestos en el planteamiento del problema.
- La comparación de los modelos matemáticos implementados en la aplicación tomando como referencia el software comercial Aspen HYSYS permitió determinar la validez de los resultados de la misma, arrojando márgenes de error aceptables en la mayoría de los casos.

- Siendo el contenido de agua en el gas el parámetro más importante para el diseño del sistema de deshidratación, las correlaciones utilizadas para su cálculo generaron excelentes resultados durante la validación tanto para gases dulces como para gases agrios.
- Aunque el modelo de Kister & Gills utilizado para la determinación del diámetro del empaque estructurado fue diseñado especialmente para este tipo de contactores, la mayoría de empaques presentaron resultados con un alto margen de error durante su validación. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la metodología aplicada por la herramienta comercial es desconocida y puede tomar en cuenta más parámetros para el diseño.
- El diseño básico presentado para el sistema de regeneración de TEG presento amplios márgenes de error para algunos de los equipos, especialmente el intercambiador TEG/gas. Esto se debe principalmente a que los equipos de dicho sistema se diseñaron independientemente provocando la acumulación de errores generados en los cálculos previos.
- La disponibilidad dentro de la aplicación del conjunto de archivos creados durante el desarrollo del proyecto (diagramas de flujo, diagramas de bloque, formularios, tablas de validación) permitirá al usuario una mayor comprensión de los fundamentos matemáticos utilizados y pueden servir como base para la creación de una segunda versión del software.

8. RECOMENDACIONES

- Ampliar la información referente a los tipos de contactores utilizados para el diseño de torres de absorción. Esto se puede lograr con la recopilación de información de empaques estructurados que permita definir el HETP a partir del tipo de empaque y a la vez dando una mayor variedad de selección para el diseño de la torre de absorción. Además, se puede incluir un diseño más detallado del contactor para diferentes tipos de platos, teniendo en cuenta el downcomer y su respectiva distribución dentro de la torre.
- Implementar un diseño detallado para los equipos del sistema de regeneración de TEG permitiendo calcular sus requerimientos térmicos con mayor exactitud y dimensionar las unidades a diferentes condiciones de operación, todo a la vez que se tiene en cuenta la interacción de los diferentes equipos como un sistema.
- Incluir un módulo de equilibrio de fases que permita calcular la composición de las fases gaseosa y líquida a diferentes condiciones de operación en las distintas unidades del sistema. Esto haría posible la inclusión del diseño de equipos como scrubber y separadores trifásicos.

BIBLIOGRAFIA

AHMED, Tarek. Equations of State and PVT Analysis. - Houston : Gulf Publishing Company, 2007.

ALCALDE E. Garcia y Peñuelas S. Informática Básica : Mc Graw Hill, 1988.

BAHADORI, Alireza y Hari Vuthaluru B. Simple Methodology for Sizing of Absorbers for TEG (triethylene glycol) Gas Dehydration Systems [Publicación periódica] // Energy, The International Journal. - 2009. - pág. 7.

BAHADORI, Alireza y Vuthaluru B. Hari Rapid Estimation of Equilibrium Water Dew Point of Natural Gas in TEG Dehydration Systems [Publicación periódica] // Journal of Natural Gas Science and Engineering. - 2009. - pág. 4.

BRUNER, J. Desarrollo Cognitivo y educación. - Madrid : Morata, 1988.

CAMPBELL, John M. Gas Conditioning and Processing. - Norman : Campbell Petroleum Series, 1992. - 7th : Vol. II : III.

CAMPBELL, John M. Gas Conditioning and Processing. - Norman : Campbell Petroleum Series, 1992. - 7th : Vol. I.

CATALDI, Zulma. Metodología de diseño, desarrollo y evaluación de software educativo. - [s.l.] : Universidad Nacional de la Plata, 2000.

COMISIÓN DE REGULACIÓN DE ENERGÍA Y GAS. Especificaciones de calidad del gas natural en el punto de entrada del sistema de transporte, 2007.

ESPINEL, A. Hernández N. Diseño y Problemas Operacionales en Torres Contactoras de Platos en Plantas de Deshidratación de Gas con Glicol. - Bucaramanga : UIS, 2007.

GALLEGO, M. Los Sistemas Multimediales desde una Perspectiva Pedagógica en Multimedia. - Madrid : UNED, 1997.

GPSA ENGINEERING DATA BOOK. - Tulsa : Gas Processors Suppliers Association, 2004. - 12th.

KENT, Arnold. Gas Dehydration Field Manual. - [s.l.] : Gulf Professional Publishing, 2011.

KISTER, Henry Z. [y otros] Realistically Predict Capacity and Pressure Drop for Packed Columns [Publicación periódica] // CEP. - 2007. - pág. 11.

LIBEDINSKY, M. La Utilización del Correo Electrónico en la Escuela. - [s.l.] : Paidós, 1995.

LIGUORI, L. Las Nuevas Tecnologías de Información y Comunicación. - [s.l.] : Paidós, 1995.

LIN, Zhu [y otros] Analytical Methods to Calculate Water Content in Natural Gas [Publicación periódica] // Chemical Engineering Research and Design. - 2014. - pág. 15.

MANNING, Francis S. Oilfield Processing of Petroleum. - Tulsa : PennWell Publishing Company, 1991. - Vol. 1.

MARQUÈS, Pere. El software educativo [En línea] // Laboratorio de Medios Interactivos. - 20 de Abril de 2016. - http://www.lmi.ub.es/te/any96/marques_software/.

MICHALSEN, K. Nævdal, H. Fundamentals of Natural gas Processing-Hydrocarbon Dew Point Meter Modelling: Norway, 2014.

MOSHFEGHIAN, Mahmood. PetroSkills [En línea] // Estimating Sour Gas Water Content by New Correlations and Simplified Charts. - 1 de Septiembre de 2014. - <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2015/04/estimating-sour-gas-water-content-by-new-correlations-and-simplified-charts/>.

MOSHFEGHIAN, Mahmood. PetroSkills [En línea] // Estimating Sour Gas Water Content by New Correlations and Simplified Charts. - 1 de Abril de 2015. -

<http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2015/04/estimating-sour-gas-water-content-by-new-correlations-and-simplified-charts/>.

MOSHFEGHIAN, Mahmood. PetroSkills [En línea] // Lean Sweet Natural Gas Water Content Correlation. - 1 de Septiembre de 2014. - <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2014/09/lean-sweet-natural-gas-water-content-correlation/>.

MOSHFEGHIAN, Mahmood. PetroSkills [En línea] // TEG Dehydration: Stripping Gas Correlations for Lean TEG Regeneration. - 1 de July de 2013. - <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2013/07/teg-dehydration-stripping-gas-correlations-for-lean-teg-regeneration/>.

MOSHFEGHIAN, Mahmood. PetroSkills [En línea] // Variation of Natural Gas Heat Capacity with Temperatur. Pressure and Relative Density. - 1 de Julio de 2009. - <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2009/07/variation-of-natural-gas-heat-capacity-with-temperature-pressure-and-relative-density/>.

NIELSEN, Jacob. Multimedia and Hypertext, The Internet and Beyond : AP-Professional, 1995.

SCHULMBERGER GAS NATURAL: Oilfield Glossary [En línea] // Oilfield Glossary. - 2015. - http://www.glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/n/natural_gas.aspx.

SHUNK, Dale H. Teorias de la Educación: Prentice Hall, 1997.

SPE INTERNATIONAL. Real gases: PetroWiki® [En línea] // PetroWiki®. - 4 de Junio de 2015. - http://petrowiki.org/Real_gases.

SPE INTERNATIONAL. Thermal recovery by steam injection: PetroWiki® [En línea] // PetroWiki®. - 9 de Junio de 2015. - http://petrowiki.org/Thermal_recovery_by_steam_injection.

THOMPSON, Richard E Oilfield Processing of Petroleum. - Tulsa, Oklahoma : PennWell Books, 1991. - Vol. 1: Natural Gas.

TRIENTHYLENE GLYCOL PROPERTIES: The Dow Chemical Company, 2007.

ANEXO A
Tablas de Setpoints

Tabla 38. Propiedades Físicas del Gas Natural.

Modulo	Variable	Tipo de Variable	Mínimo	Máximo	Unidad
Ventana - Datos de Entrada					
Propiedades Gas					
Factor de Compresibilidad Z					
	T. Gas	Entrada	75	115	F
	P. Gas	Entrada	69.7	1214.7	psia
	Composición Gas	Entrada	-	-	-
A-01.01	Z	Salida	-	-	-
Peso Molecular Aparente - Gravedad Específica					
	Composición Gas	Entrada	-	-	-
A-01.04	P. Molecular Aparente	Salida	-	-	-
A-01.04	Gravedad Específica	Salida	-	-	-
Densidad Gas					
	T. Gas	Entrada	-	-	R
	P. Gas	Entrada	-	-	psia
A-01.04	P. Molecular Aparente	A-01.04	-	-	-
A-01.05	Densidad Gas	Salida	-	-	-
Capacidad Calorífica Gas					
A-01.04	Gravedad Específica	A-01.04	0.6	0.8	
	P. Gas	Entrada	14.5	2900	psia
	T. Gas	Entrada	59	392	°F
A-01.06	Capacidad Calorífica Gas	Salida	-	-	BTU/lb°F

Tabla 39. Propiedades Físicas Fracción C7+.

Modulo	Variable	Tipo de Variable	Mínimo	Máximo	Unidad
Ventana - Datos de Entrada					
Caracterización C7 Plus					
Temperatura Crítica, Presión Crítica, Temperatura Ebullición					
	Peso Molecular	Entrada	70	300	-
	Gravedad Específica	Entrada	-	-	-
A-01.02	T. Crítica	Salida	-	-	R
A-01.02	P. Crítica	Salida	-	-	psia
A-01.02	T. Ebullición	Salida	80	650	R
Factor Acéntrico					
A-01.03	T. Ebullición	A-01.02	0	1200	R
A-01.03	Factor Acéntrico	Salida	0	1200	R

Tabla 40. Propiedades Físicas del TEG.

Modulo	Variable	Tipo de Variable	Mínimo	Máximo	Unidad
Ventana - Datos de Entrada					
Propiedades TEG					
Gravedad Específica TEG					
	T. TEG	Entrada	-	-	°F
A-05.01	Concentración TEG	A-05-01	-	-	%
A-02.01	Gravedad Específica	Salida	-	-	
Capacidad Calorífica TEG					
	T. TEG	Entrada	-	-	°F
A-05.01	Concentración TEG	A-05-01	-	-	%
A-02.02	Capacidad Calorífica TEG	Salida	-	-	BTU/lb°F
Flujo Másico TEG pobre					
A-08.01	Tasa de Circulación TEG	A-08.01	-	-	gpm
A-02.01	Gravedad Específica	A-02.01	-	-	
A-02.03	Flujo Másico TEG pobre	Salida	-	-	lb/hr
Flujo Másico TEG Rico					
	C. Agua Requerido	Entrada			
A-03.01.01	Contenido de Agua	A-03.01.01			
A-02.03	Flujo Másico TEG pobre	A-02.03			
	Tasa de Gas	Entrada			
A-02.04	Flujo Másico Agua Removida	Salida			
A-02.04	Flujo Másico TEG rico	Salida			lb/hr

Tabla 41. Contenido de Agua del Gas Natural.

Modulo	Variable	Tipo de Variable	Mínimo	Máximo	Unidad
Ventana - Datos de Entrada					
Contenido de Agua en el Gas					
Gas Dulce					
	T. Gas	Entrada	-40	212	°F
	P. Gas	Entrada	100	10000	psia
A-03.01.01	Contenido de Agua	Salida	-	-	lb/MMSCF
Gas Acido					
	T. Gas	Entrada	-	350	F
	P. Gas	Entrada	-	3400	psia
A-03.01.02	H2S Equivalente	Salida	0	50	%Mole
A-03.01.02	Factor Corrección	Salida	-	-	
A-03.01.02	C. de Agua Corregido	Salida	-	-	lb/MMSCF

Tabla 42. Diseño del Contactador.

Modulo	Variable	Tipo de Variable	Mínimo	Máximo	Unidad
Ventanas - Contactador					
Cálculos Básicos					
Punto de Rocío de Agua					
	P. Gas	Entrada	100	10000	psia
	C. de Agua Requerido	Entrada	-	-	-
A-03.01.01	T. Rocío Agua	Salida	-40	212	°F
Concentración de TEG Pobre					
	T. Contactor (gas)	Entrada	50	176	°F
	P. Contactor (gas)	Entrada	-	1494	psia
	T. Approach	Entrada	11	20	°F
A-05.01	Concentración TEG Pobre	Salida	90	99.999	%Peso
Relación de Recirculación TEG					
	Concentración TEG pobre	A-05.01	-	99.99	%Peso
A-09.01	TEG Recirculación	Salida	-	7.18	gal/lb H2O
A-09.01	N Etapas Teóricas	Salida	1	4	
Numero de Etapas Teóricas					
	Concentración TEG pobre	A-05.01	-	99.99	%Peso
A-09.01	TEG Recirculación	Salida	-	7.18	gal/lb H2O
A-09.01	N Etapas Teóricas	Salida	1	4	
Tasa de Circulación de TEG					
	C. Agua Requerido	Entrada	4	6	lb/MMSCF
A-03.01.01	Contenido de Agua	A-03.01.01	-	-	lb/MMSCF
A-09.01	TEG Recirculación	A-09.01	-	7.18	gal/lb H2O
	Flujo de Gas	Entrada	-	-	MMSCFD
A-08.01	Tasa de Circulación TEG	Salida	-	-	gpm
Diseño Detallado					
Área Activa del Plato					
A-06.01	ks bubblecaps	Entrada	-	0.18	ft/sec
A-06.01	Densidad Gas	Entrada	-	-	lb/ft3
A-06.01	Densidad TEG	Entrada	-	-	lb/ft3
A-06.01	Área Actica	Salida	-	-	ft2
Altura de los Platos					
A-10.01	E (overall)	Entrada	25	30	%

Tabla 43. Diseño Intercambiador L/R.

Modulo	Variable	Tipo de Variable	Mínimo	Máximo	Unidad
Ventanas - Intercambiador L/R					
Carga Térmica del Intercambiador					
A-02.03	Flujo Másico TEG pobre	A-02.03	-	-	lb/hr
A-02.04	Flujo Másico TEG rico	A-02.04	-	-	lb/hr
A-02.02	Capacidad Calorífica TEG	A-02.02	-	-	BTU/lb °F
B-01	T. in TEG rico	Entrada	-	-	°F
B-01	T in TEG pobre	Entrada	-	-	°F
B-01	T. out TEG rico	Salida	-	-	°F
B-01	T. out TEG pobre	Salida	-	-	°F
B-01	Carga Térmica HEX	Salida	-	-	MMBTU/hr

Tabla 44. Diseño Rehervidor.

Modulo	Variable	Tipo de Variable	Mínimo	Máximo	Unidad
Ventanas - Rehervidor					
Gas de Despojo					
A-15.01	T Reboiler	Entrada	360	400	°F
A-15.01	Lean TEG Concentración	Entrada	98.5	99.95	%Peso
A-15.01	Tasa Circulación TEG	Entrada	-	-	gal/min
A-15.01	Tasa Gas Despojo	Salida	-	-	SCF/galTEG
A-15.01	Diámetro Empaque	Salida	-	-	in
Carga Térmica Total del Rehervidor					
B-01	T in TEG pobre	B-01	-	-	°F
A-02.02	Capacidad Calorífica TEG	A-02.02	-	-	BTU/lb °F
A-08.01	Tasa de Circulación TEG	A-08.01	-	-	gpm
C-03	Carga Térmica Total	Salida	-	-	MMBTU/hr
Área de transferencia de Calor					
C-03	Carga Térmica Total	C-03	-	-	MMBTU/hr
C-03	Área de Transferencia	Salida	-	-	ft2

Tabla 45. Diseño Bomba de Recompresión.

Modulo	Variable	Tipo de Variable	Mínimo	Máximo	Unidad
Ventanas – Bomba de Recompresión					
Potencia de la Bomba de Recompresión					
	P. Contactor (gas)	Entrada	-	-	psia
B-01	T. entrada TEG pobre	B-01	-	-	°F
A-08.01	Tasa de Circulación TEG	A-08.01	-	-	gpm
A-02.02	Capacidad Calorífica TEG	A-02.02	-	-	BTU/lb°F
A-02.03	Flujo Másico TEG pobre	A-02.03	-	-	lb/hr
D-01	T. salida TEG pobre	Salida	-	-	°F
D-01	BHP	Salida	-	-	HP

Tabla 46. Diseño Intercambiador TEG/gas.

Modulo	Variable	Tipo de Variable	Mínimo	Máximo	Unidad
Ventanas - Intercambiador L/R					
Carga Térmica de Intercambiador TEG/gas					
A-02.02	Capacidad Calorífica TEG	A-02.02	-	-	BTU/lb°F
A-02.03	Flujo Másico TEG pobre	A-02.03	-	-	lb/hr
D-01	T. entrada TEG pobre	D-01	-	-	°F
	T. salida TEG pobre	Entrada	-	-	°F
E-01	T. salida Gas Seco	Salida	-	-	°F
E-01	Carga Térmica	Salida	-	-	MMBTU/hr

ANEXO B
Formularios – Fundamentación Teórica



Código:

A-01.01

Nombre:

Peng – Robinson Equation of State / Compressibility Factor Form

Formulas:

Subcódigo:

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

A-01.01.01

$$A = \frac{(a\alpha)_m P}{(RT)^2}$$

A-01.01.02

$$(a\alpha)_m = \sum_i \sum_j y_i y_j \sqrt{a_i a_j \alpha_i \alpha_j} (1 - k_{ij})$$

A-01.01.03

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

A-01.01.04

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2$$

$\omega \leq 0.4$

A-01.01.05

$$m = 0.379642 + 1.48503\omega - 0.164423\omega^2 + 0.016667\omega^3$$

$\omega > 0.49$

A-01.01.06

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

A-01.01.07

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

A-01.01.08

$$b_m = \sum_i [y_i b_i]$$

A-01.01.09

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

A-01.01.10



Nomenclatura y Unidades:

$Z [] =$	Compresibilidad del fluido.	$T_c [R] =$	Temperatura critica.
$R \left[\frac{ft^3 psia}{lb-mol R} \right] =$	Constante de gases reales.	$T_r [] =$	Temperatura reducida.
$P [psia] =$	Presión del gas.	$k [] =$	Coef. de interacción binaria.
$P_c [psia] =$	Presión critica.	$\omega [] =$	Factor acéntrico.
$T [R] =$	Temperatura del gas.	$y [] =$	Fracción molar

Constantes:

Constantes a y b:

$$\Omega_a = 0.45724$$

$$\Omega_b = 0.07780$$

Interacción Binaria.

Tener en cuenta que $k_{ij} = k_{ji}$.

	CO ₂	N ₂	H ₂ S	C1	C2	C3	i-C4	n-C4	i-C5	n-C5	C6	C7	C8	C9	C10
CO ₂	0	0	0.135	0.105	0.130	0.125	0.120	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115	0.115
N ₂		0	0.130	0.025	0.010	0.090	0.095	0.095	0.100	0.100	0.110	0.115	0.120	0.120	0.0125
H ₂ S			0	0.070	0.085	0.080	0.075	0.075	0.070	0.070	0.070	0.060	0.060	0.060	0.055
C1				0	0.005	0.010	0.035	0.025	0.050	0.030	0.030	0.035	0.040	0.040	0.045
C2					0	0.005	0.005	0.010	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020
C3						0	0	0	0.015	0.010	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
i-C4							0	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
n-C4								0	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
i-C5									0	0	0	0	0	0	0
n-C5										0	0	0	0	0	0
C6											0	0	0	0	0
C7												0	0	0	0
C8													0	0	0
C9														0	0
C10															0

(Ahmed, Equations of State and PVT Analysis 2007)



Factor Acéntrico:

Componente	ω	Componente	ω
CO ₂	0.2239	i-C5	0.2284
N ₂	0.0372	n-C5	0.2515
S ₂	0.1010	C6	0.2993
C1	0.0116	C7	0.3483
C2	0.0994	C8	0.3977
C3	0.1529	C9	0.4421
i-C4	0.1865	C10	0.4875
n-C4	0.2003		

(GPSA 2004)

Bibliografía

Ahmed, T. (2007). *Equations of State and PVT Analysis*. Houston: Gulf Publishing Company.

GPSA. (2004). *Engineering Data Book* (12th ed.). Tulsa: Gas Processors Suppliers Association.



Código:

A-01.02

Nombre:

Riazi and Daubert's Generalized Correlations for P_c , T_c , T_b .

Formulas:

$$\theta = a(M)^b \lambda^c \exp[d(M) + e\lambda + f(M)\lambda]$$

Subcódigo:

A-01.02.01

Nomenclatura y Unidades:

θ = Cualquier propiedad física (T_c, P_c, V_c, T_b) de C7+.

M = Peso molecular C7+.

λ = Gravedad Específica C7+.

Constantes:

θ	a	b	c	d	e	f
$T_c, ^\circ\text{R}$	544.40	0.299800	1.05550	-1.34780×10^{-4}	-0.616410	0
P_c, psia	4.52030×10^4	-0.806300	1.60150	-1.8078×10^{-3}	-0.308400	0
$V_c, \text{ft}^3/\text{lb}$	1.20600×10^{-2}	0.20378	-1.30360	-2.65700×10^{-3}	0.528700	2.60120×10^{-3}
$T_b, ^\circ\text{R}$	6.77857	0.401673	-1.58262	3.77409×10^{-3}	2.984036	-4.25288×10^{-3}

Bibliografía

Ahmed, T. (2007). *Equations of State and PVT Analysis*. Houston: Gulf Publishing Company.



Formulario Hyteg
Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-01.03

Nombre:

Kesler-Lee's Correlations para factor acéntrico de C7+.

Formulas

Subcódigo:

$$K = \frac{[T_b]^{1/3}}{GE^*}$$

A-01.03.01

$$\theta = \frac{T_b}{T_c}$$

A-01.03.02

Para $\theta > 0.8$:

$$\omega = -7.904 + 0.1352K - 0.007465K^2 + 8.359\theta + \left(\frac{1.408 - 0.01063K}{\theta} \right)$$

A-01.03.03

Para $\theta < 0.8$:

$$\omega = \frac{-\ln\left[\frac{P_c}{14.7}\right] - 5.92714 + \frac{6.09648}{\theta} + 1.28862 \ln[\theta] - 0.169347 \theta^6}{15.2518 - \frac{15.6875}{\theta} - 13.4721 \ln[\theta] + 0.43577 \theta^6}$$

A-01.03.04

Nomenclatura y Unidades:

$T_c [^{\circ}R]$ = Temperatura crítica C7+. $\omega []$ = Factor acéntrico C7+.

$T_b [^{\circ}R]$ = Temperatura de ebullición C7+.

$GE^* []$ = Gravedad específica C7+.

$K []$ = Factor de Caracterización de
Watson.

$\theta []$ = Temp. de ebullición reducida C7+.

Bibliografía

Ahmed, T. (2007). *Equations of State and PVT Analysis*. Houston: Gulf Publishing Company.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-01.04

Nombre:

Peso Molecular Aparente y Gravedad Específica del Gas.

Formula:

$$M_a = \sum_{i=1} y_i M_i$$

Subcódigo:

A-01.04.01

$$SG = \frac{M_a}{M_{air}}$$

$$M_{air} = 28.97 \left[\frac{kg}{kmol} \right]$$

A-01.04.02

Nomenclatura y Unidades:

$M_a \left[\frac{lb}{lb-mol} \right] =$ Peso molecular aparente del gas.

$M_i \left[\frac{lb}{lb-mol} \right] =$ Peso molecular componente.

$M_{air} \left[\frac{lb}{lb-mol} \right] =$ Peso molecular del aire.

$y [] =$ Fracción molar componente.

$SG [] =$ Gravedad específica del gas.

Bibliografía

Ahmed, T. (2007). *Equations of State and PVT Analysis*. Houston: Gulf Publishing Company.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-01.05

Nombre:

Ley de Gases Reales / Densidad Gas

Formula:

$$\rho_{gas} = \frac{PM_g}{ZRT}$$

Subcódigo:

Nomenclatura y Unidades:

$$\rho_{gas} \left[\frac{lb}{ft^3} \right] = \text{Densidad gas.}$$

$$M_{gas} \left[\frac{lb}{lb-mol} \right] = \text{Peso molecular gas.}$$

$$P [psia] = \text{Presión gas.}$$

$$T [R] = \text{Temperatura gas.}$$

$$R \left[\frac{ft^3 psia}{lb-mol R} \right] = \text{Constante universal de gases.}$$

Bibliografía

Ahmed, T. (2007). *Equations of State and PVT Analysis*. Houston: Gulf Publishing Company.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-01.06

Nombre:

Capacidad Calorífica Gas Natural

Formulas:

$$C_p = \left[ab^T T^c + de \left(\frac{P}{1000} \right)^f \right] \left(\frac{\gamma_g}{0.60} \right)^{0.025}$$

Subcódigo:

A-015.01.01

Nomenclatura y Unidades:

$C_p \left[\frac{BTU}{lb \cdot ^\circ F} \right] =$ Capacidad Calorífica gas natural.

$T [^\circ F] =$ Temperatura gas natural.

$P [psia] =$ Presión gas natural.

Constantes:

Gas SG	a	b	c	d	e	f	T (°F)
0.60	1.1231	1.0057	-0.7351	0.5126	1.1032	0.0161	59 - 392
0.65	1.9309	1.0068	-0.9104	0.5170	1.1075	0.0195	59 - 392
0.70	1.6987	1.0108	-1.2230	0.5506	1.1062	0.0209	68 - 392
0.75	8.7046	1.0108	-1.4945	0.5437	1.1079	0.0250	86 - 392
0.80	0.0014	1.0030	0.4652	0.5372	1.1118	0.0235	104 - 392
P = 14.5 - 2900 psia							

Bibliografía

Moshfeghian, M. (2009, Julio 1). *PetroSkills*. Retrieved from <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2009/07/variation-of-natural-gas-heat-capacity-with-temperature-pressure-and-relative-density/>



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-01.07

Nombre:

Flujo Volumétrico Real – Flujo Másico

Formula:

$$Q_{real} = \frac{41666.66 ZQP_{st}}{T_{st}P}$$

Subcódigo:

A-01.07.01

$$M_{gas} = Q_{real} \rho_{gas}$$

A-01.07.01

Nomenclatura y Unidades:

$$Q_{real} \left[\frac{ft^3}{hr} \right] = \text{Densidad gas.}$$

$$P_{st} [psia] = \text{Presión estándar.}$$

$$Q \left[\frac{MMSCF}{d} \right] = \text{Peso molecular gas.}$$

$$T_{st} [R] = \text{Temperatura estándar.}$$

$$Z [] = \text{Factor de Compresibilidad}$$

$$M_{gas} \left[\frac{lb}{hr} \right] = \text{Flujo másico gas.}$$

$$P [psia] = \text{Presión gas.}$$

$$\rho_{gas} \left[\frac{lb}{ft^3} \right] = \text{Densidad gas.}$$

$$T [R] = \text{Temperatura gas.}$$

Bibliografía

Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. I). Norman: Campbell Petroleum Series.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-02.01

Nombre:

Gravedad Específica del Glicol Pobre @T/60 °F – Dow Chemical Method

Formulas:

$$\gamma_{TEG} = A + Bx + Cx^2$$

Subcódigo:

A-02.01.01

Nomenclatura y Unidades:

γ_{TEG} [] = Gravedad Especifica @ 60 °F

x [] = Porcentaje en peso de Trietilenglicol.

Constantes:

T ° F	A	B	C
-50	1.0502	$1.8268 \cdot 10^{-3}$	$-5.2009 \cdot 10^{-6}$
0	1.0319	$1.7466 \cdot 10^{-3}$	$-4.8304 \cdot 10^{-6}$
50	1.0121	$1.5247 \cdot 10^{-3}$	$-2.8794 \cdot 10^{-6}$
100	0.9920	$1.7518 \cdot 10^{-3}$	$-5.4955 \cdot 10^{-6}$
150	0.9804	$1.5410 \cdot 10^{-3}$	$-4.3884 \cdot 10^{-6}$
200	0.9627	$1.4068 \cdot 10^{-3}$	$-3.5089 \cdot 10^{-6}$
250	0.9413	$1.3205 \cdot 10^{-3}$	$-2.7991 \cdot 10^{-6}$
300	0.9177	$1.2511 \cdot 10^{-3}$	$-2.0848 \cdot 10^{-6}$

Bibliografía

Triethylene Glycol. (2007). En Dow Chemical Company.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-02.02

Nombre:

Capacidad Calorífica TEG.

Formulas:

$$C_p = A + \frac{5}{9}B(T - 32) + \frac{25}{81}C(T - 32)^2$$

Subcódigo:

A-02.02.01

Nomenclatura y Unidades:

$$C_p \left[\frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ F} \right] = \text{Capacidad Calorífica TEG.}$$

$$T [^\circ F] = \text{Temperatura TEG}$$

Constantes:

%Peso	A	B	C
0	1.00540	-2.7286E-4	2.9143E-6
10	0.96705	-2.7144E-5	2.4952E-6
20	0.92490	2.0429E-4	2.4524E-6
30	0.88012	4.3000E-4	1.6952E-6
40	0.83229	6.2286E-4	1.3714E-6
50	0.78229	7.9286E-4	1.0857E-6
60	0.72200	9.4000E-4	8.0000E-7
70	0.66688	1.0871E-3	4.7620E-7
80	0.60393	1.2043E-3	2.8571E-7
90	0.53888	1.2800E-3	1.9048E-7
100	0.48614	1.3929E-3	-5.7140E-8

Bibliografía

Triethylene Glycol Properties. (2007). The Dow Chemical Company.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-02.03

Nombre:

Flujo Másico TEG pobre.

Formulas:

$$M_{leanTEG} = 500.268 L SG_{TEG}$$

Subcódigo:

A-02.03.01

Nomenclatura y Unidades:

$$M_{leanTEG} \left[\frac{lb}{hr} \right] = \text{Flujo másico TEG pobre.}$$

$$L \left[\frac{gal}{min} \right] = \text{Tasa de circulación TEG pobre.}$$

$$SG_{TEG} [] = \text{Gravedad específica TEG pobre.}$$

Bibliografía

Manning, F. S. (1991). *Oilfield Processing of Petroleum* (Vol. 1). Tulsa: PennWell Publishing Company.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-02.04

Nombre:

Flujo Másico TEG rico.

Formulas:

$$M_{removed\ H2O} = \frac{1}{24} (W_{C_{gas}} - W_{C_{required}}) Q_{gas}$$

$$M_{richTEG} = M_{leanTEG} + M_{removed\ H2O}$$

Subcódigo:

A-02.04.01

Nomenclatura y Unidades:

$$W_{C_{gas}} \left[\frac{lb}{MMSCF} \right] = \text{Contenido de agua en el gas de entrada.}$$

$$W_{C_{required}} \left[\frac{lb}{MMSCF} \right] = \text{Contenido de agua requerido.}$$

$$M_{removed\ H2O} \left[\frac{lb}{hr} \right] = \text{Flujo másico H2O removido.}$$

$$M_{leanTEG} \left[\frac{lb}{hr} \right] = \text{Flujo másico TEG pobre.}$$

$$M_{richTEG} \left[\frac{lb}{hr} \right] = \text{Flujo másico TEG rico.}$$

$$Q_{gas} \left[\frac{MMSCF}{d} \right] = \text{Tasa de Gas de Entrada}$$

Bibliografía

Manning, F. S. (1991). *Oilfield Processing of Petroleum* (Vol. 1). Tulsa: PennWell Publishing Company.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-03.01.01

Nombre:

Calculo del Contenido de Agua Dulce

Formulas:

$$Wc = \left(\frac{A}{P} + B\right) (C)$$

$$A = a * e^{\left[-\frac{(T-b)^2}{2c^2}\right]}$$

$$B = d * e^{\left[-\frac{(T-f)^2}{2g^2}\right]}$$

Subcódigo:

A-03.01.01.01

A-03.01.01.02

A-03.01.01.03

Nomenclatura y Unidades:

$Wc \left[\frac{lb H2O}{MMSCF} \right]$ = Contenido de agua del gas dulce.

$T [^{\circ}F]$ = Temperatura del gas.

$P [psia]$ = Presión.

Constantes:

C (Factor de Conversión) = 62.5

Baja T	Alta T	a _A	b _A	c _A	a _B	b _B	c _B
° C	° C						
-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	110.1560	1.5611	227.1200	59.4634

Bibliografía

Moshfeghian, M. (1 de Septiembre de 2014). *PetroSkills*. Obtenido de Lean Sweet Natural Gas Water Content Correlation: <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2014/09/lean-sweet-natural-gas-water-content-correlation/>



Formulario Hyteg
Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-03.02.01

Nombre:

Calculo del Contenido de Agua de Gas Agrio.

Formulas:

Subcódigo:

$$HEC = \% \text{ Molar } H_2S + 0.7(\% \text{ Molar } CO_2)$$

A-03.01.01.01

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

A-03.01.01.02

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

A-03.01.01.03

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

A-03.01.01.04

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

A-03.01.01.05

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

A-03.01.01.06

A-03.01.01.07

$$a = 1 + 6.73 * 10^{-5}P - 8.98 * 10^{-8}P^2 + 4.48 * 10^{-11}P^3 - 6.55 * 10^{-15}P^4$$



A-03.01.01.07

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

A-03.01.01.08

$$c = 3.18 * 10^{-6} + 3.24 * 10^{-8}P + 3.08 * 10^{-11}P^2 + 2.228^{-16}P^3 - 2.60 * 10^{-19}P^4$$

$$Wc, sour = F * Wc, sweet$$

A-03.01.01.09

Nomenclatura y Unidades:

$Wc \left[\frac{lb H_2O}{MMSCF} \right]$ = Contenido de agua del gas dulce.

$T [^{\circ}F]$ = Temperatura del gas.

$P [psia]$ = Presión del gas.

Bibliografía

Moshfeghian, M. (1 de Abril de 2015). *PetroSkills*. Obtenido de Estimating Sour Gas Water Content by New Correlations and Simplified Charts: <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2015/04/estimating-sour-gas-water-content-by-new-correlations-and-simplified-charts/>



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-04.01

Nombre:

Calculo de la Temperatura de Roció del Agua en el Gas.

Formulas:

$$Wc = \left(\frac{A}{P} + B\right) (C)$$

Subcódigo:

A-03.01.01.01

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

A-03.01.01.02

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

A-03.01.01.03

Nomenclatura y Unidades:

$Wc \left[\frac{lb H_2O}{MMSCF} \right]$ = Contenido de agua del gas dulce.

$T [^{\circ}F]$ = Temperatura del gas.

$P [psia]$ = Presión del gas.

Constantes:

C (Factor de Conversión) = 62.5

Baja T	Alta T	a_A	b_A	c_A	a_B	b_B	c_B
$^{\circ}C$	$^{\circ}C$						
-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	110.1560	1.5611	227.1200	59.4634

Bibliografía

Moshfeghian, M. (1 de Septiembre de 2014). *PetroSkills*. Obtenido de <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2014/09/lean-sweet-natural-gas-water-content-correlation/>



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-05.01

Nombre:

Rapid Estimation of Equilibrium Water Dew Point of Natural Gas in TEG Dehydration Systems.

Formula:

Subcódigo:

$$T_d = \frac{9}{5}a - 460 + b(T_d + 460) + \frac{5}{9}c(T_d + 460)^2 + \frac{25}{81}d(T_d + 460)^3$$

A-05.01.01

$$a = A_1 + B_1W + C_1W^2 + D_1W^3$$

A-05.01.02

$$b = A_2 + B_2W + C_2W^2 + D_2W^3$$

A-05.01.03

$$c = A_3 + B_3W + C_3W^2 + D_3W^3$$

A-05.01.04

$$d = A_4 + B_4W + C_4W^2 + D_4W^3$$

A-05.01.05

Nomenclatura y Unidades:

T_d [°F] = Temperatura de rocío del agua.

T_c [°F] = Temperatura del contactor. (50 °F – 176 °F)

W [] = Pureza TEG. Porcentaje másica. (90% – 99.999%)



Constantes:

Coeficiente	90% < TEG < 99%	99% < TEG < 99.9%	99.9% < TEG < 99.999%
A ₁	2.727934205339338*10 ⁷	5.948778272003327*10 ⁹	-1.434042060305527*10 ¹³
B ₁	-8.631372857145108*10 ⁵	-1.790765203821737*10 ⁸	-1.434042060305527*10 ¹³
C ₁	9.095756908066296*10 ³	1.796891322204887*10 ⁶	-4.306461745218327*10 ⁹
D ₁	-3.192394176943851*10 ¹	-6.010038602026653*10 ³	1.436210185528952*10 ⁷
A ₂	-2.653646110218815*10 ⁵	-6.033812028658381*10 ⁷	1.377170114378799*10 ¹¹
B ₂	8.394220905037211*10 ³	1.816573929578706*10 ⁶	-4.133592993287494*10 ⁹
C ₂	-8.843532185285766*10 ¹	-1.823001079027631*10 ⁴	4.135676303556589*10 ⁷
D ₂	3.103038903374517*10 ⁻¹	6.098082812834708*10 ¹	-1.379253424664974*10 ⁵
A ₃	8.616616027595576*10 ²	2.040747181326815*10 ⁵	-4.362719886544207*10 ⁸
B ₃	-2.725023220090672*10 ¹	-6.144735183073446*10 ³	1.309475458226566*10 ⁷
C ₃	2.870185527430992*10 ⁻¹	6.167227566580564*10 ¹	-1.310135158620758*10 ⁵
D ₃	-1.006847138127057*10 ⁻³	-2.063239320629376*10 ⁻¹	4.369316890559073*10 ²
A ₄	-9.319294190023186*10 ⁻¹	-2.273886759702042*10 ²	4.616804880279627*10 ⁵
B ₄	2.946481646399538*10 ⁻²	6.847347278284538	-1.385739729044255*10 ⁴
C ₄	-3.102601747330962*10 ⁻⁴	-6.873040245312648*10 ⁻²	1.386438214526602*10 ²
D ₄	1.088073588828679*10 ⁻⁶	2.299579467606105*10 ⁻⁴	-4.623789735185614*10 ⁻¹

(Bahadori y Vuthaluru, Rapid Estimation of Equilibrium Water Dew Point of Natural Gas in TEG Dehydration Systems 2009)

Bibliografía

Bahadori, A., & Vuthaluru, B. H. (2009). Rapid Estimation of Equilibrium Water Dew Point of Natural Gas in TEG Dehydration Systems. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 4.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-14.01

Nombre:

Cálculo del Área de Empaque Activa del Contactor.

Formulas:

$$v = K_s \left(\frac{\rho_L - \rho_g}{\rho_g} \right)^{0.5}$$

Subcódigo:

A-14.01.01

$$q_a = \frac{q_{std}}{86400} \left(\frac{P_{std}}{P_a} \right) \left(\frac{T_a}{T_{std}} \right) Z$$

A-14.01.02

$$A_T = \frac{q_a}{v}$$

A-14.01.03

Constantes:

Ks (bubblecaps) = 0.18 ft/s

Ks (empaques) = 0.30 – 0.34 ft/s

Nomenclatura y Unidades:

$v \left[\frac{ft}{s} \right] =$ Velocidad Permitida de Gas.

$\rho_L \left[\frac{lb}{ft^3} \right] =$ Densidad del TEG.

$A_T \left[ft^2 \right] =$ Área de empaques activa.

$q_a \left[\frac{ft^3}{s} \right] =$ Flujo actual de gas.

$\rho_g \left[\frac{lb}{ft^3} \right] =$ Densidad del Gas.

$q_{std} \left[\frac{SCF}{d} \right] =$	Flujo a condiciones estándar.	$T_a [R] =$	Temperatura actual del flujo.
$P_{std} [psia] =$	Presión Estándar.	$Z [] =$	Factor de compresibilidad del gas.
$P_a [psia] =$	Presión actual del flujo.		
$T_{std} [R] =$	Temperatura estándar.		

Bibliografía

Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. I). Norman: Campbell Petroleum Series.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-07.01

Nombre:

Porcentaje Concentración TEG Rico

Formula:

$$\%W_{rich\ TEG} = \frac{(\rho_{TEG})(\%W_{lean\ TEG})}{\rho_{TEG} + \frac{1}{RC}}$$

Subcódigo:

A-07.01.01

Nomenclatura y Unidades:

$\%W_{lean\ TEG} [\%]$ = Pureza TEG pobre. Porcentaje másico.

$\%W_{rich\ TEG} [\%]$ = Pureza TEG rico. Porcentaje másico.

$RC \left[\frac{gal\ TEG}{lb\ H_2O} \right]$ = Relación de recirculación.

$\rho_{TEG} \left[\frac{lb}{gal} \right]$ = Densidad TEG.

Bibliografía

Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. 1). Norman: Campbell Petroleum Series.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-08.01

Nombre:

Calculo Tasa de Circulación TEG

Formula:

$$L = \frac{(RC)(W_{removida})(Q_g)}{1440}$$

$$W_{removida} = W_{in} - W_{out}$$

Subcódigo:

A-08.01.01

A-08.01.02

Nomenclatura y Unidades:

$$L \left[\frac{gal}{min} \right] = \text{Tasa de circulación TEG.}$$

$$RC \left[\frac{gal\ TEG}{lb\ H_2O} \right] = \text{Relación de recirculación.}$$

$$Q_g \left[\frac{MMSCF}{d} \right] = \text{Relación de recirculación}$$

$$W_{removida} \left[\frac{lb\ H_2O}{MMSCF} \right] = \text{Cantidad de agua removida.}$$

$$W_{in} \left[\frac{lb\ H_2O}{MMSCF} \right] = \text{Cantidad de agua a la entrada.}$$

$$W_{out} \left[\frac{lb\ H_2O}{MMSCF} \right] = \text{Cantidad de agua a la salida.}$$

Bibliografía

Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. 1). Norman: Campbell Petroleum Series.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-09.01

Nombre:

Simple Methodology for Sizing of Absorbers for TEG Gas Dehydration Systems.

Formula:

Eficiencia de Remoción de Agua Objetivo:

$$R = \frac{W_{in} - W_{out}}{W_{in}}$$

Subcódigo:

A-09.01.01

Eficiencia de Remoción de Agua Calculada:

$$\ln(R) = a + \frac{(119.8265) b}{\Psi} + \frac{(119.8265)^2 c}{\Psi^2} + \frac{(119.8265)^3 d}{\Psi^3} \quad \text{A-09.01.02}$$

$$a = A_1 + \frac{B_1}{X} + \frac{C_1}{X^2} + \frac{D_1}{X^3} \quad \text{A-09.01.03}$$

$$b = A_2 + \frac{B_2}{X} + \frac{C_2}{X^2} + \frac{D_2}{X^3} \quad \text{A-09.01.04}$$

$$c = A_3 + \frac{B_3}{X} + \frac{C_3}{X^2} + \frac{D_3}{X^3} \quad \text{A-09.01.05}$$

$$d = A_4 + \frac{B_4}{X} + \frac{C_4}{X^2} + \frac{D_4}{X^3} \quad \text{A-09.01.06}$$

Nomenclatura y Unidades:

R [] = Eficiencia de remoción de agua. Fracción.

Ψ $\left[\frac{\text{gal TEG}}{\text{lb } H_2O} \right]$ = Relación de circulación TEG.

X [] = Concentración TEG pobre. Fracción másica.



Formulario Hyteg
Arnold Salazar, Andres Peña

Coeficiente	# Etapas Teóricas N = 1	# Etapas Teóricas N = 1.5	# Etapas Teóricas N = 2
A ₁	1.51750000734*10 ⁵	1.36318190812*10 ⁴	-1.27155870163*10 ⁵
B ₁	-4.5287844071*10 ⁵	-4.1087635096*10 ⁴	3.78535979271*10 ⁵
C ₁	4.50515787525*10 ⁵	4.1278286256*10 ⁴	-3.75616159919*10 ⁵
D ₁	-1.49387377624*10 ⁵	-1.38224984469*10 ⁴	1.24236038846*10 ⁵
A ₂	-1.1316270524*10 ⁴	-1.07128653518*10 ³	1.16335738747*10 ⁴
B ₂	3.3777842508*10 ⁴	3.22852999323*10 ³	-3.46339151846*10 ⁴
C ₂	-3.3607087*10 ⁴	-3.24270631055*10 ³	3.43686140202*10 ⁴
D ₂	1.11455135941*10 ⁴	1.08546448915*10 ³	-1.1368271474*10 ⁴
A ₃	2.4475093673*10 ²	3.97385136272*10 ¹	-3.3397932662*10 ²
B ₃	-7.3073793526*10 ²	-1.19123690208*10 ²	9.94295556513*10 ²
C ₃	7.2722549748*10 ²	1.1902390712*10 ²	-9.8669620555*10 ²
D ₃	-2.41238559437*10 ²	-3.96388087735*10 ¹	3.2637991018*10 ²
A ₄	-1.62668383278	-3.76154014912*10 ⁻¹	2.856748838
B ₄	4.85801145745	1.1251621391	-8.50453031755
C ₄	-4.8359647407	-1.1218236382	8.4391925267
D ₄	1.6046374352	3.7281593611*10 ⁻¹	-2.7914105909

Coeficiente	# Etapas Teóricas N = 2.5	# Etapas Teóricas N = 3	# Etapas Teóricas N = 4
A ₁	3.65792068453*10 ⁴	1.72521576917*10 ⁶	-7.38643001783*10 ⁷
B ₁	-1.09019787644*10 ⁵	-5.16460399496*10 ⁶	2.21479386633*10 ⁸
C ₁	1.08309529773*10 ⁵	5.1535751573*10 ⁶	-2.21365910392*10 ⁸
D ₁	-3.58689467686*10 ⁴	-1.7141869357*10 ⁶	7.37508239331*10 ⁷
A ₂	-2.59663054678*10 ³	-1.26805051527*10 ⁵	4.97389685515*10 ⁶
B ₂	7.74050225267*10 ³	3.79545983218*10 ⁵	-1.49140002987*10 ⁷
C ₂	-7.69127114067*10 ³	-3.78677891486*10 ⁵	1.4906312923*10 ⁷
D ₂	2.54739956763*10 ³	1.25936959826*10 ⁵	-4.96620947993*10 ⁶
A ₃	5.39404855899*10 ¹	3.20022637366*10 ³	-1.049098764*10 ⁵
B ₃	-1.60845322929*10 ²	-9.57833625744*10 ³	3.14566557041*10 ⁵
C ₃	1.59871276975*10 ²	9.5560237605*10 ³	-3.14403546725*10 ⁵
D ₃	-5.29664543317*10 ¹	-3.1779138752*10 ³	1.04746866096*10 ⁵
A ₄	-3.3504537023*10 ⁻¹	-2.45377077254*10 ¹	6.77322483974*10 ²
B ₄	9.9951682574*10 ⁻¹	7.34407625715*10 ¹	-2.030910371004*10 ³
C ₄	-9.93899634714*10 ¹	-7.3268643351*10 ¹	2.02985369484*10 ³
D ₄	3.2942824495*10 ⁻¹	2.43655884304*10 ¹	-6.7626580778*10 ²

(Bahadori y Hari, Simple Methodology for Sizing of Absorbers for TEG (triethylene glycol) Gas Dehydration Systems 2009)



Formulario Hyteg
Arnold Salazar, Andres Peña

Bibliografía

Bahadori, A., & Hari, V. B. (2009). Simple Methodology for Sizing of Absorbers for TEG (triethylene glycol) Gas Dehydration Systems. *Energy, The International Journal*, 7.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-10.01

Nombre:

Método de Cálculo de John Campbell Gas Processing Vol 2.

Formulas:

Subcódigo:

$$E = \frac{N_e}{N_r}$$

$$h_p = N_r * 288$$

Nomenclatura y Unidades:

E = Eficiencia.

N_e = Número de Etapas en el equilibrio.

N_r = Número de Etapas Reales.

$h_p [ft]$ = Altura de la Zona de platos.

Bibliografía

Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and processing* (7 ed., Vol. 2: The Equipment Modules). Norman Oklahoma: Campbell Petroleum Series.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-11.01

Nombre:

Método de Cálculo de John Campbell Gas Processing Vol 2.

Formulas:

$$h = h_p + h_1$$

$$h_1 = 13.33333$$

Subcódigo:

Nomenclatura y Unidades:

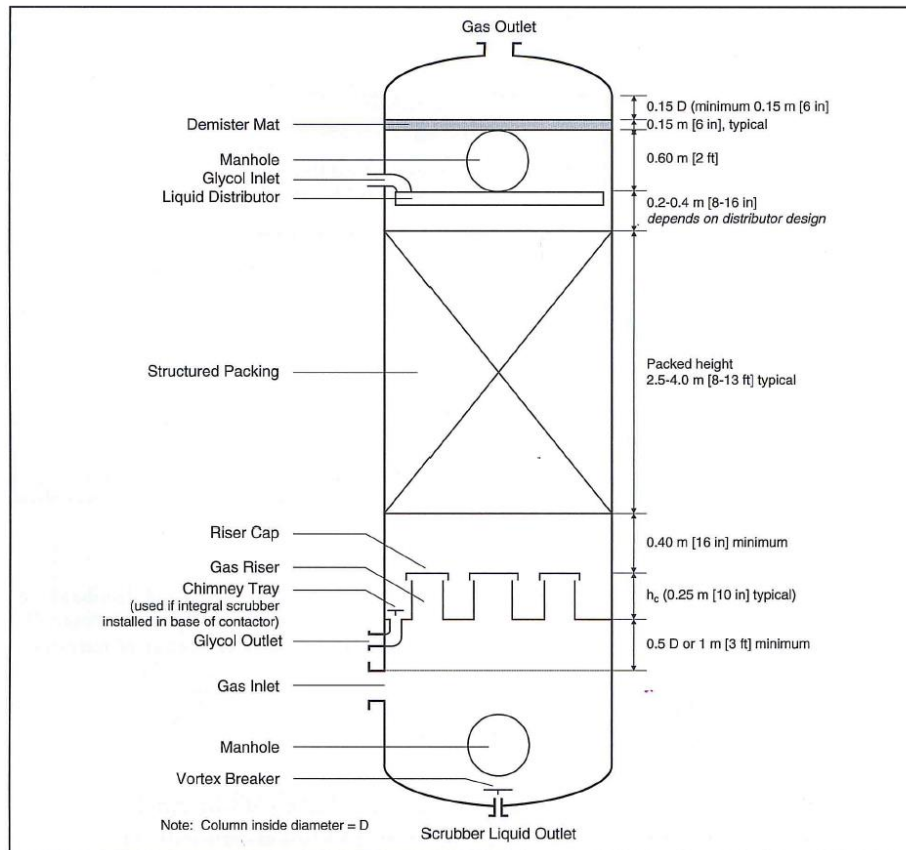
$h[ft]$ = Altura del contactor.

$h_1[ft]$ = Altura Aprox. de los componentes extras del contactor.

$h_p[ft]$ = Altura de la Zona de empaque.



Graficas:



Bibliografía

Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and processing* (7 ed., Vol. 2: The Equipment Modules). Norman Oklahoma: Campbell Petroleum Series.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-12.01

Nombre:

Método de Cálculo de John Campbell Gas Processing Vol 2.

Formulas:

Subcódigo:

$$h_e = HETP * N_e$$

Nomenclatura y Unidades:

h_e [ft] = Altura de la Zona de Empaques.

N_e = Número de Etapas en el equilibrio.

$HETP$ [ft] = Altura equivalente a un plato teórico.

Bibliografía

Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and processing* (7 ed., Vol. 2: The Equipment Modules). Norman Oklahoma: Campbell Petroleum Series.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-13.01

Nombre:

Método de Cálculo de John Campbell Gas Processing Vol 2.

Formulas:

$$h = h_e + h_1$$

$$h_1 = 13.33333$$

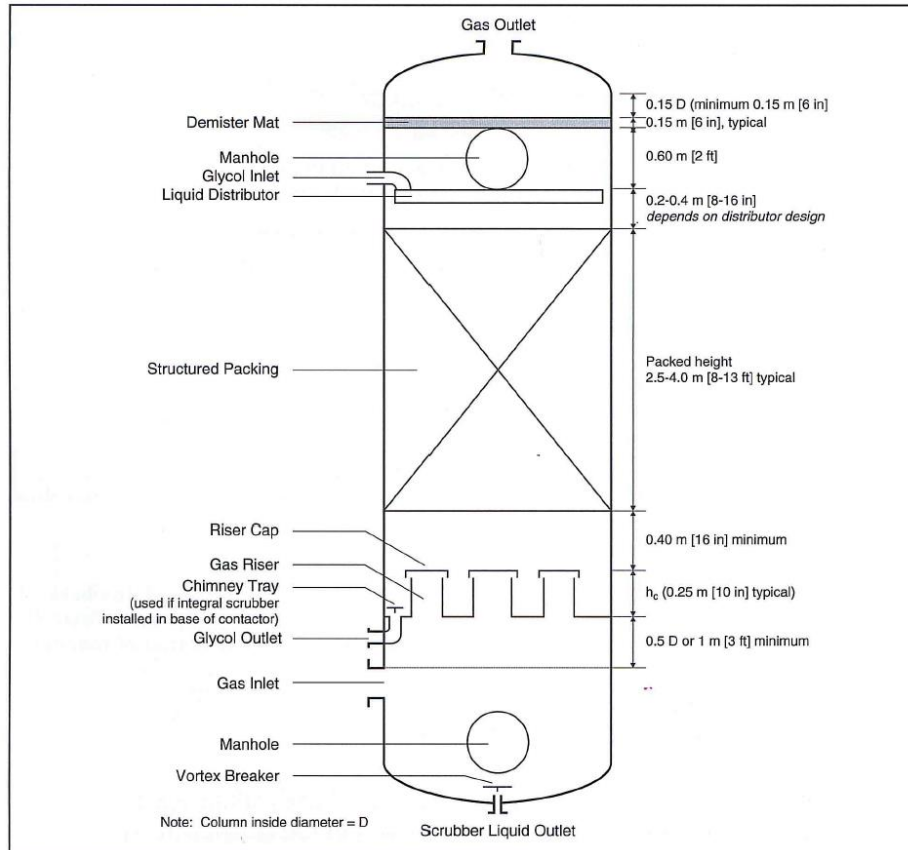
Subcódigo:

Nomenclatura y Unidades:

$h[ft]$ = Altura del contactor.

$h_1[ft]$ = Altura Aprox. de los componentes extras del contactor.

$h_e[ft]$ = Altura de la Zona de empaque.



Bibliografía

Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and processing* (7 ed., Vol. 2: The Equipment Modules). Norman Oklahoma: Campbell Petroleum Series.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-14.01

Nombre:

Generalized Pressure Drop Correlation: Stringle's Chart.

Formulas:

$$Y = C_s F_p^{0.5} v_l^{0.05}$$

$$C_s = u_s \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}}$$

$$X = \left(\frac{L}{G}\right) \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{0.5}$$

$$d = \left(\frac{4q_a}{\pi u_s}\right)^{0.5}$$

Subcódigo:

A-14.01.01

A-14.01.02

A-14.01.03

A-14.01.04

Nomenclatura y Unidades:

$Y [] =$ Parámetro de capacidad.

$X [] =$ Parámetro de flujo.

$\rho_L \left[\frac{lb}{ft^3}\right] =$ Densidad del TEG.

$\rho_g \left[\frac{lb}{ft^3}\right] =$ Densidad del gas.

$v_l [cSt] =$ Viscosidad Cinemática.

$F_p [] =$ Factor del empaque.

$L \left[\frac{lb}{h}\right] =$ Flujo másico del líquido.

$G \left[\frac{lb}{h}\right] =$ Flujo másico del gas.

$d [ft] =$ Diámetro de la torre.

$q_a \left[\frac{ft^3}{s}\right] =$ Flujo actual del gas.

$u_s \left[\frac{ft}{s}\right] =$ Velocidad superficial del gas.

Bibliografía

Campbell, J. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. I). Norman: Campbell Petroleum Series.

Kister, H. Z., Scherffius, J., Afshar, K., & Abkar, E. (2007). Realistically Predict Capacity and Pressure Drop for Packed Columns. *CEP*, 11.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

A-015.01

Nombre:

Correlación de Gas de Despojo para la Regeneración de TEG Pobre.

Formulas:

$$TGD = \left[\frac{ax-10}{1+bx+cx^2} \right] + [dy + ey^2 + fy^3]$$

$$y = [g - T]x$$

$$d = (A)(L)^{0.5}$$

Subcódigo:

A-015.01.01

A-015.01.02

A-015.01.03

Nomenclatura y Unidades:

$TGD \left[\frac{SCF \text{ gas}}{gal \text{ TEG}} \right] =$ Tasa de gas de despojo.

$x [] =$ Fracción másica de TEG pobre.

$T [^{\circ}F] =$ Temperatura del rehervidor.

$d [in] =$ Diámetro del empaque.

$L \left[\frac{gal}{min} \right] =$ Tasa de circulación de TEG.

$A [] =$ Constante Empírica.



Constantes:

Parametro	Numero de Etapas Teóricas en la Sección de Gas de Despojo		
a	10.1283	10.1120	10.1110
b	0.329158	5.35913	10.7577
c	-1.32139	-6.35126	-11.7470
d	0.046894	-1.74132	-1.91403
e	-0.000143	0.000381	0.000408
f	0.000	0.004497	0.004911
g	380		
T	360 – 400 ° F		
X	0.9850 – 0.9995		
A	9.1		

Bibliografía

Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. II). Norman: Campbell Petroleum Series.

Moshfeghian, M. (2013, July 1). *PetroSkills*. Retrieved from TEG Dehydration: Stripping Gas Correlations for Lean TEG Regeneration: <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2013/07/teg-dehydration-stripping-gas-correlations-for-lean-teg-regeneration/>



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

B-01

Nombre:

Intercambiador de Calor TEG rico / TEG pobre.

- El TEG pobre entra a 400 °F (T. rehervidor)
- Se estima la temperatura de salida de TEG pobre.
- El TEG rico entra a la temperatura del Contactor.
- El TEG rico sale a 340° F (60 °F approach maximiza el calentamiento del glicol rico)

Formulas:

Subcódigo:

$$T_{out-leanTEG} = T_{in-leanTEG} - \left[(T_{out-richTEG} - T_{in-richTEG}) \left(\frac{m_{richTEG} C_{p richTEG}}{m_{leanTEG} C_{p leanTEG}} \right) \right] \quad \text{B-01.01}$$

$$Q_{TEG hex} = 1 \times 10^{-6} m_{leanTEG} C_{P leanTEG} (T_{out-leanTEG} - T_{in-leanTEG}) \quad \text{B-01.02}$$

Nomenclatura y Unidades:

$T_{in-leanTEG}$ [°F] = Temperatura entrada TEG pobre (temperatura rehervidor).

$T_{out-leanTEG}$ [°F] = Temperatura salida TEG pobre.

$T_{in-richTEG}$ [°F] = Temperatura entrada TEG rico (temperatura contactor)

$T_{out-richTEG}$ [°F] = Temperatura salida TEG rico (60 °F approach)



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

$m_{leanTEG} \left[\frac{lb}{hr} \right] =$ Flujo másico TEG pobre.

$m_{richTEG} \left[\frac{lb}{hr} \right] =$ Flujo másico TEG rico.

$C_{p\ leanTEG} \left[\frac{BTU}{lb\ ^\circ F} \right] =$ Capacidad calorífica promedio TEG pobre.

$C_{p\ richTEG} \left[\frac{BTU}{lb\ ^\circ F} \right] =$ Capacidad calorífica promedio TEG rico.

$Q_{TEG\ hex} \left[\frac{MMBTU}{hr} \right] =$ Carga Térmica Intercambiador.

Bibliografía

Manning, F. S. (1991). *Oilfield Processing of Petroleum* (Vol. 1). Tulsa: PennWell Publishing Company.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

D-01

Nombre:

Correlación de Gas de Despojo para la Regeneración de TEG Pobre.

Formulas:

$$TGD = \left[\frac{ax-10}{1+bx+cx^2} \right] + [dy + ey^2 + fy^3]$$

$$y = [g - T]x$$

$$d = (A)(L)^{0.5}$$

Subcódigo:

D-01.01

D-01.02

D-01.03

Nomenclatura y Unidades:

$TGD \left[\frac{SCF \text{ gas}}{gal \text{ TEG}} \right] =$ Tasa de gas de despojo.

$x [] =$ Fracción másica de TEG pobre.

$T [^{\circ}F] =$ Temperatura del rehervidor.

$d [in] =$ Diámetro del empaque.

$L \left[\frac{gal}{min} \right] =$ Tasa de circulación de TEG pobre.

$A [] =$ Constante Empírica.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Constantes:

Parametro	Numero de Etapas Teóricas en la Sección de Gas de Despojo		
	0	1	2
a	10.1283	10.1120	10.1110
b	0.329158	5.35913	10.7577
c	-1.32139	-6.35126	-11.7470
d	0.046894	-1.74132	-1.91403
e	-0.000143	0.000381	0.000408
f	0.000	0.004497	0.004911
g	380		
T	360 – 400 ° F		
X	0.9850 – 0.9995		
A	4		

Bibliografía

Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. II). Norman: Campbell Petroleum Series.

Moshfeghian, M. (2013, July 1). *PetroSkills*. Retrieved from TEG Dehydration: Stripping Gas Correlations for Lean TEG Regeneration: <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2013/07/teg-dehydration-stripping-gas-correlations-for-lean-teg-regeneration/>



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

C-03

Nombre:

Duty del Rehervidor.

Formulas:

$$Q_{RT} = 10^{-6} (Q_{R1} + Q_{R2} + Q_{R3} + Q_{R4})$$

$$Q_{R1} = M_{lean} C_p (T_{reb} - T_{rich})$$

$$Q_{R2} = M_{H2O} H_{fg}$$

$$Q_{R3} = R_{reflux} Q_{R2}$$

$$A = \frac{10^6 Q_{RT}}{Q_{flux}}$$

Subcódigo:

C-03.01

C-03.02

C-03.03

C-03.04

C-03.05

Nomenclatura y Unidades:

$$Q_{RT} \left[\frac{MMBTU}{hr} \right] = \text{Carga térmica total del rehervidor.}$$

$$Q_{R1} \left[\frac{BTU}{hr} \right] = \text{Carga térmica debido al TEG.}$$

$$Q_{R2} \left[\frac{BTU}{hr} \right] = \text{Carga térmica para vaporizar agua.}$$

$$Q_{R3} \left[\frac{BTU}{hr} \right] = \text{Carga termina por reflujo de agua en columna destiladora.}$$

$$Q_{R4} \left[\frac{BTU}{hr} \right] = \text{Carga termina debido a pérdidas de calor.}$$

$$M_{lean} \left[\frac{lb \text{ TEG}}{hr} \right] = \text{Flujo másico TEG.}$$

$$M_{H2O} \left[\frac{lb \text{ TEG}}{hr} \right] = \text{Flujo másico de agua removida.}$$

$$C_p \left[\frac{BTU}{lb \text{ } ^\circ F} \right] = \text{Capacidad Calorífica TEG a temperatura promedio.}$$



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

$h_{fg} \left[\frac{BTU}{lb} \right] =$ Calor latente de evaporización de H₂O a presión del rehervidor.

$T_{reb} [^{\circ}F] =$ Temperatura del rehervidor.

$T_{rich} [^{\circ}F] =$ Temperatura de TEG a la entrada del regenerador.

$R_{reflux} =$ Radio de reflujo de agua en la columna destiladora.

$Q_{Flux} \left[\frac{BTU}{hr-ft^2} \right] =$ Flujo térmico por unidad de área.

$A [ft^2] =$ Área de transferencia de calor.

Constantes:

$$Q_{R4} = 5000 - 20000 \left[\frac{BTU}{hr} \right]$$

$$R_{reflux} = 0.25$$

$$h_{fg} = 978 \frac{BTU}{lb H_2O} @ 14.7 \text{ psia}$$

Bibliografía

Manning, F. S. (1991). *Oilfield Processing of Petroleum* (Vol. 1). Tulsa: PennWell Publishing Company.



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

D-01

Nombre:

Calculo de trabajo de la bomba TEG.

Formulas:

$$BHP = \frac{0.00058333 L (P_{contactor} + \Delta P_{GAS\ hex} - P_{reboiler})}{E}$$

$$T_{out-leanTEG} = \frac{2545 BHP}{m_{leanTEG} C_{p\ leanTEG}} + T_{in-leanTEG}$$

Subcódigo:

D-01.01

D-01.02

Nomenclatura y Unidades:

$L \left[\frac{gal\ TEG}{min} \right] =$ Tasa de TEG.

$P_{contactor} [psia] =$ Presión de entrada de TEG pobre al contactor.

$P_{reboiler} [psia] =$ Presión de salida de TEG pobre del rehervidor.

$\Delta P_{GAS\ hex} [psia] =$ Caída de presión en contactor Glycol / Gas.

$E [] =$ Eficiencia termodinámica. (75%)

$BHP [HP] =$ Trabajo requerido por la bomba.

$T_{in-leanTEG} [^{\circ}F] =$ Temperatura de entrada de TEG a la bomba. (T. salida TEG hex)

$T_{out-leanTEG} [^{\circ}F] =$ Temperatura de salida de TEG de la bomba.

$m_{leanTEG} \left[\frac{lb}{hr} \right] =$ Flujo másico de TEG pobre.

$C_{p\ leanTEG} \left[\frac{BTU}{lb\ ^{\circ}F} \right] =$ Capacidad calorífica TEG pobre.

Bibliografía

Campbell, J. M. (1992). *Gas Conditioning and Processing* (7th ed., Vol. II). Norman: Campbell Petroleum Series.

Moshfeghian, M. (1 de Julio de 2009). *PetroSkills*. Obtenido de <http://www.jmcampbell.com/tip-of-the-month/2009/07/variation-of-natural-gas-heat-capacity-with-temperature-pressure-and-relative-density/>



Formulario Hyteg

Arnold Salazar, Andres Peña

Código:

E-01

Nombre:

Intercambiador de Calor TEG pobre/ Gas Seco.

Formulas:

Subcódigo:

$$Q_{GAS\ hex} = 10^{-6} m_{leanTEG} C_{p\ leanTEG} (T_{in-leanTEG} - T_{out-leanTEG})$$

E-

01.01

$$T_{out-GAS} = \frac{Q_{GAS\ hex}}{m_{GAS} C_{p\ GAS}} + T_{in-GAS}$$

E-01.02

Nomenclatura y Unidades:

$T_{in-leanTEG}$ [$^{\circ}F$] = Temperatura entrada TEG pobre (temperatura salida bomba TEG).

$T_{out-leanTEG}$ [$^{\circ}F$] = Temperatura salida TEG pobre.

T_{in-GAS} [$^{\circ}F$] = Temperatura entrada gas natural (T. contactor)

$T_{out-GAS}$ [$^{\circ}F$] = Temperatura salida gas natural.

$m_{leanTEG}$ [$\frac{lb}{hr}$] = Flujo másico TEG pobre.

m_{GAS} [$\frac{lb}{hr}$] = Flujo másico gas natural.

$C_{p\ leanTEG}$ [$\frac{BTU}{lb\ ^{\circ}F}$] = Capacidad calorífica promedio TEG pobre.

$C_{p\ GAS}$ [$\frac{MMBTU}{lb\ ^{\circ}F}$] = Capacidad calorífica gas @ temperatura Contactor.

Bibliografía

Manning, F. S. (1991). *Oilfield Processing of Petroleum* (Vol. 1). Tulsa: PennWell Publishing Company.

ANEXO C
Diagramas de Bloques

Diagrama de Bloque de Primer Nivel.

Figura 40. Sistema de Deshidratación de Gas Natural con TEG.

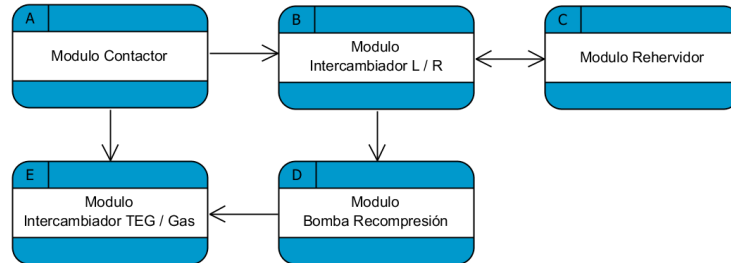
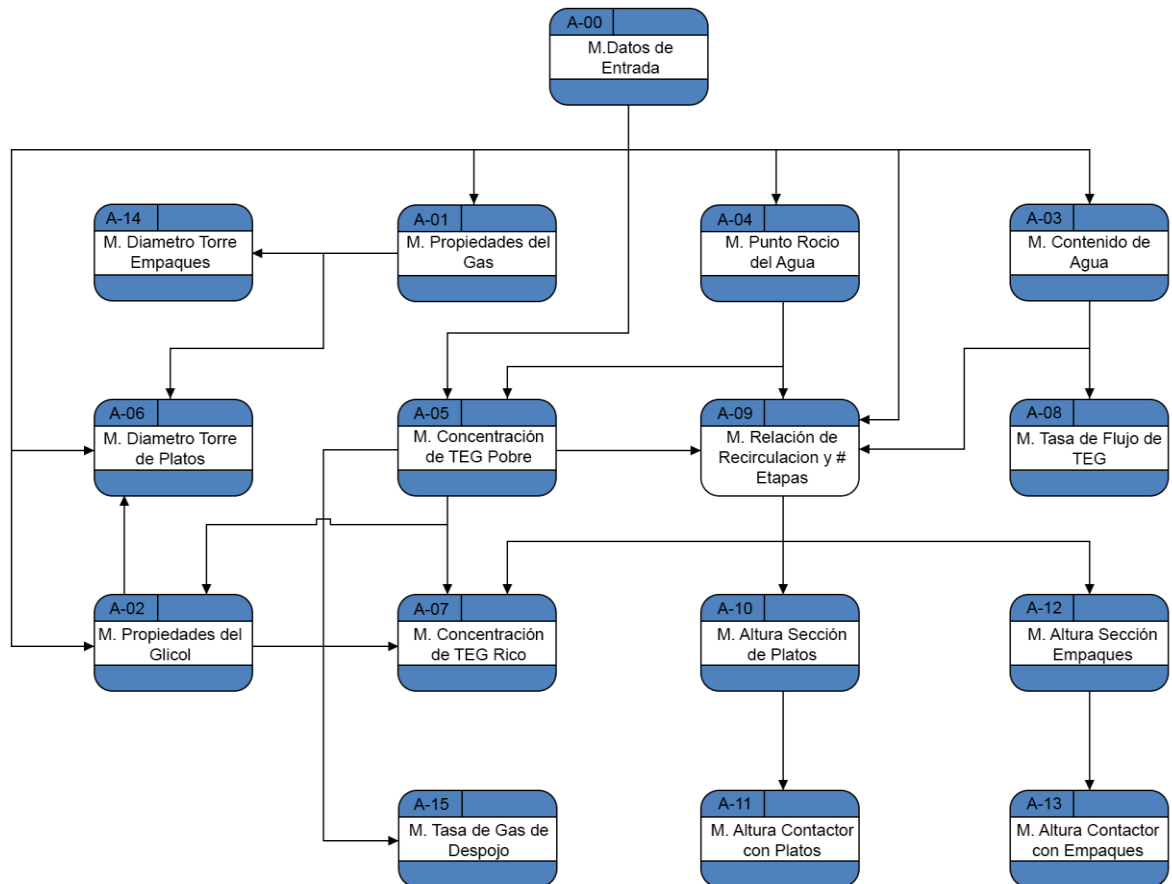


Diagrama de Bloques de Segundo Nivel

Figura 41. Módulos de Cálculo para el Dimensionamiento de la Torre de Absorción.



Diagramas de Bloques de Tercer Nivel

Figura 42. Datos de Entrada.

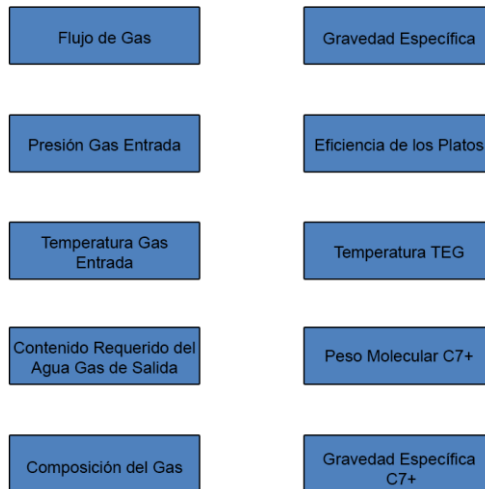


Figura 43. Módulo de Propiedades del Gas Natural

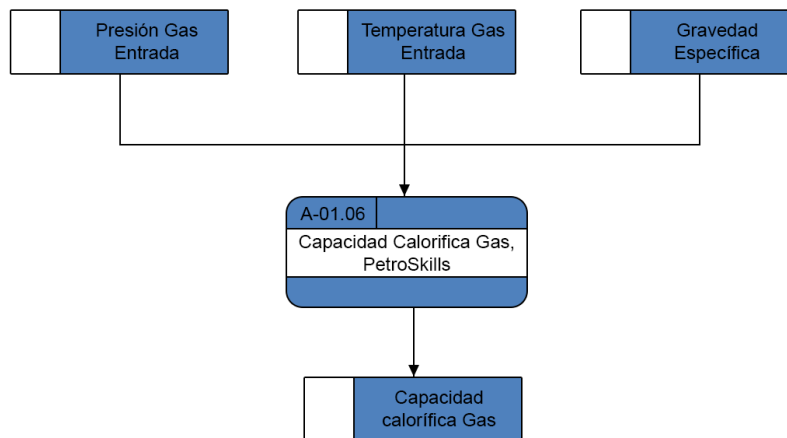


Figura 44. Módulo de Propiedades del Gas Natural

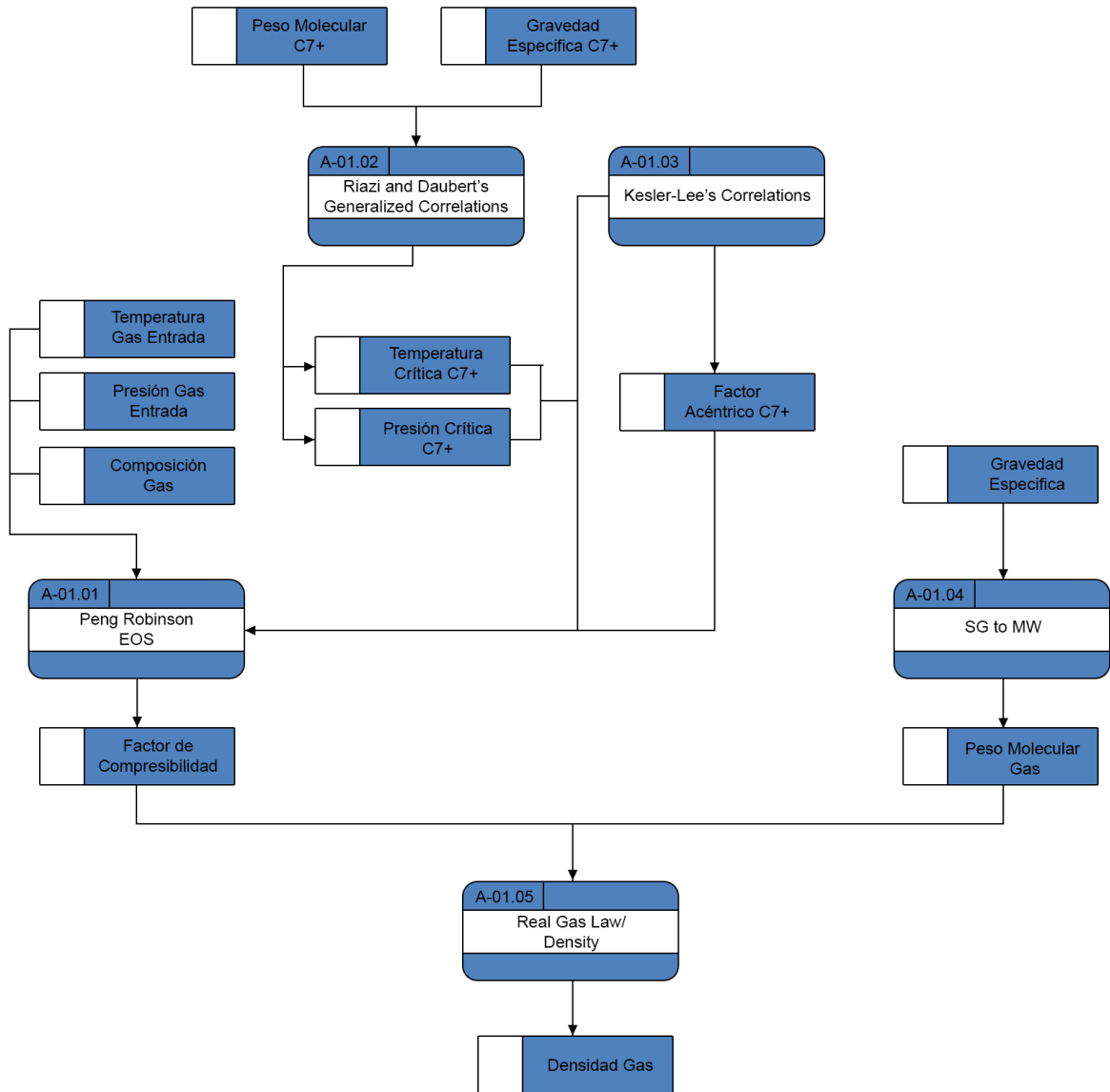


Figura 45. Módulo de Contenido de Agua del Gas.

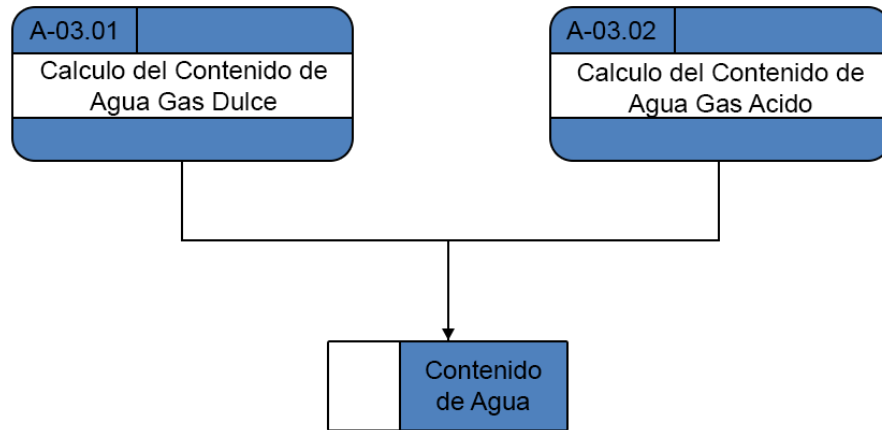


Figura 50. Módulo de Temperatura de Roció de Agua del Gas.

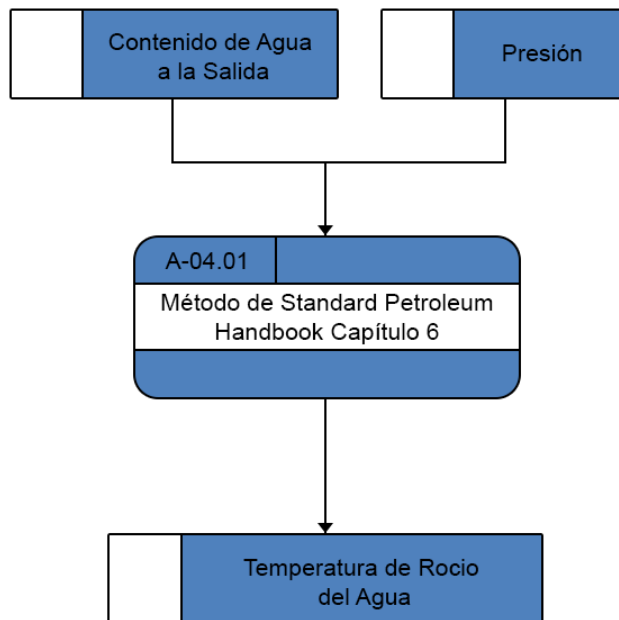


Figura 51. Módulo de Propiedades Físicas de TEG.

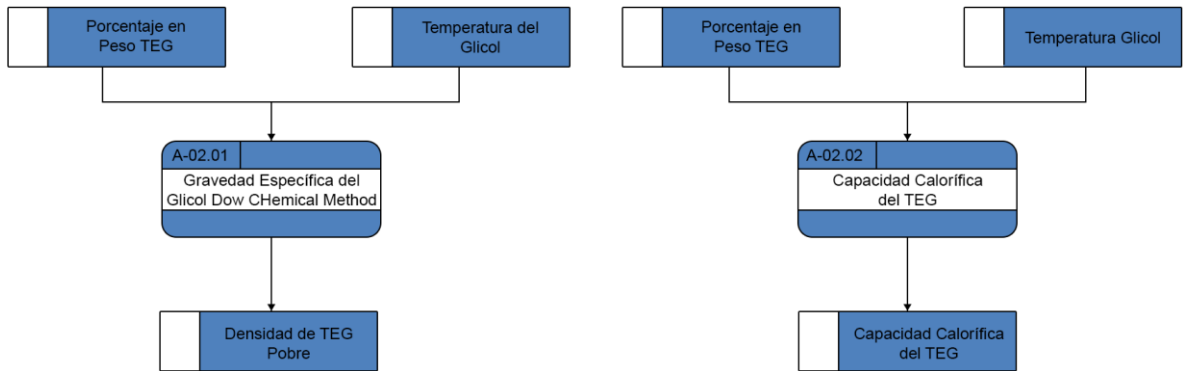


Figura 46. Módulo de Concentración de TEG pobre.

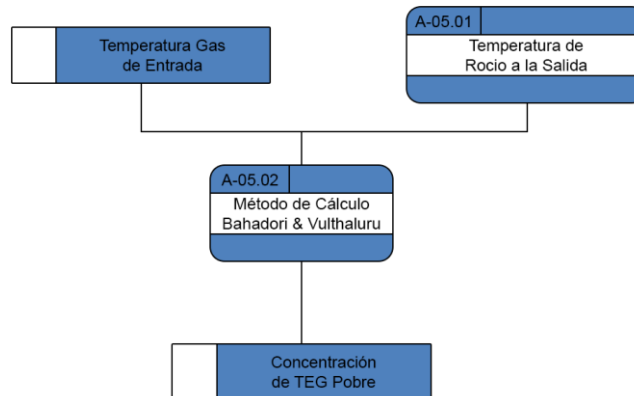


Figura 47. Módulo de Relación de Recirculación TEG y Número de Etapas Teóricas.

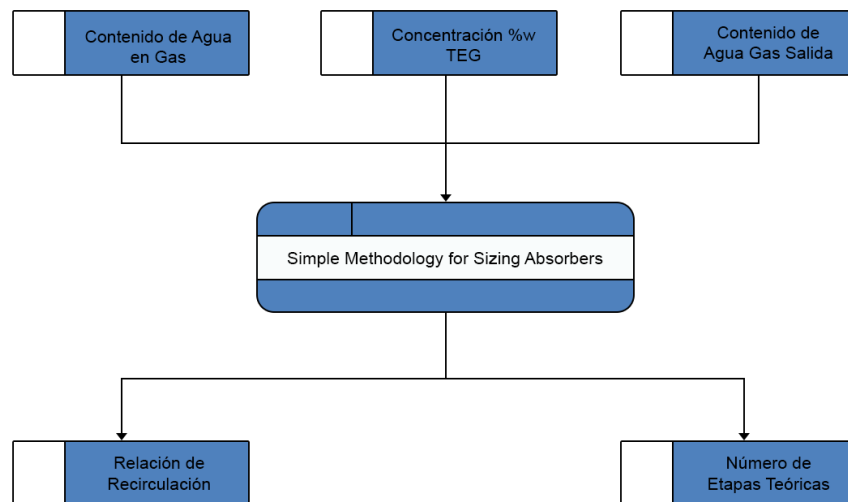


Figura 48. Módulo de Tasa de Circulación de TEG.

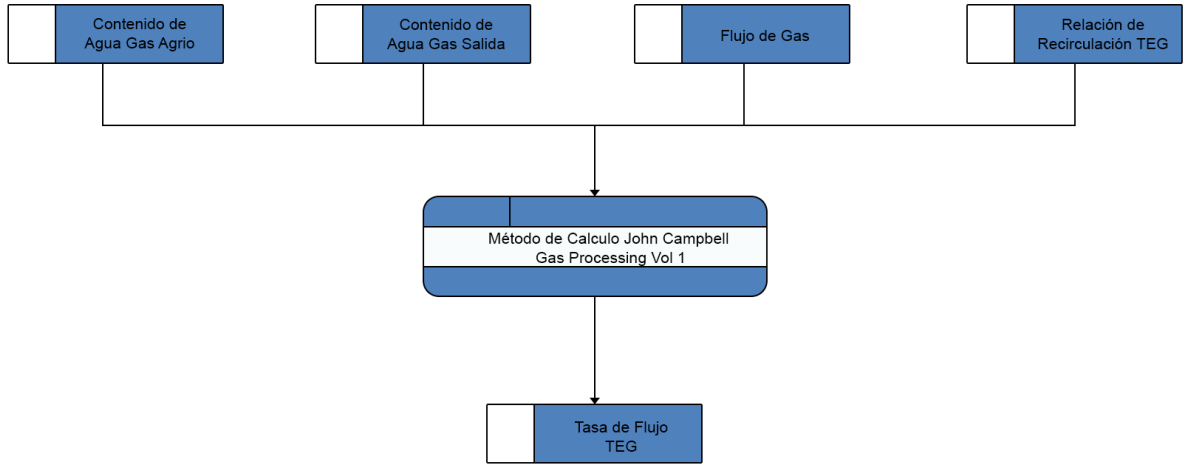


Figura 49. Módulo de Concentración de TEG rico.

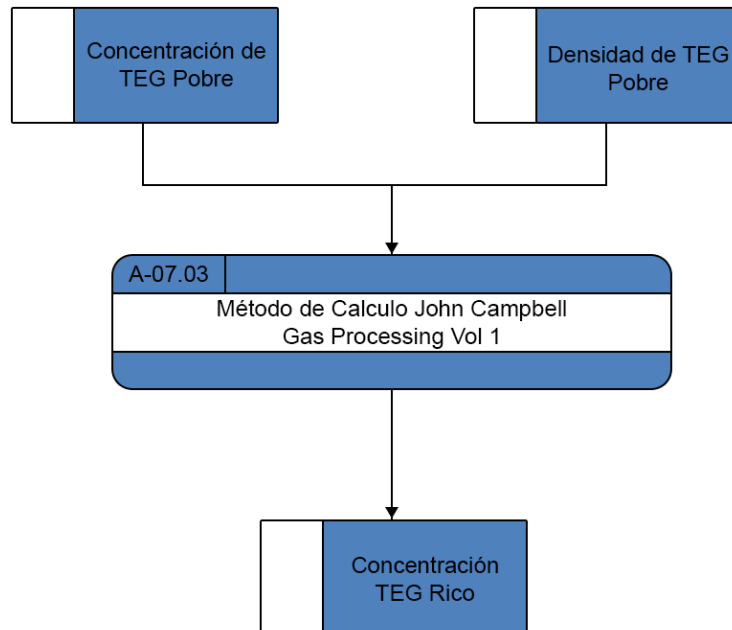


Figura 50. Módulo de Diámetro de la Torre de Platos.

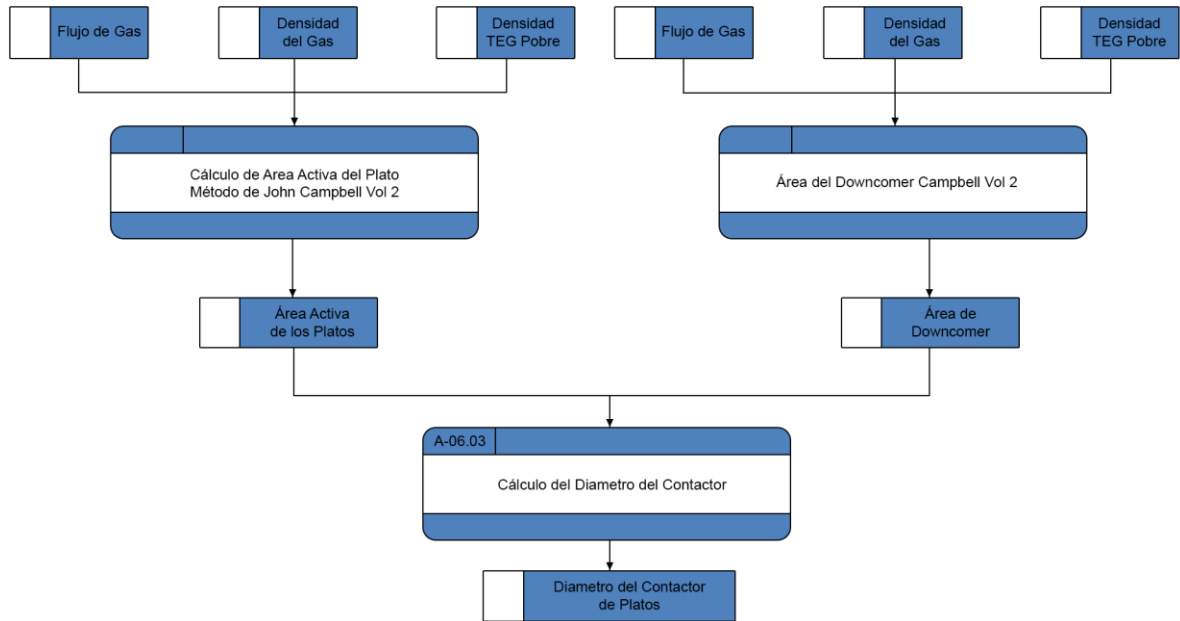


Figura 51. Módulo de la Altura de la Sección de Platos.

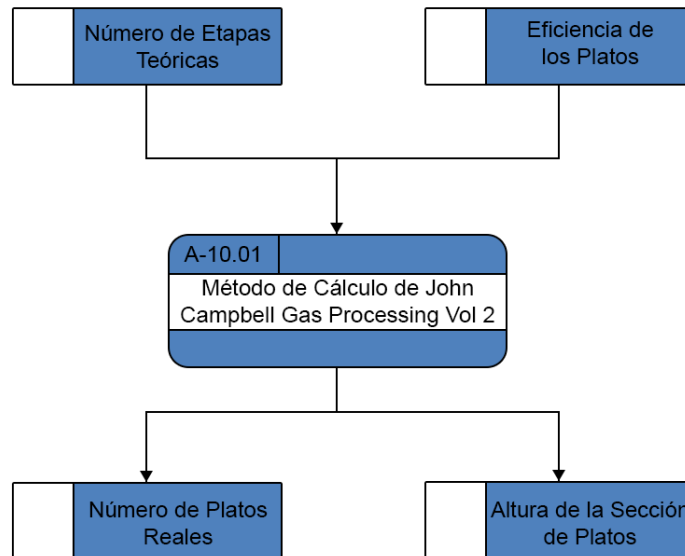


Figura 52. Módulo de Diámetro de la Torre Empacada.

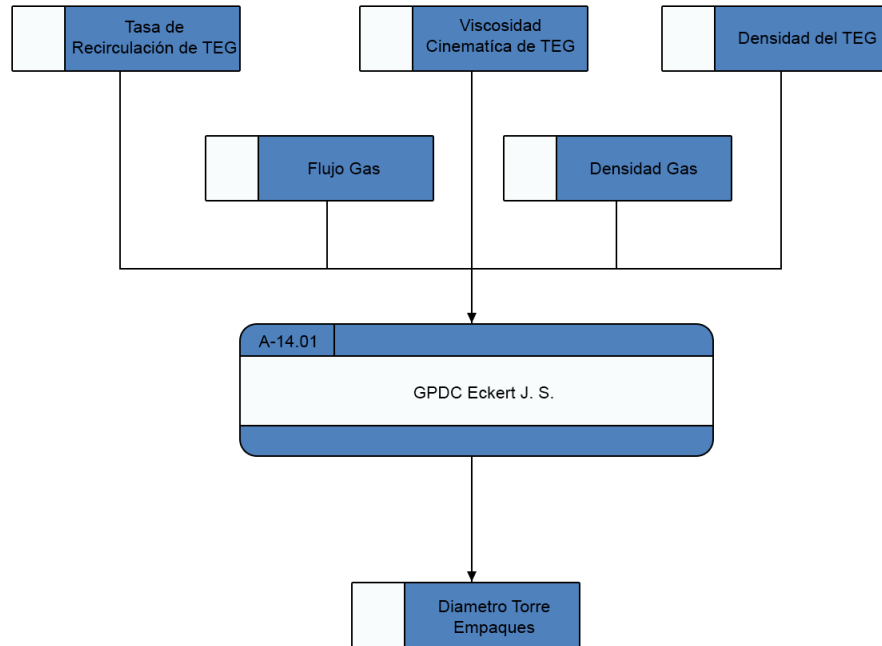
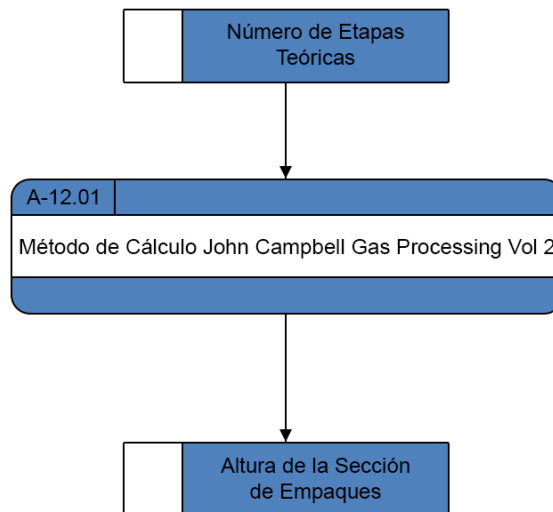


Figura 53. Módulo de Altura de la Sección de Empaques.



ANEXO D
Diagramas de Flujo

Figura 60. Factor de Compresibilidad del Gas Natural.

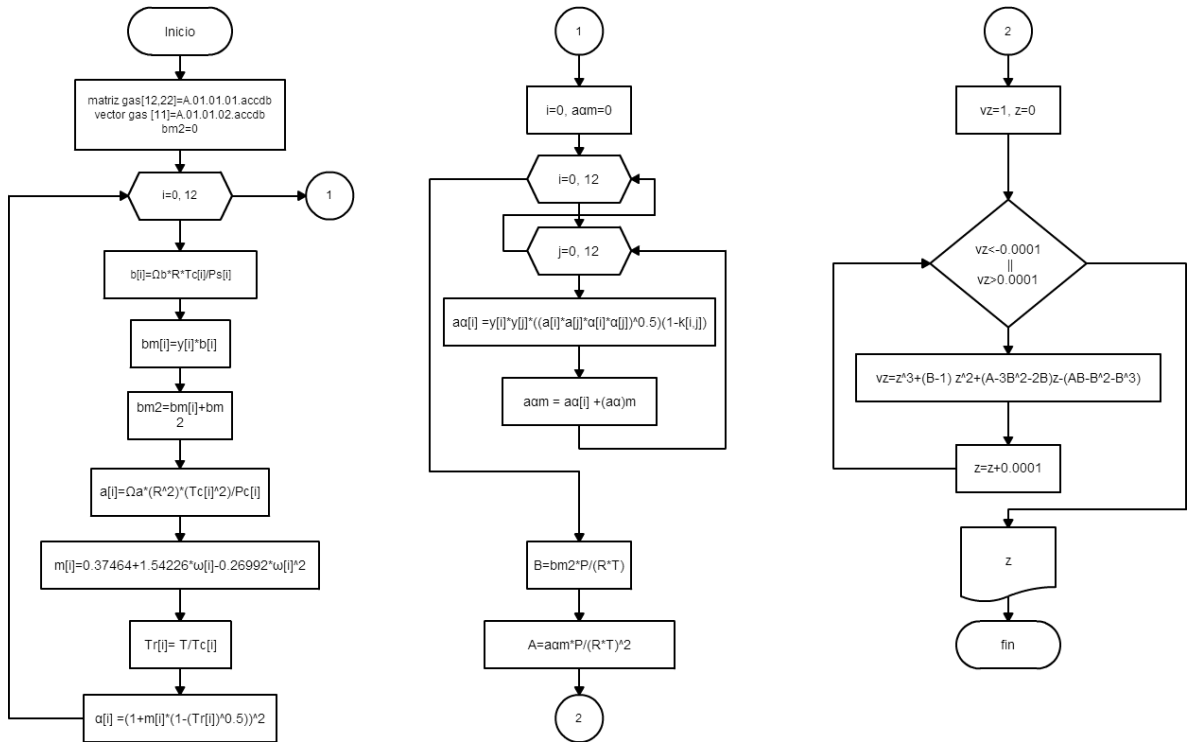


Figura 61. Factor Acéntrico C7+.

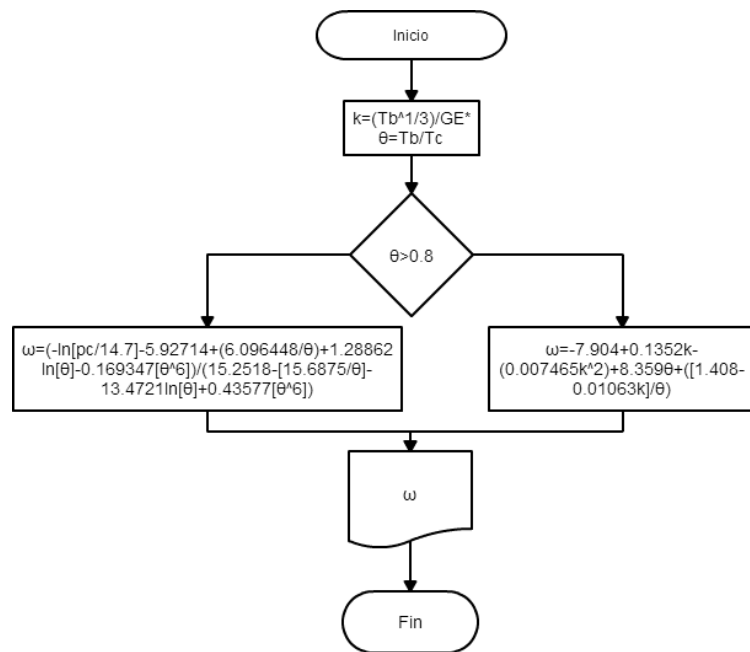


Figura 54. Propiedades Críticas de C7+.

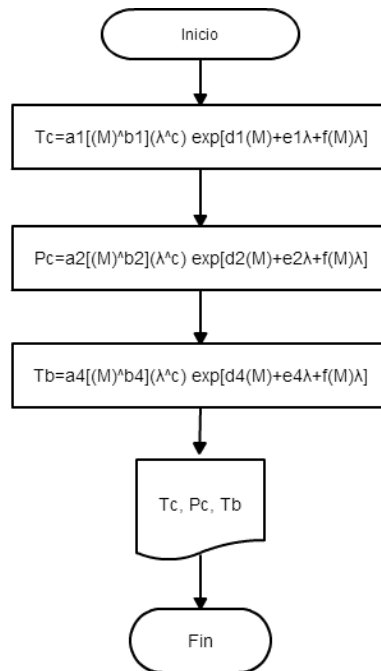


Figura 55. Peso Molecular y Gravedad Especifica del Gas.

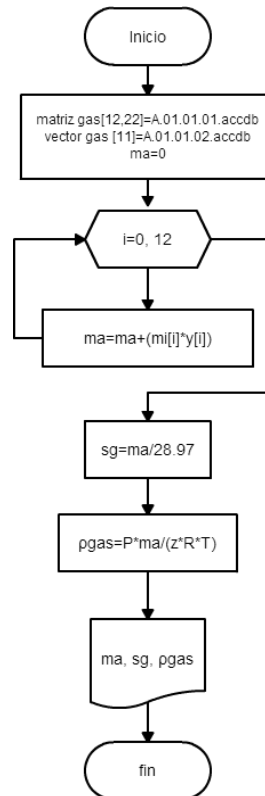


Figura 56. Calor Especifico del Gas.

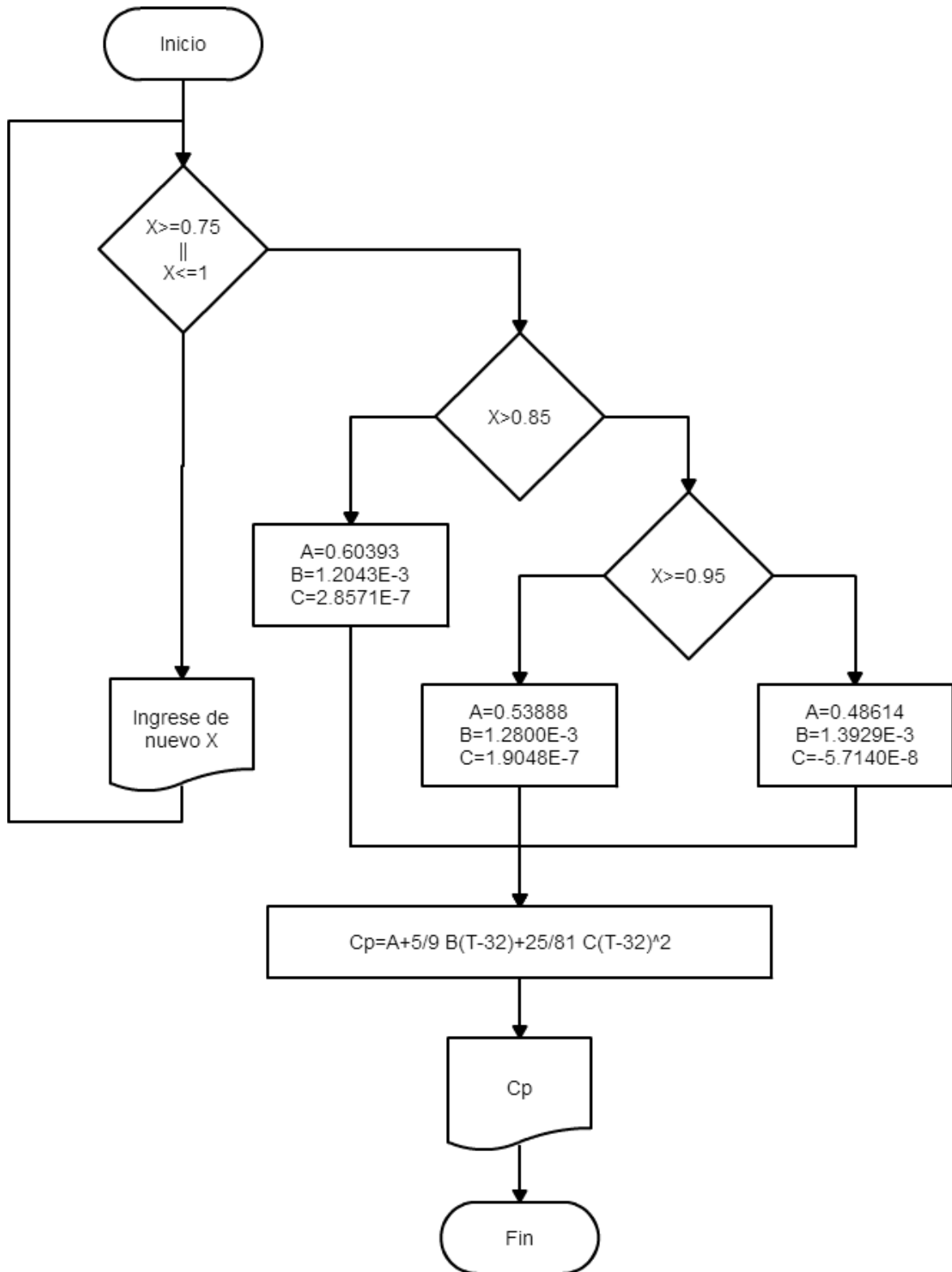


Figura 57. Gravedad Específica TEG.

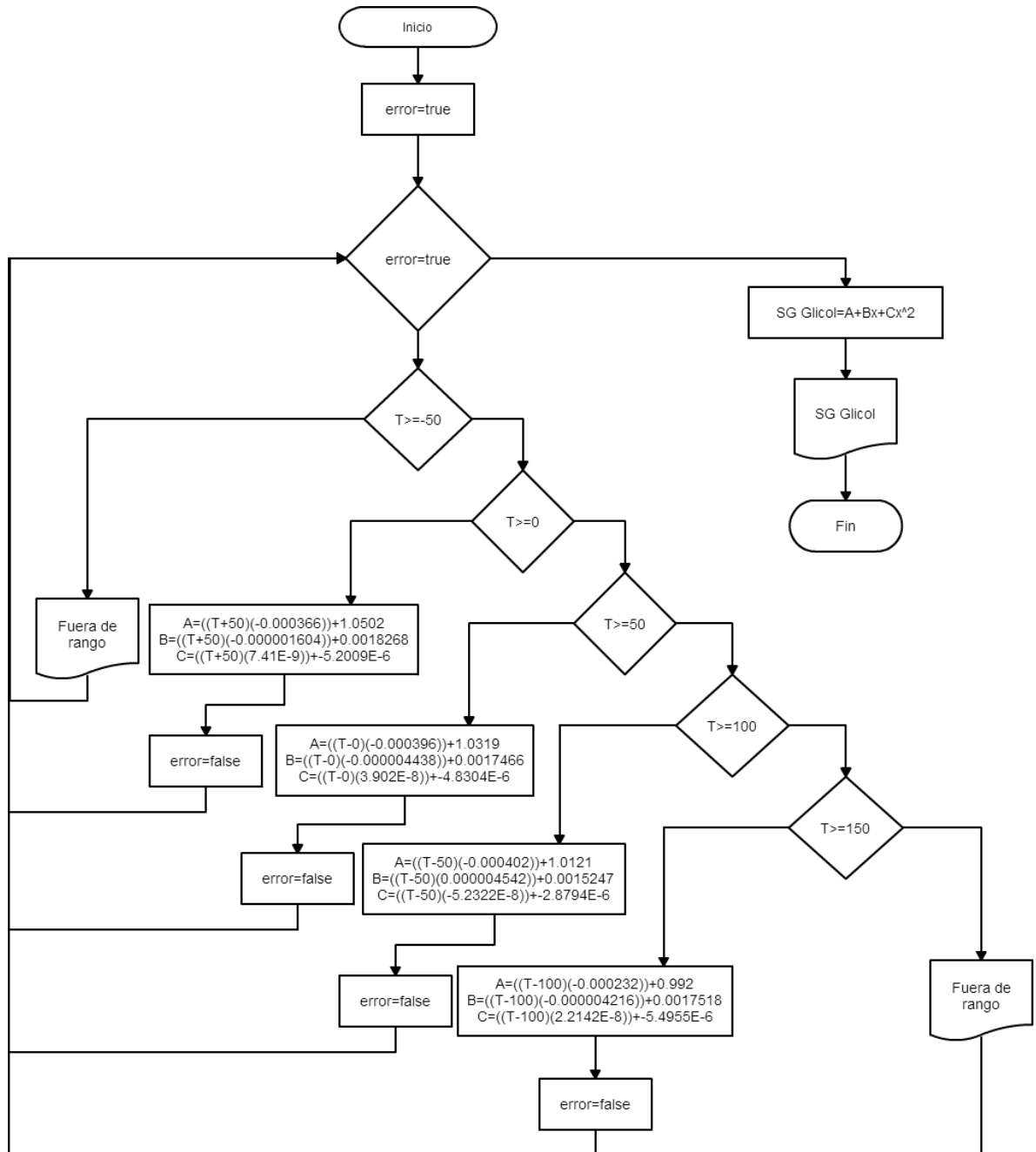


Figura 58. Capacidad Calorífica TEG

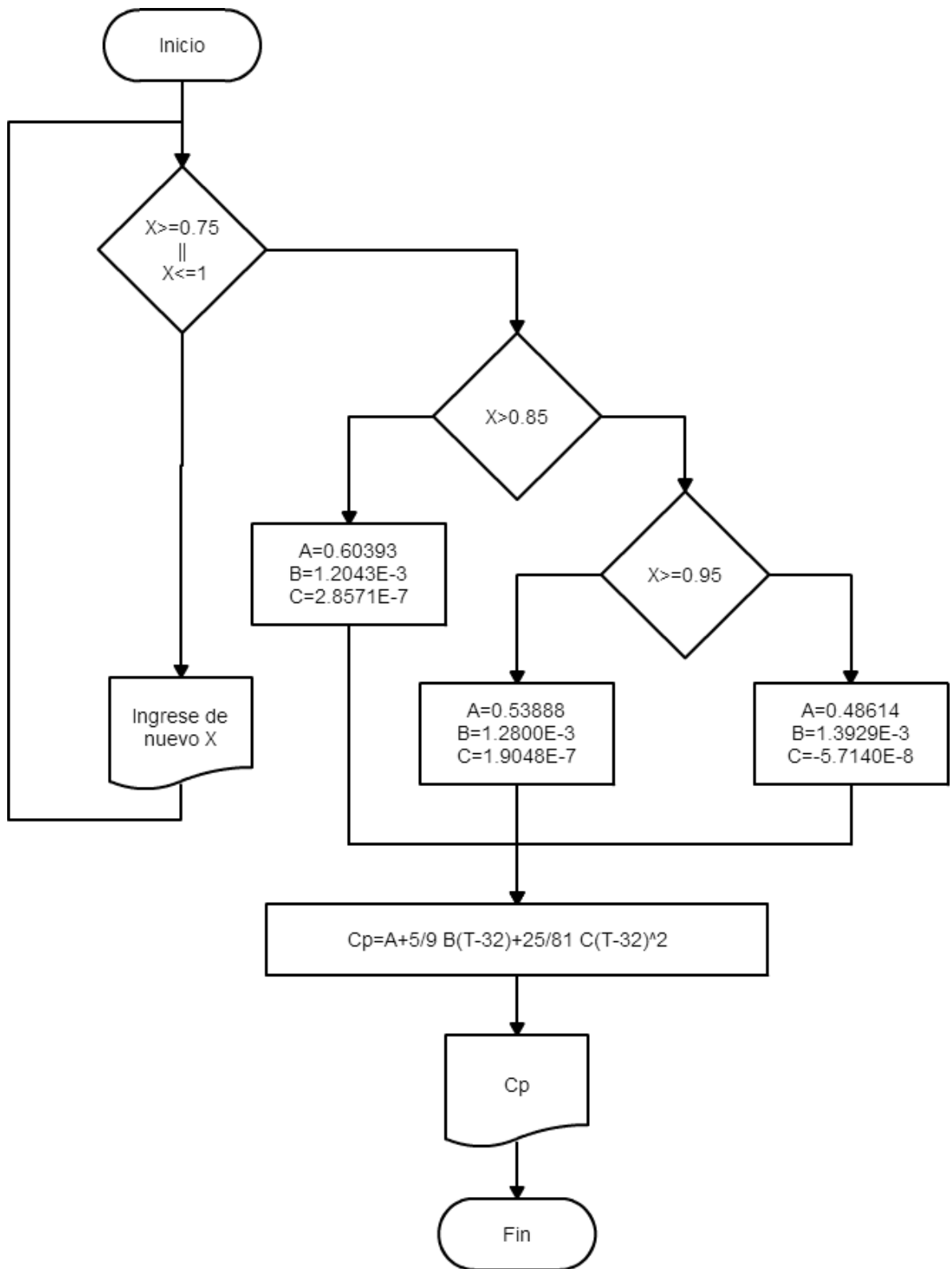


Figura 59. Contenido de Agua de Gas Dulce.

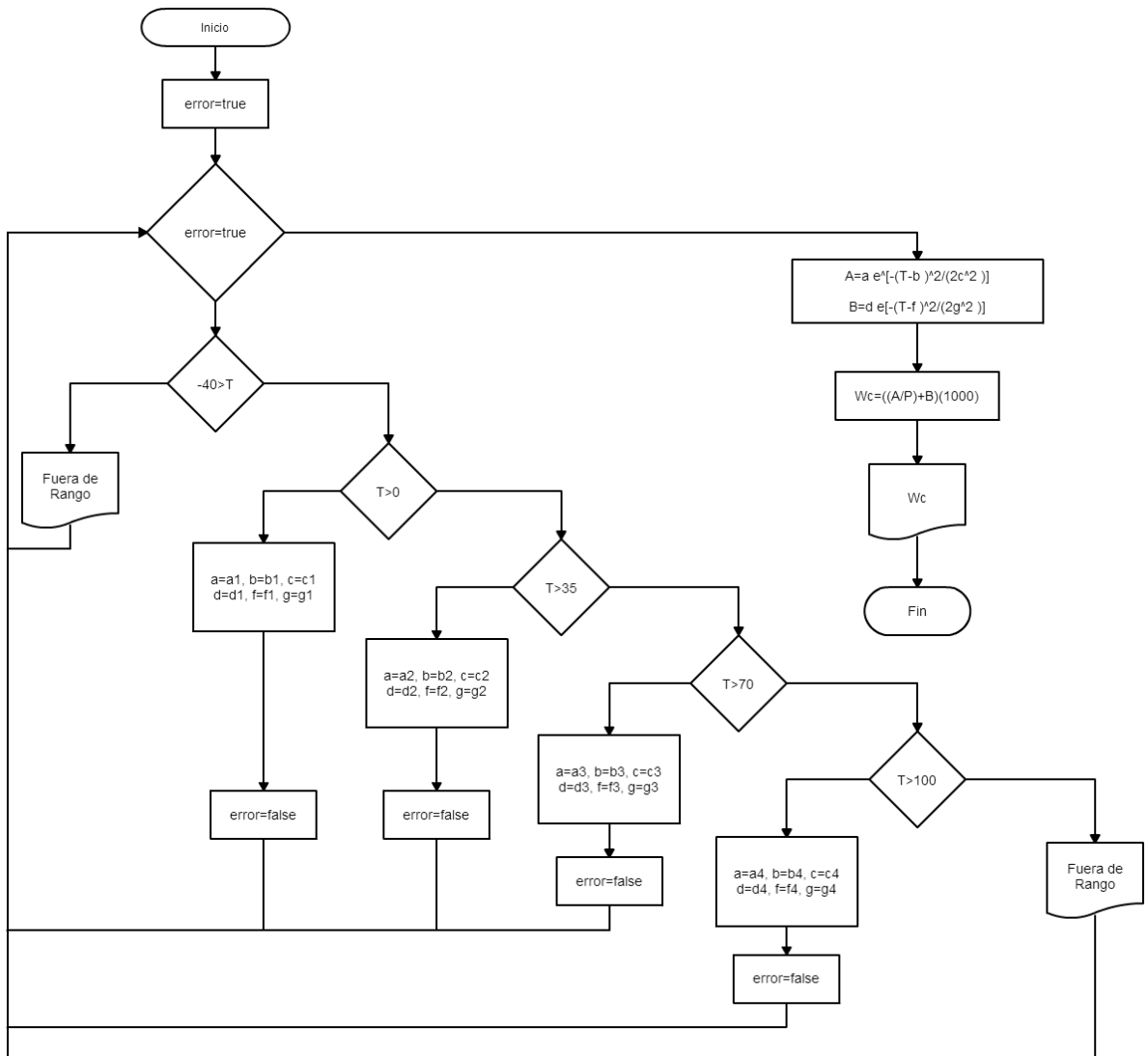


Figura 60. Contenido de Agua de Gas Agrio.

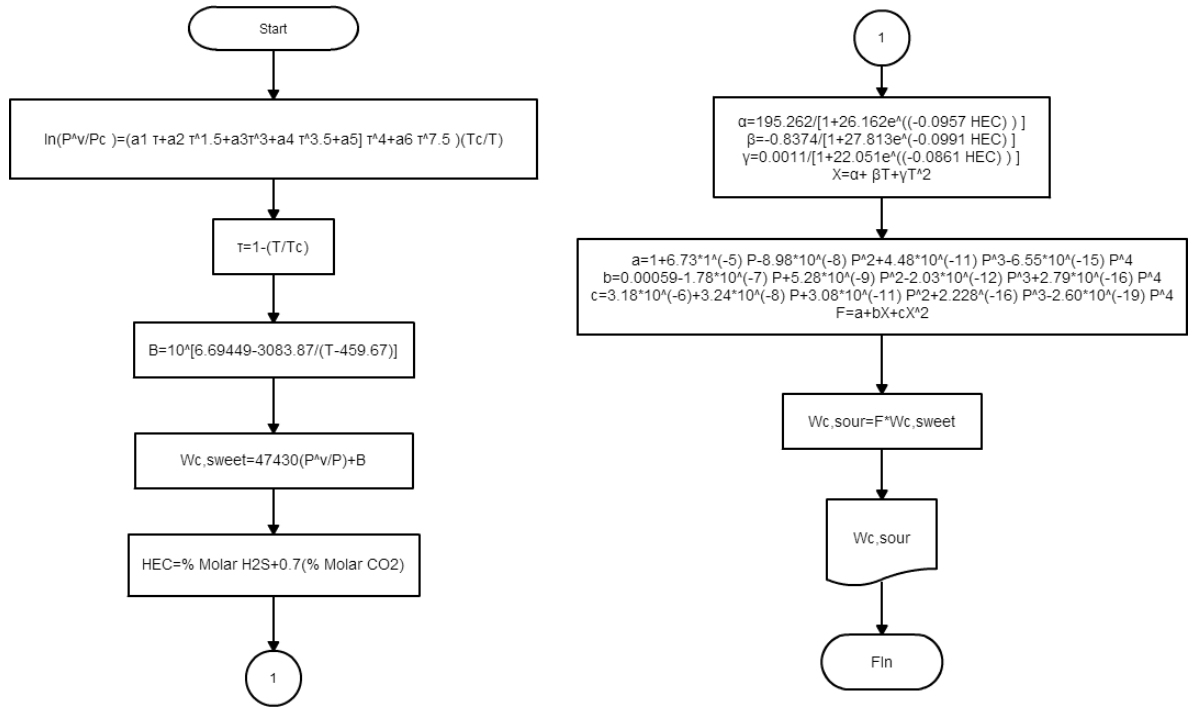


Figura 61. Temperatura de Roció del Agua en el Gas de Salida.

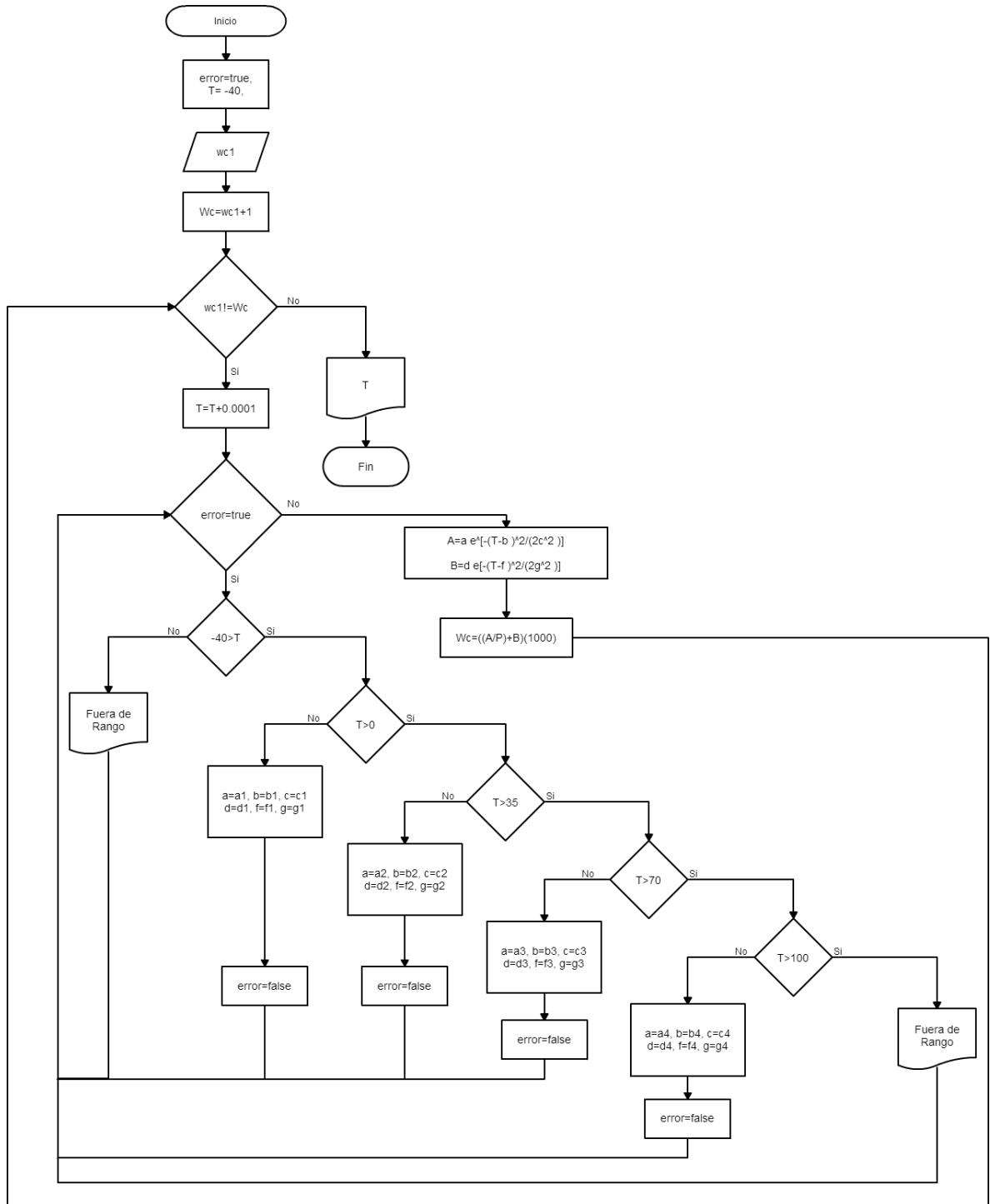


Figura 70. Concentración de TEG pobre.

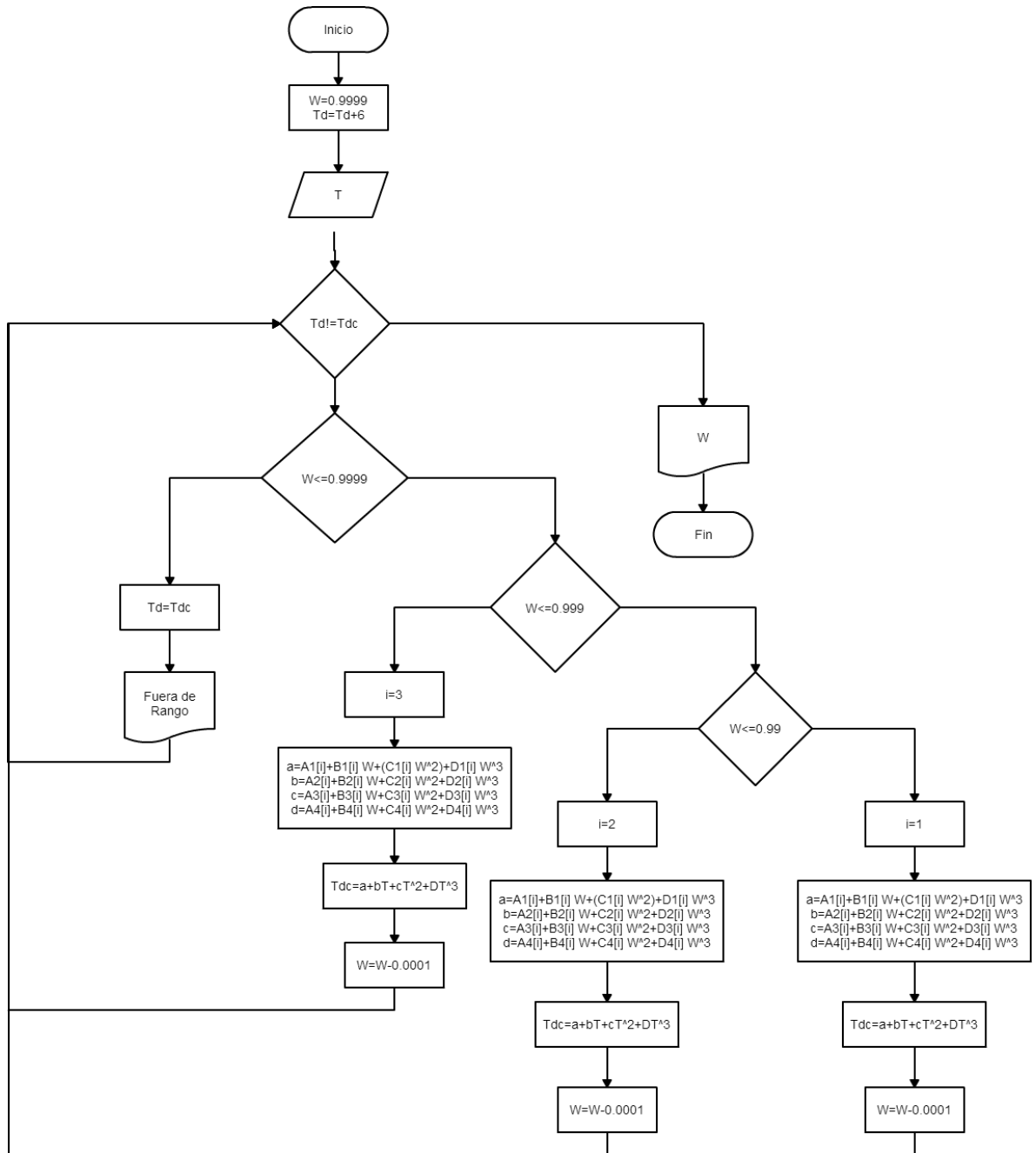


Figura 71. Relación de Recirculación TEG y Número de Etapas Teóricas.

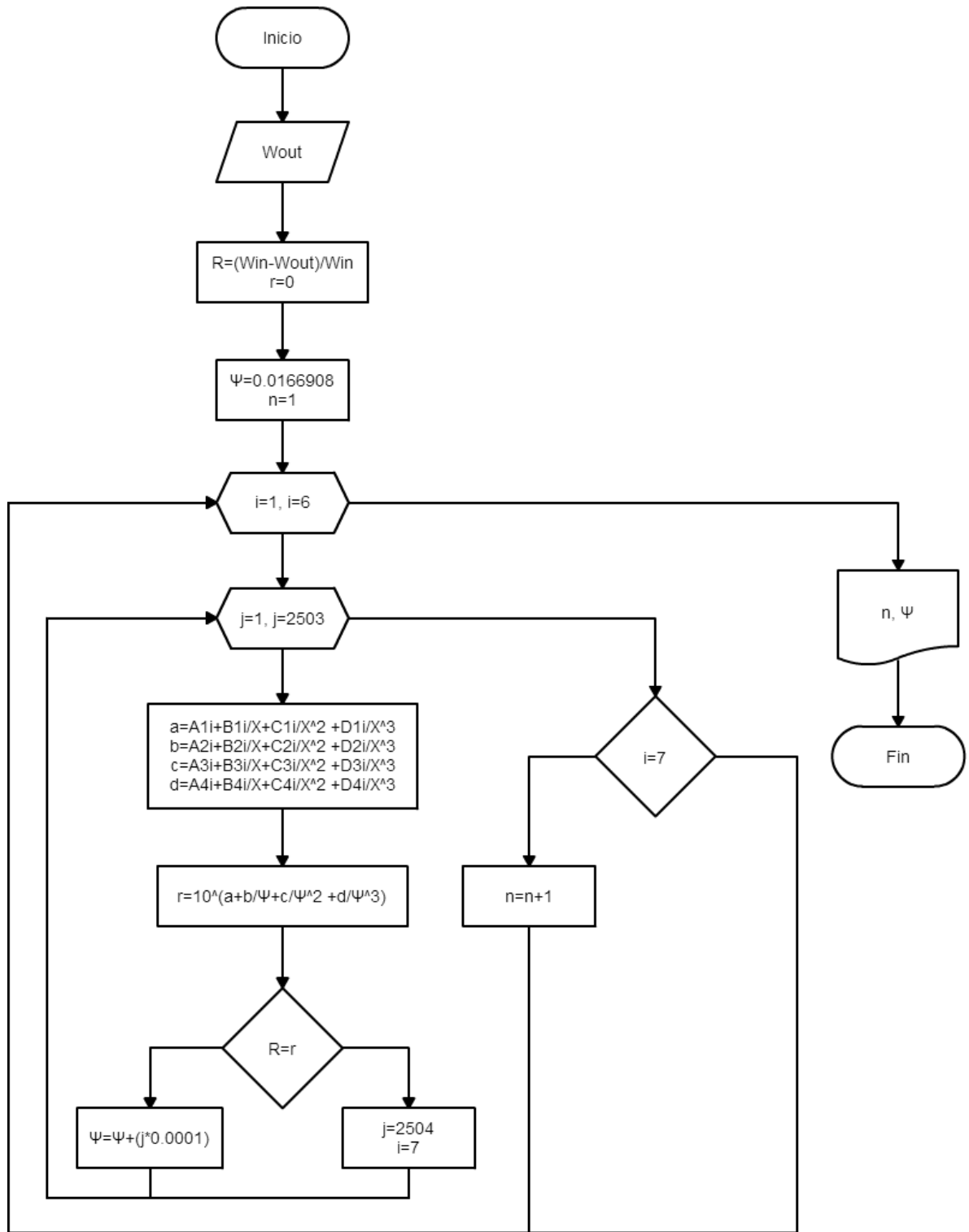


Figura 62. Diámetro de Torre Empacada.

