

DESARROLLO DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA ASISTIR EL DISEÑO Y
SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE GAS NATURAL

PEDRO DAVID PARRA GÓMEZ
YENNY KATHERINE NAVARRO PÉREZ

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

2019

DESARROLLO DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA ASISTIR EL DISEÑO Y
SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE GAS NATURAL

PEDRO DAVID PARRA GÓMEZ
YENNY KATHERINE NAVARRO PÉREZ

Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero(a) de Petróleos

Director
MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCAS
M.sc. en ingeniería química

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

2019

DEDICATORIA

A mi papá por ser un apoyo incondicional durante toda mi vida, por la educación y la crianza, por sus consejos y enseñanzas, y sobre todo por la confianza que siempre ha tenido en mí. –Pedro Parra.

A mi mamá por ser un ejemplo de lucha y “berraquera”, por siempre motivarme a seguir adelante y por todos los esfuerzos que ha hecho para contribuir en mi formación. –Ninfa Gómez.

Especialmente a mis hermanas por ser todo lo que he necesitado en cada momento de mi vida, por ser amigas, madres, confidentes, compañeras de aventuras y por ser un apoyo incondicional en los momentos más difíciles, las amo hermosas. –Angy y Gaby.

A mi más grande motivación, aquellos que hoy me ven como ejemplo y que he visto crecer solo para darme más ganas de salir adelante, los más peques de la casa. –Cami, Andres, Yeiner y Nico.

A mis hermanos de otra madre, “KNOZ” por haber estado conmigo tantos años entre risas y juegos, por su amistad y compañía. –Eduardo, Vladimir y Wilmer.

A la persona que recorrió todo este camino conmigo, compañera de clases, de tesis y de vida; mi amiga y mi amada pareja, la persona con el corazón más bello que pude conocer; gracias por estar siempre conmigo, en la felicidad y en los momentos difíciles, un complemento ideal y una persona espectacular. –K’

Pedro David Parra Gómez

DEDICATORIA

Primero que todo quiero agradecer a Dios por su apoyo fundamental en todos estos años de carrera, por haberme dado el apoyo fundamental, especial y más bonito.

A ti mami, gracias por tu apoyo, tu optimismo, responsabilidad y constancia en todos estos años, por ser esa mujer guerrera y luchadora, y por inculcarme el respeto y el amor en cada proceso que emprendo, mediante esta dedicatoria hablo por las dos, y sé que juntas damos gracias a la venta del pescado, trabajo bendito como siempre me dices, ese que fue tu aliado para sacarme adelante y al que hoy juntas agradecemos, este título más que mío es tuyo madre linda, gracias muchas gracias.

A ti abuelito, hoy no estás conmigo, pero sé que desde el cielo recibes este logro de mi mano, siempre tuviste razón compañero “TODO POR LA VIA LEGAL”. Te amo abue.

Encontré personas maravillosas, que marcaron mi vida y que fueron y son mi apoyo, A ti mi compañero de tesis y mi compañero de vida, gracias por brindarme ese apoyo y fuerza que necesité en muchos momentos, gracias por estar ahí, diciéndome que si podía y que de la mano lo íbamos a lograr; fuiste, eres y serás el regalo más bonito que encontré en esta travesía.

GRACIAS.

Yenny Katherine Navarro Pérez

AGRADECIMIENTOS

A DIOS por darme la oportunidad de culminar satisfactoriamente mi carrera profesional y por darme sabiduría, paciencia y amor en todos estos años de estudio.

Yenny Katherine Navarro Pérez

A nuestra alma máter por su dedicación y compromiso con nosotros en estos años de estudio, por ser nuestra segunda casa y a sus docentes que con paciencia y entusiasmo nos brindaron su conocimiento para que hoy día recibamos el título de Ingenieros de Petróleo.

Al Magister Manuel Enrique Cabarcas, le damos las gracias por su paciencia, responsabilidad y entrega absoluta, guiándonos y apoyándonos en los retos que se presentaron a lo largo de nuestra carrera profesional y nuestro proyecto de grado.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	22
1. OBJETIVOS	24
1.1 OBJETIVO GENERAL	24
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
2. GENERALIDADES DE LOS LIBROS DIGITALES.....	25
2.1 ESTADO DEL ARTE.....	25
2.1.1 ¿Qué es un libro de texto digital?.	26
2.1.2 Investigación de libros digitales.	35
2.1.3 Uso de libros digitales.....	36
2.1.4 Libros de texto en bibliotecas y plataformas digitales.	37
2.1.5 Los libros digitales a nivel económico.....	40
2.2 LIBROS DE TEXTO DIGITALES EN EL CONTEXTO UNIVERSITARIO	45
2.3 FUTURO DE LOS LIBROS DE TEXTO DIGITALES	50
2.4 CARACTERÍSTICAS DEL LIBRO DE TEXTO	55
2.5 EL USO DE LIBROS DE TEXTO DIGITALES	56
2.6 CREACION DE LIBROS DIGITALES	58
3. PROCESOS EN EL TRATAMIENTO DEL GAS	60
3.1 CONTENIDO DE AGUA EN EL GAS NATURAL.....	62
3.1.1 Determinación de la cantidad de agua en el gas natural.	63
3.1.2 Contenido de agua en gases con presencia de compuestos ácidos CO ₂ y H ₂ S.	66
3.1.2.1 Correlación SRK para gases ácidos.	67
3.1.2.2 Razones para medir el contenido de agua en el gas natural	69
3.1.2.3 Desafíos en la medición del contenido de agua en el gas natural.	70
3.1.2.4 Punto de rocío.....	72

3.1.2.5 Conversión del punto de rocío medido a contenido de agua.	74
3.1.3 Hidratos de gas.....	76
3.1.3.1 Inhibición de hidratos.	76
3.2 SISTEMAS DE DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL.....	77
3.2.1 Deshidratación con glicol.	78
3.2.2 Unidad de deshidratación con glicol.	81
3.2.3 Equipos del proceso	86
3.2.3.1 Separador.	87
3.2.3.2 Contactor de glicol.	89
3.2.3.3 Rehervidor.	90
3.2.3.4 Bomba.....	91
3.2.3.5 Filtros.	93
3.2.3.6 Separador Flash.	96
3.2.3.7 Tanque Surge.	96
3.2.3.8 Unidad BTEX	98
3.2.4 Factores básicos de diseño del proceso.	102
3.2.4.1 Gas Stripping.	104
3.2.5 Alternativas de regeneración con TEG	108
3.2.5.1 Proceso DRIZO.....	108
3.2.5.2 Proceso Coldfinger	109
3.2.6 Problemas operativos.	110
3.2.6.1 Espumas.....	111
3.2.6.2 Degradación.....	111
3.2.6.3 Sal.....	111
3.2.6.4 Corrosión- Erosión.	112
3.3 DESHIDRATACIÓN POR ADSORCIÓN.....	113
3.3.1 Desecantes comerciales.	115
3.3.2 Selección del desecante.	118
3.3.3 Sistema básico de desecante	120
3.3.4 Naturaleza de la adsorción.	126

3.3.5 Capacidad del desecante.....	127
3.4 ENDULZAMIENTO DEL GAS NATURAL	130
3.4.1 Descripción general y métodos utilizados.	131
3.4.2 Proceso de endulzamiento quimio-sorción (aminas).	133
3.4.3 Características de las aminas.	137
3.4.3.1 Metildietanolamina (MDEA).	138
3.4.3.2 Sistemas de monoetanolamina (MEA).....	138
3.4.3.3 Sistemas de Dietanolamina (DEA).....	141
3.4.3.4 Sistemas DIGLICOLAMINA® (DGA).....	142
3.4.3.5 Sistemas de Metildietanolamina (MDEA).....	143
3.4.4 Proceso de permeación de gas: membranas.....	144
3.4.5 Permeación de membrana.....	145
3.4.5.1 Parámetros importantes al seleccionar una membrana	145
3.4.5.2 Estructura de membrana asimétrica	146
3.4.5.3 Estructura de membrana compuesta.	147
3.4.5.4 Elementos de una membrana.	148
3.4.5.5 Consideraciones principales de diseño de membranas	150
4. CASOS DE ESTUDIO Y SIMULACIONES	153
4.1 DESHIDRATACIÓN CON GLICOL	153
4.1.1 Diseño, simulación y comparación cuantitativa y cualitativa de una planta de deshidratación operando con Trietilenglicol vs Tetraetilenglicol.	153
4.1.2 Parámetros operacionales para el diseño de la planta de deshidratación con TEG y TREG.....	154
4.1.3 Dimensionamiento de los equipos utilizados en el proceso.	158
4.1.3.1 Separador.	158
4.1.3.2 Contactor de glicol	162
4.1.3.3B Rehervidor	167
4.1.3.4 Bomba.....	169
4.1.3.5 Intercambiador de calor.	169
4.1.3.6 Calentador	170

4.1.4 Balance de masa y energía en planta de deshidratación con TEG composición gas Guajira	171
4.1.4.1 Balance de masa	171
4.1.4.2 Balance de energía	171
4.2 ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE LA PLANTA DE DESHIDRATACIÓN OPERANDO CON TEG, COMPOSICIÓN GAS GUAJIRA	172
4.2.1 Análisis comparativo de usar tetraetilenglicol en plantas de deshidratación de gas vs trietilenglicol con gas de composición pesada (composición extendida gas Guajira)	181
4.3 ENDULZAMIENTO CON AMINAS.....	193
4.3.1 Parámetros operacionales para el diseño de una planta de endulzamiento con dietanolamina.....	193
4.3.2 Dimensionamiento de los equipos más importantes durante el proceso	197
4.4 CONTENIDO DE AGUA E INHIBICIÓN DE HIDRATOS	209
4.4.1 Parámetros operacionales	210
4.4.2 Planta de inhibición de hidratos con etilenglicol (MEG)	214
5. CONCLUSIONES	221
6. RECOMENDACIONES	222
BIBLIOGRAFÍA.....	223

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Principales características de los libros digitales	28
Tabla 2. Características de libros de texto digital en común con los libros de texto de papel	29
Tabla 3. Características únicas de los libros digitales 1.....	30
Tabla 4. Características únicas de los libros digitales 2.....	31
Tabla 5. Crecimiento de ventas de libros digitales en España.....	42
Tabla 6. Mercado de libros digitales Vs Libros convencionales	44
Tabla 7. Comparación de libros digitales Vs libros físicos	52
Tabla 8. Especificaciones de calidad del gas natural.....	61
Tabla 9. Máximo diámetro de moléculas adsorbidas	116
Tabla 10. Características básicas de tamices moleculares	118
Tabla 11. Puntos de rocío en desecantes.....	119
Tabla 12. % en peso de pérdidas de capacidad del desecante	129
Tabla 13. Cromatografía Gas guajira - PROMIGAS	155
Tabla 14. Cromatografía extendida del Gas guajira.....	156
Tabla 15. Parámetros de diseño del separador	159
Tabla 16. Tiempos de retención según API	162
Tabla 17. Datos de diseño del contactor.....	165
Tabla 18. Datos de configuración estructural de un contactor	167
Tabla 19. Diseño del condensador y rehervidor.....	168
Tabla 20. Parámetros operativos de las bombas del proceso	169
Tabla 21. Parámetros de diseño del intercambiador de calor	170
Tabla 22. Parámetros del diseño del calentador.....	171
Tabla 23. Balance de masa de la planta de deshidratación con glicol.....	171
Tabla 24. Composición del gas de venta	172

Tabla 25. Cantidad de agua removida del gas natural.....	174
Tabla 26. Datos de caso de estudio gas stripping	177
Tabla 27. Datos de caso de estudio de Temperatura del rehervidor	179
Tabla 28. Comparación del proceso de absorción de agua TEG Vs TREG	182
Tabla 29. Tasa de gas stripping.....	190
Tabla 30. Tasas de Gas stripping, tarimas de análisis en plantas de deshidratación con TEG.....	190
Tabla 31. Composición de gas ácido	194
Tabla 32. Principales propiedades de las aminas.....	194
Tabla 33. Cálculos de contenido de agua.....	203
Tabla 34. Tabla regeneración de DEA.....	205
Tabla 35. composición del gas húmedo.....	210
Tabla 36. Propiedades del C7+	211
Tabla 37. Temperatura de formación de hidratos	213
Tabla 38. Comparación entre Metanol y Etilenglicol	220

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. %Ventas de libros digitales en EEUU	42
Figura 2. Factores que influncian la venta de libros digitales.....	43
Figura 3. Resultados de los métodos de estudio usados en la UIS	50
Figura 4. Problemas asociados al contenido de agua en el gas	61
Figura 5. Contenido de agua por presencia de CO ₂	68
Figura 6. Contenido de agua por presencia de H ₂ S.....	68
Figura 7. Relación de contenido de agua para un gas acido	69
Figura 8. Variación del punto de rocío de hidrocarburos y agua con el cambio de presión	74
Figura 9. Unidad de deshidratación con glicol	83
Figura 10. Sistema de deshidratación de glicol en 3D	86
Figura 11. Separador horizontal.....	89
Figura 12. Contactor de glicol	90
Figura 13. Rehervidor	91
Figura 14. Bomba booster	91
Figura 15. Intercambiador de calor	92
Figura 16. Filtro de solidos.....	95
Figura 17. Filtros de carbón activado.....	95
Figura 18. Separador flash	96
Figura 19. Tanque de surgencia	97
Figura 20. Unidad BTEX	98
Figura 21. Absorción aproximada de BTEX en el TEG.....	101
Figura 22. Absorción aproximada de BTEX en el TEG.....	101
Figura 23. Proceso de gas stripping	104
Figura 24. DRIZO.....	108

Figura 25. COLDFINGER	109
Figura 26. Unidad de deshidratación de dos torres con desecante	120
Figura 27. Unidad de adsorción de tres torres	123
Figura 28. Planta de adsorción de tres torres	124
Figura 29. Transición del lecho en el proceso de adsorción	126
Figura 30. Capacidad del gel de sílice en función del tiempo en servicio	128
Figura 31. Proceso de endulzamiento del gas natural	132
Figura 32. Remoción de componentes ácidos del gas natural	133
Figura 33. Planta de endulzamiento de gas natural	135
Figura 34. Estructura de membrana asimétrica	147
Figura 35. Estructura de membrana compuesta	148
Figura 36. Punto de rocío en equilibrio del agua Vs Temperatura a varias concentraciones de TEG	166

LISTA DE ESQUEMAS

	Pág.
Esquema 1. Simulación de planta de deshidratación con glicol	157
Esquema 2. Sistema de separación en una planta de deshidratación.....	¡Error!
Marcador no definido.	
Esquema 3. . Parámetros obtenidos del software de diseño para el separador .	161
Esquema 4. Sistema del contactor de glicol	163
Esquema 5. Parámetros obtenidos del software de diseño para el contactor	163
Esquema 6. Sistema del rehervidor en el proceso de regeneración.....	167
Esquema 7. Datos de diseño del rehervidor	168
Esquema 8. Sistemas de bombas en la planta de deshidratación con glicol.....	169
Esquema 9. Sistema del equipo de calentamiento	170
Esquema 10. Análisis paramétrico de planta de deshidratación con Trietilenglicol	173
Esquema 11. Caso de estudio Contenido de agua del gas de venta Vs Tasa de flujo de TEG	176
Esquema 12.Caso de estudio contenido de agua del gas de venta Vs tasa de gas stripping	178
Esquema 13. Caso de estudio pureza (Concentración) de TEG Vs Temperatura del rehervidor	180
Esquema 14. Análisis paramétrico de planta de deshidratación con Tetraetilenglicol.....	181
Esquema 15.Envolvente de gas de salida utilizando TREG como solvente de absorción	186
Esquema 16. Envolvente del gas de entrada a la planta de glicol utilizando solvente TEG y TREG.	¡Error! Marcador no definido.

Esquema 17. Envolverte de gas de salida utilizando TEG como solvente de absorción	185
Esquema 18. Equipos adicionales en planta de deshidratación con TREG	188
Esquema 19. Caso de estudio tasa de gas stripping Vs Contenido de agua en el gas de salida.....	191
Esquema 20. Planta de endulzamiento de gas natural con DEA como solvente químico	196
Esquema 21. Parámetros de diseño de contactor	197
Esquema 22. Perfil de temperatura en el contactor	198
Esquema 23. Perfil de presión en el contactor	199
Esquema 24. Composición del gas de salida	200
Esquema 25. Perfil de concentración de CO ₂ en el contactor	201
Esquema 26. Perfil de concentración de H ₂ S en el contactor.....	202
Esquema 27. Parámetros de diseño del rehervidor	204
Esquema 28. Perfil de concentración de CO ₂ en la solución de amina en la torre regeneradora	204
Esquema 29. Perfil de temperatura del rehervidor.....	205
Esquema 30. Análisis de variables operativas.....	206
Esquema 31. Tasa de circulación de DEA Vs composición ácida en el gas natural	208
Esquema 32. Tasa de flujo de gas de entrada Vs composición ácida del gas de salida	209
Esquema 33. Características de la corriente de entrada	212
Esquema 34. Tasa de inhibición con Etilenglicol	215
Esquema 35. Planta de inhibición de hidratos con Etilenglicol (MEG).....	216
Esquema 36. Temperatura de formación de hidratos con Etilenglicol	217
Esquema 37. Temperatura de formación de hidratos con Metanol.....	219
Esquema 38. Comparación entre Metanol y Etilenglicol.....	220

ANEXOS

Los anexos están adjuntos en el CD y pueden visualizarlos en base de datos de la biblioteca UIS.

Anexo A. En este anexo, se encuentran los libros digitales enfocados en los temas de Tratamiento de gas natural, tales como, contenido de agua, deshidratación y endulzamiento, en formato PDF.

Anexo B. Se puede acceder a una compilación de simulaciones y casos de estudio realizados con el fin de analizar y optimizar las variables operacionales de un sistema de tratamiento de gas natural en formato para ASPEN HYSYS, sin embargo, en el cuarto objetivo del presente libro Pag. (127-181) se encuentran los casos de estudio explicados detalladamente.

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE MATERIAL DIDACTICO BAJO LA MODALIDAD DE TEXTOS DIGITALES PARA ASISTIR EL DISEÑO Y SIMULACION DE LOS PROESOS DE TRATAMIENTO DE GAS NATURAL*

AUTORES: PEDRO DAVID PARRA GOMEZ
YENNY KATHERINE NAVARRO PEREZ**

PALABRAS CLAVES: Libros digitales, tratamiento de gas natural, simulación de procesos.

DESCRIPCION

Este proyecto pretende desarrollar un libro didáctico enfocado en el entorno conceptual, diseño y dinamismo de plantas de tratamiento de gas y finalmente en la ejecución de casos de estudio directamente relacionados con el proceso operativo, todo lo anterior, tomando como base información bibliográfica disponible relacionada con el tema y diseño esquemático y exclusivo con gráficas, tablas e imágenes que evidencien el proceso real de cualquier sistema, orientando y encaminando al aprendiz a seguir un recorrido efectivo a lo largo de la planta de tratamiento, todo esto, con el fin de que los estudiantes puedan aprender con mayor facilidad y obtener información más exacta, puntual y práctica.

De igual forma, los casos de estudio se desarrollarán para cada tema relacionado con tratamiento de gas natural enfocándose principalmente en optimización de procesos y resolución de problemas que pueden estar presentes a lo largo del desarrollo operativo. Estos casos serán orientados a dos tipos principales de tratamiento de gas, tales como, deshidratación del gas natural utilizando como solvente de absorción el glicol y endulzamiento de gas utilizando como solventes aminas.

Finalmente, los resultados serán evidenciados en cuatro libros digitales correspondientes a cada uno de los temas de tratamiento de gas en los cuales estará recopilada la información pertinente a cada tema.

* Trabajo de grado

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

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF DIDACTIC MATERIAL UNDER THE MODE OF DIGITAL TEXTS TO ASSIST THE DESIGN AND SIMULATION OF THE PROCESSES OF NATURAL GAS TREATMENT*

AUTHORS: PEDRO DAVID PARRA GOMEZ
YENNY KATHERINE NAVARRO PEREZ**

KEYWORDS: Digital books, natural gas treatment, process simulation.

DESCRIPTION

This project aims to develop a didactic book focused on the conceptual environment, design and dynamism of gas treatment plants and finally on the execution of case studies directly related to the operational process, all of the above, based on available bibliographic information related to the theme and schematic and exclusive design with graphs, tables and images that demonstrate the real process of any system, guiding and directing the apprentice to follow an effective route along the treatment plant, all this, in order that the Students can learn more easily and obtain more accurate, timely and practical information.

Similarly, the case studies will be developed for each topic related to natural gas treatment focusing mainly on process optimization and problem solving that may be present throughout the operational development. These cases will be oriented to two main types of gas treatment, such as natural gas dehydration using glycol as an absorption solvent and gas sweetening using amines as solvents.

Finally, the results will be evidenced in four digital books corresponding to each of the gas treatment topics in which the information relevant to each topic will be collected.

* Bachelor Thesis

** Phisycoschemical Engineering Faculty, School of Petroleum Engineering. M. Sc. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

INTRODUCCIÓN

El constante desarrollo tecnológico a nivel mundial ha hecho que desde las tareas más cotidianas hasta los grandes procesos industriales se desarrollen en menos tiempo y de manera más eficiente, uno de los avances más importantes se ha logrado en el ámbito educativo, las nuevas tecnologías ofrecen una amplia gama de contenidos, formas de producción y distribución del conocimiento utilizado por individuos en múltiples contextos a través de actividades que teóricamente podrían adaptarse mejor a los ritmos y estrategias de aprendizaje personal, dando hoy día a cualquier persona la posibilidad de acceder a información que les permita mejorar su nivel académico desde la comodidad de su hogar y sin la necesidad de adquirir libros físicos. Actualmente es un hecho que un gran porcentaje de personas acceden a la información a través de libros digitales, ya que estos permiten obtener información de manera más asequible y didáctica, entregando a los lectores herramientas con las cuales podrán comprender en poco tiempo cualquier tema en específico, ya que no solo tendrán acceso a la parte literaria, si no que se apoyaran de gráficos, tablas y diseños de alta calidad, siendo estos partes fundamentales en la creación de cualquier libro didáctico.

El desarrollo de los libros digitales, se ha ido expandiendo a todas las áreas de conocimientos y la industria petrolera no ha sido una excepción, actualmente es posible encontrar información referente a los procesos que se desarrollan dentro del ámbito petrolero; como producción, intervención de pozos, completamiento, yacimientos o ingeniería de gas. Haciendo énfasis en esta última, la ingeniería de gas ha ido tomando un valor más importante dentro de la industria, debido a que en los últimos años el uso energético del gas se ha incrementado; generando así la necesidad de desarrollar nuevos avances tecnológicos con respecto al manejo y

tratamiento del gas. Dentro de estos avances, podemos encontrar; deshidratación con glicol, deshidratación por adsorción, endulzamiento con aminas, membranas, entre otros; sin embargo, nos centraremos en estos 4 procesos de tratamiento, ya que son estos aspectos fundamentales en el manejo y cumplimiento de especificaciones de calidad del gas natural, según lo suministrado en el Sistema Nacional de Transporte, definidas en la Resolución CREG 071 de 1999 la cual establece el Reglamento único de transporte de gas natural - RUT; estableciendo este reglamento que el gas natural debe entregarse con una calidad tal que no forme líquidos a las condiciones críticas de operación del sistema de transporte. En este libro se hará una revisión de la literatura para determinar el estado actual de desarrollo e implementación de los libros de texto digitales, de igual forma, se hará una investigación bibliográfica enfocada en el área de tratamiento de gas natural, para posteriormente desarrollar un libro digital con características propias tales como herramientas gráficas, tablas y diseños didácticos enfocados en mejorar el aprendizaje y comprensión del tema en estudio.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar material didáctico bajo la modalidad de textos digitales para asistir el diseño y simulación de los procesos de tratamiento de gas natural.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✚ Revisar la bibliografía existente a cerca de las tendencias modernas y metodologías para la elaboración de material didáctico bajo la modalidad de libros y textos digitales ilustrados.
- ✚ Realizar una revisión bibliográfica de los temas de endulzamiento y deshidratación de gas que hacen parte del módulo de procesos de tratamiento de gas natural.
- ✚ Elaborar un libro digital para ilustrar de manera didáctica los temas y ejercicios con aplicaciones prácticas que hacen parte del módulo de operaciones básicas de Proceso.
- ✚ Desarrollar casos de estudios de diseño y simulación para cada uno de los temas que componen el módulo de Tratamiento de gas natural.

2. GENERALIDADES DE LOS LIBROS DIGITALES

2.1 ESTADO DEL ARTE

Desde los años noventa, hemos visto una revolución tecnológica caracterizada por un cambio hacia un mundo digital que se ha hecho evidente en diversas esferas de la sociedad y la cultura y está avanzando a un ritmo cada vez más acelerado, al menos si seguimos el reciente discurso teórico. Otra cosa es lo que realmente sucede en la práctica. Las reflexiones en los círculos educativos no son ajenas a este tema y parece que las escuelas tendrán que adaptarse gradualmente a las nuevas demandas de la "era de la comunicación". Cuadernos y bolígrafos están dando paso a computadoras, pizarras a pizarras interactivas y libros de texto a libros de texto digitales. Conceptos y herramientas como iPads, libros electrónicos y lectores electrónicos nos son familiares en muchos contextos y ya no parece inusual hablar de sus aplicaciones de enseñanza, ya sea para la educación de la primera infancia o personas de la tercera edad. Sin embargo, los libros de texto digitales pueden estar actualmente a la vanguardia de la preocupación y están causando la mayor confusión en política, educación y publicaciones. No hace falta decir que los libros de texto son mucho más que un recurso educativo. Representan un artefacto con fuertes connotaciones políticas e ideológicas y han sido objeto de un amplio análisis durante décadas. La forma en que se conceptualizan y cómo se utilizan para la función de enseñanza representa una forma de definir la escuela y el papel de los docentes. Para muchos, son la única herramienta para concretar el currículo. Otros pensamos que deberían ser seriamente re-actualizados y dar paso a enfoques educativos más innovadores que se centren más en el desarrollo profesional de los docentes y la atención a la diversidad de los estudiantes. La sugerencia de "transformar" el libro de texto en el libro de texto digital implica mucho más que un simple cambio de nombre; implica una reinterpretación de significado,

funciones en la escuela y el futuro. Para algunos puede representar una oportunidad para afianzar su poder en el aula y para otros constituirá una oportunidad más para resaltar la necesidad de un nuevo tipo de escuela donde los libros de texto ya no representan la referencia principal para los maestros.

2.1.1 ¿Qué es un libro de texto digital? Si seguimos las reflexiones en varios manuales y documentos sobre tecnología educativa, es necesario especificar el significado de los términos utilizados en el área. Además, se hace referencia a las dificultades derivadas de la falta de una definición adecuada no solo en relación con los "libros de texto digitales", sino también con respecto a los "libros de texto" en general. Profundizar en la terminológica en diferentes conceptualizaciones es una buena oportunidad para reflexionar sobre el papel concebido de los materiales y su relación con otros componentes curriculares como objetivos, contenidos, estrategias de enseñanza-aprendizaje, otros recursos y su relación con la práctica. Abordar la vaguedad terminológica también significa profundizar en la relación entre las actividades docentes y el uso de materiales¹. En estos tiempos, la tarea de definir el libro de texto digital no es fácil.

Las definiciones, tipos y características del libro de texto digital que se presentarán en este libro pueden contextualizarse en diferentes niveles de educación. Aunque somos conscientes de que estas dimensiones varían dependiendo de si nos referimos a primaria, secundaria o universidad, aunque la literatura ciertamente no hace ninguna distinción.

Sin embargo, el tipo de libros de texto digitales utilizados y la forma en que se utilizan varían de un nivel de educación a otro. Además, hemos encontrado una confusión común entre el contenido digital y los medios en los que está alojado, es decir, hemos encontrado muchos textos en los que los términos "e-book" y "e-textbook"

¹ RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, J. and MONTERO MESA, M^a L. Indefinición terminológica y tecnología educativa. Pixel Bit. Revista de Medios y Educación, 2004 22, 51-65.

se usan indiscriminadamente para referirse a los libros de texto digitales y sus contenidos². Ahora trataremos de aclarar la confusión.

Se hace referencia al contenido electrónico o digital de muchas maneras diferentes: por ejemplo, libros de texto electrónicos, libros de texto digitales, libros multimedia, libros interactivos en línea y libros de texto electrónicos. Estos contenidos se almacenan en un formato determinado que se puede ver utilizando diferentes dispositivos. En general, un dispositivo diseñado específicamente para leer textos se llama e-Reader.

En cuanto a la diferencia entre los libros de texto electrónicos y los libros de texto convencionales, podemos decir que, además de su formato, los libros de texto electrónicos también son diferentes, ya que incorporan una variedad de recursos interactivos y multimedia, como videos, imágenes y animaciones. De acuerdo con Jordi Adell³, podemos señalar las siguientes características distintivas:

- + **Capacidad de copia;** Hay una capacidad infinita para reproducir el original.
- + **Capacidad de bifurcación;** Nos permite ramificar el tema y seguir adelante.
- + **Capacidad de mezcla;** Esto se refiere a la capacidad de desglosar la información existente para crear nuevo contenido.
- + **Interactividad;** Esto significa poder trabajar en conjunto con otros medios de comunicación. Junto con el texto y las imágenes estáticas, hay contenidos como videos, animaciones, etc.
- + **Colaboración;** El formato digital nos permite trabajar en colaboración en diversos contextos: tanto elaborando materiales como utilizándolos.
- + **Serendipia;** Estos materiales hacen posible descubrir cosas que no estaban destinadas. Es decir, al buscar información específica, se puede descubrir algo completamente diferente.
- + **Tiempo real;** Los materiales se pueden crear de improviso en tiempo real. En cualquier sitio. Se pueden usar en cualquier momento y en cualquier lugar.

²CANO DELGADO, 69; Observatory on reading and books 2010, 2004 3.

³ADELL, Jordi.. O libro de texto do futuro. Revista Galega de Educación, 38, 9-15. 2007

A través de su sitio web Digital Textbook, el KERIS (Servicio de Información de Educación e Investigación de Corea) enumera las siguientes características definitorias que pueden ayudar a contextualizar el significado al que nos estamos refiriendo:

Tabla 1. Principales características de los libros digitales

Principales características	Descripción de características
Función de libro de texto	Cumplir los roles y funciones proporcionadas por los libros de texto existentes; lograr el mismo objetivo educativo que el de los libros de texto existentes (tomar notas, notas, notas y pasar páginas, etc.)
Característica multimedia	Los materiales multimedia están integrados o vinculados a hipervínculos (imagen, video, voz, sonido, animación y 3D, etc.)
Característica de referencia	Proporcionar referencias u hojas de trabajo necesarias para el estudio auto dirigido.
Característica del diccionario de estudio	Proporciona la función de varios diccionarios de estudio o vocabulario (coreano, inglés, chino escrito y enciclopedia, etc.)
Función de búsqueda de datos	Buscar fácilmente los contenidos que los alumnos necesitan (búsqueda de textos o multimedia de los mismos cursos en un grado diferente u otros cursos)
Función de hipervínculo	Enlace adicional a varios recursos necesarios para el estudio auto dirigido (tipo de lección privada, tipo de simulación, tipo de juego y aprendizaje por tipo de repetición, etc.)
Característica de interacción	Intercambio mutuo con expertos o instituciones externas a través de la web (correo electrónico, boletín electrónico y enlaces a sitios web, etc.)
Estudiar la función del sistema de gestión	Gestión de guías de estudio para alumnos, diagnóstico a nivel de alumno.
Características de herramientas de evaluación	Enlace de herramientas de evaluación dentro o fuera del sistema de libros de texto digitales; Proporcionar materiales de aprendizaje complementarios o en profundidad para cada nivel utilizando datos de evaluación para evaluar si se logran los objetivos del estudio.
Características de herramientas de autor	Publicación, edición o impresión de los contenidos que los alumnos desean; edición de texto, imágenes, música y video, etc.
Enlace a varios recursos de información	Vinculado a bases de datos de conocimiento nacional cuidadosamente seleccionadas para estudiar las instituciones políticas, económicas, sociales y culturales.

Fuente: Tomado de KERIS (Servicio de Información de Educación e Investigación de Corea); www.dtbook.kr/renew/english/sub/dt_book_feature.html

Pere Marqués hizo una clasificación de las características de los libros de textos digitales que distingue entre las que son comunes a los libros de texto en papel y las que son únicas, esta clasificación permite aclarar la pregunta global ¿Qué es realmente un libro digital?

Tabla 2. Características de libros de texto digital en común con los libros de texto de papel

Aspectos técnicos y estructurales.	Aspectos pedagógicos y funciones
■ Texto claro y gramaticalmente perfecto.	■ Proporcionan información y guían el aprendizaje.
■ Tipos de letra muy legibles.	■ Tienen un propósito educativo específico más allá de memorizar contenido y adquirir habilidades de rutina: su objetivo es facilitar las competencias básicas.
■ Ilustraciones claras y apropiadas para el contenido y la audiencia.	■ Se dirigen a estudiantes específicos.
	■ Sus contenidos informativos están bien estructurados.
	■ Incluyen ejercicios.
	■ Su contenido y actividades se basan en un diseño de instrucción.
	■ Tienden a incluir pautas de estudio para estudiantes y pautas para maestros (en secciones separadas o libros de maestros).
	■ Las actividades pueden continuar en un momento posterior donde se dejaron.

Fuente: MARQUÉS, P. 15 didactic models for using digital textbooks UAB - DIM group; <http://peremarques.blogspot.com/> (PPT) 2010

Tabla 3. Características únicas de los libros

Aspectos técnicos y estructurales.	Aspectos funcionales
Formato digital: acceso en línea desde el servidor del editor (o DVD). Incluir elementos multimedia (video, animación, simulación, foto, audio). Organización: similar al medio ambiente con temas, secciones, partes, recursos Hipervínculos que enlazan con otros contenidos en el libro o en Internet. Hipervínculos que enlazan con otros contenidos en el libro o en Internet. Configuración del entorno: eliminar, agregar y modificar contenidos. Entorno de aprendizaje virtual (VLE) para monitorear el trabajo de cada estudiante.	Algunos le permiten configurar la apariencia del entorno (fuente), el idioma y el contenido visible, lo que facilita la adaptación curricular. Muchos ejercicios son interactivos con corrección inmediata. El motor de búsqueda interno facilita la búsqueda de contenido en función de los intereses. Utilizable desde cualquier dispositivo con acceso a internet (PC, teléfono móvil, ...) Se pueden imprimir ya que incluyen hojas de trabajo para esta función. Fácil y rápido para que el editor actualice. Facilita las presentaciones de los maestros, ya que los contenidos pueden proyectarse además de ser utilizados por los estudiantes en una computadora. Los maestros pueden configurar el libro que los estudiantes verán. Los estudiantes pueden hacer ejercicios en un VLE que facilita el control del maestro y el monitoreo de las tareas.

Fuente: MARQUÉS, P. 15 didactic models for using digital textbooks UAB - DIM group; <http://peremarques.blogspot.com/> (PPT) 2010

Tabla 4. Características únicas de los libros

Aspectos pedagógicos.	Desventajas
Los elementos multimedia son atractivos y más fáciles de entender y usar por estudiantes con diferentes estilos de aprendizaje. Los ejercicios pueden hacerse cada vez más difíciles y pueden ajustarse automáticamente según las circunstancias y el progreso de cada alumno (atención a la diversidad). Mayor interacción (diálogo) entre estudiantes y contenidos, clasificaciones que expanden información. La corrección inmediata de los ejercicios (autoevaluación) mantiene al estudiante alerta y activo. Por lo general, puede generar informes de actividad para cada estudiante. Puede incluir herramientas de apoyo para los ejercicios: calculadora, glosario, foros, entornos de trabajo colaborativo (blogs, wikis ...) Generalmente incluye simuladores para experimentos.	Es ecológico porque no usa papel, pero genera dependencia tecnológica: adquirir dispositivos costosos, usar electricidad, acceso a internet. Puede ser más difícil de leer en una pantalla, la lectura prolongada puede ser agotadora. El contenido digital es más vulnerable a la piratería. En general, no permita anotaciones. Problemas de velocidad según la computadora y la conexión a Internet. Los videos y las animaciones pueden distraer.

Fuente: MARQUÉS, P. 15 didactic models for using digital textbooks UAB - DIM group; <http://peremarques.blogspot.com/> (PPT) 2010

Con respecto a las funciones de los libros de texto digitales, KERIS los clasifica en tres tipos:

I.Función de ayuda para la enseñanza y el aprendizaje

-  **Función de libro de texto:** Escritura, notas, navegación y visualización de páginas, apoyo al aprendizaje y función de motivación y propagación.
-  **Función multimedia:** Imágenes, videoclips, audios, animaciones 3D, etc. Enlace a contenidos incrustados o hipervínculos.
-  **Función de búsqueda de datos:** Búsqueda de libros de texto de otros cursos y búsqueda de libros de texto de diferentes niveles educativos.
-  **Función de materiales de referencia:** Material o aprendizaje autónomo.
-  **Función de hipervínculo:** Varios recursos vinculados a través de la web mundial para facilitar las referencias para ayudar al aprendizaje autónomo.

II.Función de gestión de aprendizaje

-  **Función de herramienta de evaluación:** Conexión con herramientas de evaluación dentro y fuera. El libro de texto digital ofreció materiales de aprendizaje ampliados para alcanzar el nivel de comprensión del estudiante.
-  **Función de herramienta de autoría:** Redacta, edita e imprime documentos mientras editas texto, música, imágenes y videoclips.
-  **Función del sistema de gestión aprendida:** Gestión del portafolio electrónico de los alumnos, gestión del progreso del aprendizaje de los alumnos.

III.Función interactiva

-  **Función de conexión de recursos:** Conexión diferentes bases de datos y con contenidos de varias instituciones políticas, sociales y culturales.
-  **Función interactiva:** Interacción con expertos y otros institutos a través de la Web.

En cuanto a los tipos de libros de texto digitales que existen, la propuesta del "Palm Center" puede ser útil y propone la siguiente clasificación:

- ✚ Libros de texto electrónicos, especialmente creados para lectores como Amazon Kindle y Apple iPad.

- ✚ Libros a pedido basados en computadora, como Google Books y libros de texto de NetLibrary.

- ✚ Libros de texto digitales impresos bajo demanda.

- ✚ Conjuntos modulares de recursos de audio, visuales, interactivos y de texto disponibles a través de iTunes, wikis y aplicaciones digitales.

Rob Reynolds elaboró otra clasificación interesante que identifica tres tipos de libros de texto digitales en función del costo y la funcionalidad:

- ✚ "Libro electrónico XML de editor de costo intermedio con algunas mejoras de recursos" Este tipo de libros de texto digitales se basan en libros impresos preexistentes tradicionales. Los editores los ofrecen en una plataforma LMS.

- ✚ "Libros de texto electrónicos XML y colecciones de recursos flexibles, gratuitos y de bajo costo" Reynolds se refiere en esta clasificación a los libros de texto digitales que se basan en el modelo de creación / autor de "crowdsourcing". Este modelo implica la colaboración de varias personas para crear un determinado recurso. Otra característica de este tipo de libros de texto electrónicos es que representan una pérdida de dinero para los editores porque la mayoría probablemente se compartirá a través de la interactividad social en Internet.

- ✚ Libros electrónicos XML interactivos de alta gama con una interactividad significativa y personalizada. El tipo de libros de texto digitales ofrece, según Reynolds, altos niveles de interactividad y evaluación.

Den Visel (2003, en Adell y Bernabé 2006) identifica dos tipos diferentes de libros de texto digitales. Esta clasificación es bastante similar a una listada anteriormente. Visel distingue lo siguiente:

- ✚ El modelo de libro electrónico "basado en PDF". Básicamente se trata de escanear contenido manteniendo las características de los libros tradicionales. En general, este es un archivo PDF protegido que no permite "anotar, editar o compartir entre usuarios, no permite vincular fácilmente otros medios (como audio o video) y es igual para tipo de público" (Den Visel 2003, en Adell y Bernabé 2006).

✚ El modelo "basado en navegador". "Utiliza un lenguaje HTML o XML para etiquetar las diferentes partes de la estructura del texto" y se puede mostrar como una página web.

A esta lista podríamos agregar un tercer tipo de libro de texto digital, "libros de texto abiertos". Este tipo de libro desdibuja la línea entre el lector y el escritor porque el primero puede asumir el papel del segundo editando el texto para satisfacer las necesidades. El término "abierto" se refiere principalmente al aspecto legal de estos libros, ya que generalmente son licencia abierta "Creative Commons", que permite a los usuarios descargar, personalizar e imprimir el libro de texto sin el consentimiento por escrito del autor. Una cuestión que parece latente en la literatura y que algunos autores comparten es: si algo que no es intrínsecamente un libro puede llamarse un libro de texto digital, y la pregunta ¿Por qué usar la palabra "texto" si, como señala Visel, un libro es algo más?

Nos parece bastante apropiado citar las palabras del artículo de Jordi Adell, "Carta a los editores de libros de texto", donde expresa su opinión en contra del uso del término "libros" para referirse a este tipo de contenido:

"Nunca van a encontrar lo que están" buscando ", el libro de texto digital, porque no existe. Y no existe porque podría no tener ningún sentido para este día y época. En un momento en que el acceso a la información era costoso y difícil, un libro de texto tenía sentido: todo lo que valía la pena saber para el curso en un solo lugar, organizado y semidireccional. Una gran ayuda para los profesores. Hoy, en la era de Internet, esto es simplemente impensable."⁴

Zachary Tumin (2012) comparte esta idea y llama a los libros de texto digitales los nuevos "carruajes sin caballos" (un término utilizado para describir los primeros

⁴ ADELL, J. and BERNABÉ, I. Los libros de texto de la escuela en red. Perspectiva CEP, 11, 2006 21-33.

automóviles). A lo largo de la historia ha habido innumerables ejemplos de cómo las innovaciones buscan parecerse a algo existente y se hacen popular. Por ejemplo, cuando la imprenta comenzó a usarse, los trabajos publicados se hicieron para parecerse lo más posible a los manuscritos de los grandes escritos de la época.

Hasta cierto punto, podríamos decir que el término "libro de texto" se refiere a una visión reduccionista de los libros escolares como fuentes de conocimiento enmarcadas para ser asimiladas en un momento y lugar en particular. Además, el nombre (libro de texto digital) connota la preeminencia del texto sobre otros medios. Creemos que es un término que no refleja claramente el potencial del nuevo aporte "Innovación" que hemos estado discutiendo. Pero, como con los niños, el tiempo se encargará de forjar su personalidad y nombre.

2.1.2 Investigación de libros digitales. Aunque hoy día han surgido muchas preguntas con respecto a los libros de texto digitales, podemos decir que hay relativamente poca investigación disponible sobre este tema. Sin embargo, parece convertirse en un área de especial preocupación y estudio en el campo de la tecnología educativa.

Las siguientes fuentes de datos se han utilizado para la revisión de documentos, investigaciones y reflexiones sobre libros de texto digitales: **ISOC, PSEDISOC, DIALNET CEDUS, RESH, REDINED, ERIC, DIALOG**, revistas educativas en español y otras fuentes de Internet. También tomamos en consideración las recientes conferencias, seminarios y actividades sobre libros de texto que han tenido lugar tanto a nivel nacional como internacional y se han centrado particularmente en la investigación de libros de texto. Un número considerable de las fuentes aquí mencionados se contextualizan en los Estados Unidos, que se coloca a la vanguardia del mundo editorial. También hay estudios que se destacan de Japón y Corea, donde el potencial de los libros de texto digitales ha sido analizados y explotados durante años (Stovall 2009). Además, también hemos

tenido en cuenta artículos, publicaciones, videos y experiencias de otros países identificados a través de una revisión de la literatura e internet.

En el campo de la investigación educativa, los problemas relacionados con los libros de texto digitales constituyen un fenómeno relativamente nuevo. Aunque en 1998 Geoffrey Nunberg y otros autores dieron un vistazo a la perspectiva de los libros de texto frente a las TIC en su libro "El futuro del libro de texto: ¿esto matará eso?", fue entonces hasta 2009 que el mercado de lectura digital se popularizó con el lanzamiento del "Kindle" de Amazon y luego el "iPad" de Apple y se comenzó a realizar una gran cantidad de investigación.

2.1.3 Uso de libros digitales. El primer problema que encontramos con respecto al uso de los libros de texto digitales es, como señaló Slater (2010) "para usar un libro electrónico, los usuarios primero deben ser conscientes de su existencia". Es decir, muchas personas desconocen que existen libros de texto digitales, e incluso si lo saben, no saben cómo usarlos. Por otro lado, aquellos que sí saben de su existencia a menudo usan libros de texto digitales para fines distintos de los libros de texto impresos. Se supone que las personas prefieren los libros digitales para seleccionar extractos específicos, mientras que los libros impresos son para inferir la mayor parte del contenido. En una revisión de la literatura sobre libros de texto digitales en bibliotecas académicas, Slater propone que se reconsidere esta idea.

Entre las investigaciones identificadas por Slater, nos gustaría señalar varios estudios centrados en el uso de "NetLibrary". En primer lugar, se descubrió que la mayoría de los usuarios no leen capítulos enteros en los libros electrónicos a los que acceden. El tiempo promedio de uso de un libro electrónico en esta plataforma fue de entre 5 y 15 minutos, mientras que se vio un promedio de 6 páginas. El 92% de los usuarios obtuvieron acceso a través de instituciones académicas. A la luz de estos resultados, como lo indican Conway y Clifton (Slater 2010), se puede concluir

que “La Colección de libros electrónicos de NetLibrary se está utilizando como una Colección de referencia, y los libros electrónicos no se leen de principio a fin”.

Otros estudios indicaron que los libros de texto digitales no son fácilmente utilizables por parte de los discapacitados visuales y presentan "barreras importantes que impiden que las personas con discapacidad tengan acceso pleno e igualitario"⁵.

De manera similar, encontramos estudios que muestran que las bibliotecas tienen dificultades para proporcionar libros electrónicos porque los que desean adquirir no están disponibles electrónicamente porque tienen un precio o están empaquetados de una manera que los hace menos atractivos que sus contrapartes impresas, o porque adquiere libros electrónicos que no se integran fácilmente en el flujo de trabajo normal, es decir es difícil su adquisición.

Un tema especialmente interesante que involucra el uso de materiales es el tipo de capacitación que reciben los maestros sobre cómo usar los libros de texto digitales. Este es un problema que requiere más investigación. Mardis y col. (2010, 10) indican que “la mayoría de los administradores escolares que respondieron a la encuesta de 2006 de la Escuela Digital de Estados Unidos informaron que estaban preocupados por la capacidad de sus maestros y bibliotecarios para integrar sin problemas las nuevas tecnologías digitales en el plan de estudios existente (Greaves Group @ Hayes Connection 2008). A aproximadamente \$ 100 por estudiante por año, los distritos a menudo no planean el tiempo sustancial y la inversión en desarrollo profesional que necesitarán hacer para garantizar el éxito de sus programas de libros de texto digitales”⁶.

2.1.4 Libros de texto en bibliotecas y plataformas digitales. La demanda por parte de profesores y estudiantes de plataformas con las que compartir y crear libros

⁵ MARDIS, M., EVERHART, N., SMITH, D., NEWSUM, J. and BAKER, S.. From Paper to Pixel: Digital Textbook and Florida's Schools. The Florida State University Palm Center 2010

⁶ GREAVES GROUP. America's digital schools 2006: A five year forecast: Mobilizing the curriculum. Shelton, CT: Market Data Research. [MDR]. 2006

de texto digitales trajo consigo muchas innovaciones tecnológicas y un nuevo tipo de "libros de texto abiertos" publicados y compartidos en Internet. Al mismo tiempo, las bibliotecas han experimentado un cambio evolutivo. Mientras conservan su papel de organizadores del conocimiento, han asumido nuevos roles estrechamente relacionados con este nuevo tipo de contenido.

En este contexto, se definen proyectos como el "Libro de texto abierto de la universidad comunitaria" (CCOTP), creado para compartir libros de texto digitales en línea que pueden ser adaptados por maestros y estudiantes para satisfacer sus necesidades específicas. Con esta plataforma, el Instituto para el estudio de la Gestión del Conocimiento en Educación (ISKME) examinó la adopción y el uso por parte de maestros y estudiantes de libros de texto abiertos.

“El estudio mostró el potencial de nuevas conductas de enseñanza y aprendizaje alineadas con el uso de libros de texto abiertos, incluida una mayor colaboración de los maestros en el desarrollo del plan de estudios y la interactividad de los materiales abiertos como una mejora del aprendizaje de los estudiantes. Además, el estudio identificó desafíos para la sostenibilidad del modelo de libro abierto, incluida la eficacia tecnológica del maestro y el desarrollo profesional que apoya el uso de libros de texto”⁷.

Otra iniciativa en este sentido fue realizada por profesores del Florida State College en Jacksonville, quienes luego de trabajar durante cinco años en un proyecto para desarrollar materiales educativos de bajo costo (proyecto sirio), en 2010 publicaron 20 libros de educación general que se pueden usar en formato digital con CaféScribe. aplicación donde "los estudiantes pueden resaltar pasajes, buscar palabras en el texto, tomar notas al margen y compartir notas con profesores y

⁷ PETERDIES et al Open textbook adoption and use: implications for teachers and learners. 2011

compañeros". También se lleva a cabo en Florida el "texto de Orange Grove plus" que ofrece libros de texto y monografías universitarios digitales abiertos gratuitos.

La plataforma de la compañía CourseSmart también podría incluirse en esta lista. Fue creado en 2007 por los principales editores de libros de texto de educación superior de América del Norte y actualmente incluye más del 90% de los principales libros de texto de educación superior en uso hoy como libros de texto electrónicos, y tienen el catálogo más grande de recursos electrónicos y materiales de cursos digitales disponibles para acceso instantáneo.

Otra plataforma en línea es smARThistory creada en 2005 por Beth Harris y Steven Zucker. Originalmente, esta plataforma ofrecía guías de audio para su uso en el Museo Metropolitano de Arte y el Museo de Arte Moderno de Nueva York, pero finalmente comenzó a incluir cosas como videos, guías de audio, aplicaciones móviles y redes sociales, por lo que es un buen ejemplo de lo que debería ser un libro de texto digital. Es de destacar que esta plataforma a menudo se conoce como "el libro de texto del futuro" (Seed 2012), "un libro web multimedia" (collegeopentextbooks.org) y "libro de historia del arte multimedia abierto" (Shank 2012).

De igual forma, la Universidad Industrial de Santander cuenta con un catálogo bibliográfico digital en el cual es posible acceder a numerosas bases de datos de cualquier área de conocimiento donde el usuario puede encontrar información referente a temas específicos según su requerimiento, esto es posible ya que la UIS cuenta con una infraestructura digital que permite nuevas formas de conocimiento que contribuyen a la formación integral de los estudiantes, una de las plataformas con las que cuenta la UIS es: Booklick Institucional, la cual es una plataforma eficaz y rápida que permite el acceso a las bases de datos del Consorcio Nacional: Science Direct, Springer, Taylor, Sage y Oxford, tanto en libros digitales como en revistas científicas.

A todo lo anterior, no está de más decir que las bibliotecas deben capacitarse, para suplir las necesidades de un mundo actualizado y moderno, ya que, como muchos autores anteriormente lo habían citado las generaciones más jóvenes descargan contenido de las bibliotecas al igual que descargan música hoy día, lo que significa que la industria literaria tendrá que hacer más para balancearse dentro los servicios de la biblioteca desde la perspectiva de que el acceso remoto a los contenidos reemplazará el acceso en persona. De igual forma, no es un secreto que los usuarios encuentran que hay demasiada información en Internet que muchas veces no es relevante a la información buscada o simplemente es falsa, por lo tanto, se sugiere que las bibliotecas podrían desempeñar un papel como curadores, asegurando la selección, organización y navegación a través de contenido de calidad.

2.1.5 Los libros digitales a nivel económico. La aparición del libro de texto digital en las aulas ha alimentado el debate sobre la capacidad de los editores para adaptarse a este nuevo formato y el impacto económico que tendrá en las profesiones asociadas a la industria editorial. Varios estudios se han centrado en analizar este tema específicamente. La industria editorial de EE. UU está a la cabeza del mercado mundial y tiene una gran capacidad para asimilar los avances tecnológicos.

En lo que respecta a Europa, el Reino Unido se destacó al alcanzar un 6% de ventas de libros electrónicos, que a finales de 2010 habían representado un 38% con respecto a los niveles de 2009 (ICEX, 2012).

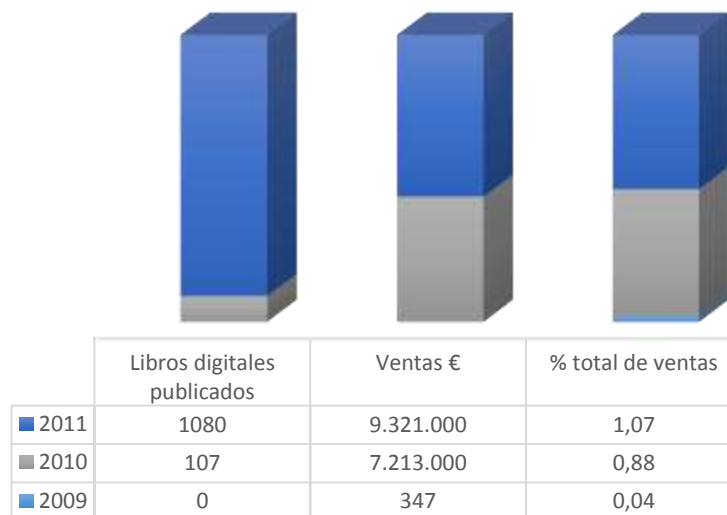
La International Publishers Association (IPA) en colaboración con la Universidad de Sheffield (Reino Unido) lanzó recientemente el "Mapa global del mercado editorial". Según este mapa, los 10 mercados editoriales más fuertes del mundo son (en orden descendente): Estados Unidos, China, Alemania, Japón, Francia, Reino Unido, Italia, España, Brasil e India.

Podemos decir con seguridad que el mercado de libros electrónicos y libros de texto electrónicos en particular está en auge. Como ejemplo en el contexto español, la Federación de Gremios de Editores indica que la venta de libros electrónicos en 2010 alcanzó los 70,5 millones de euros, lo que representa un aumento del 37,5% respecto al año anterior. Afirman que la presencia de libros de texto digitales no puede considerarse significativa porque "ha crecido de ventas de € 347,000 en 2009-2010 a € 7,613,000 en 2010-2011, que, aunque es una cifra importante, representa solo el 0.9% de las ventas de libros educativos"⁸.

También en España, el catálogo de libros electrónicos ha pasado de 107 listados en 2010-2011, a 1080 listados en el año académico 2011-2012. La mayoría de los libros de texto digitales son para la escuela primaria (500) y la secundaria (407). En el período 2010-2012 en España hubo un aumento de 25 veces en los libros de texto digitales, que actualmente representan aproximadamente el 20% de los manuales a los que los estudiantes pueden acceder (ANELE 2012).

⁸ ANELE.. Evolución de los precios de los libros de texto. Curso escolar: 2011-2012 2011 retrived from http://www.federacioneditores.org/0_Resources/Documentos/110829BRIANELE-InformePrecios_2011-2012_DEF.pdf.

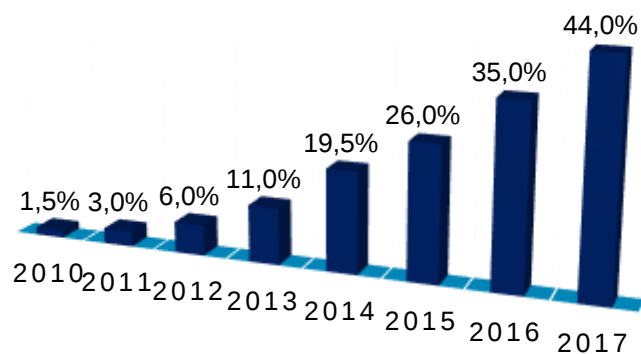
Tabla 5. Crecimiento de ventas de libros digitales en España



Fuente: Comercio interno de libros 2011, de FGEE en ANELE 2012, 15

Del mismo modo, en EEUU, la venta de libros de texto digitales aumento hasta un 25% (en 2011-2015) con un aumento anual promedio de las ventas de aproximadamente el 80% en el período 2012-2015 y una tasa de crecimiento de 25-40 % en los próximos 5 años (2016-2020) (Reynolds 2011).

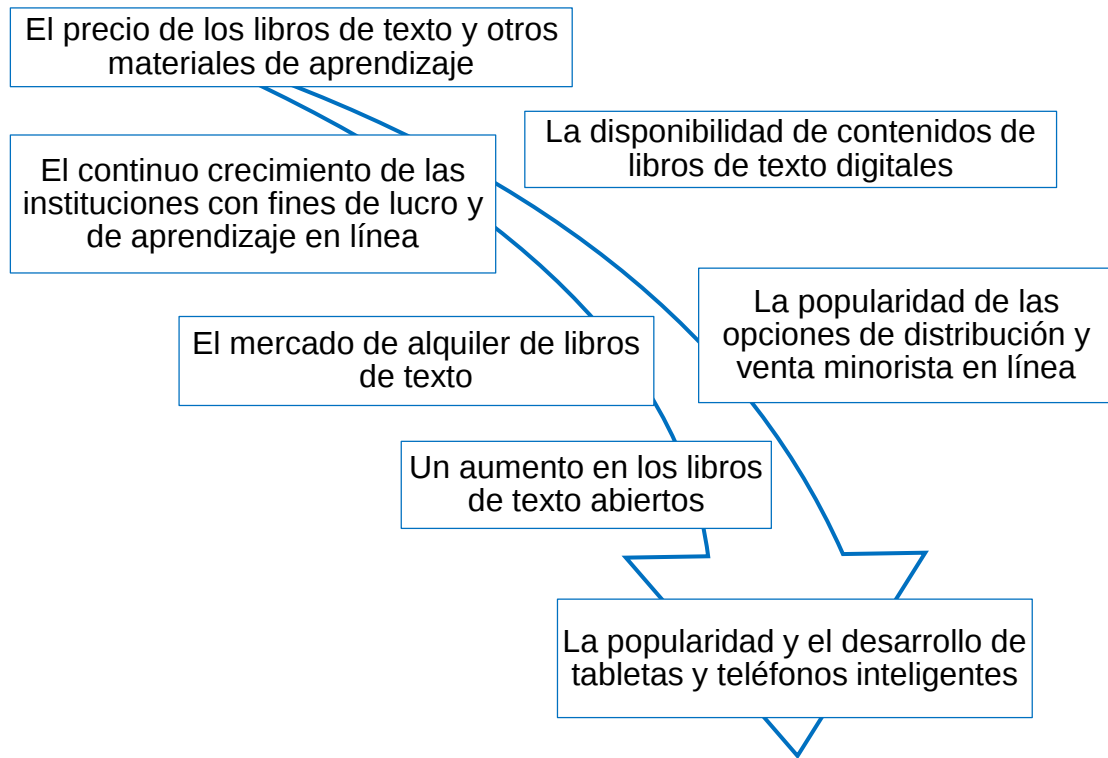
Figura 1. %Ventas de libros digitales en EEUU



Fuente: Rob Reynolds (2011): Digital textbooks reaching the tipping point in U.S. higher education: A Revised Five-Year Forecast

Reynolds afirma que la venta de libros de texto digitales estará influenciada por los siguientes factores:

Figura 2. Factores que influyen la venta de libros digitales



Volviendo al contexto español, se podría decir que "el mercado de los libros de texto es un mercado roto" porque los usuarios finales (estudiantes) no son los que eligen el libro, los que eligen son los que pagan por ello, en este caso (Padres), según lo dicho por los profesores. Esto hace que los libros de texto tengan un precio exorbitante, una calidad inferior a la adecuada y una alta concentración en el negocio. Sin embargo, con la llegada de los libros de texto digitales (especialmente los libros de texto abiertos) se está produciendo un cambio significativo en el que los estudiantes comienzan a tener voz.

En medio de estos antecedentes, los editores deben renovar o morir. Al igual que con las industrias de grabación y cine hace unos años, el mercado del libro debería adaptar sus formatos y contenidos a las demandas de la transformación tecnológica. Sin embargo, esta no es una tarea fácil, Rob Reynolds (2011) señala que se enfrentan a desafíos como:

- + Deficiencias Operativas.
- + Velocidad vertiginosa del cambio de impresión a digital.
- + La necesidad de transformar los modelos de ingresos y rentabilidad.
- + La importancia de utilizar los canales de distribución tanto como sea posible para maximizar los ingresos.
- + Importancia del precio.

En 2008, la Unidad de Investigación de Psicología del Consumidor de la Universidad de Santiago de Compostela presentó un estudio que analiza la situación de los libros de texto en educación y su existencia continua a la luz de los libros de texto digitales y las TIC (2008). Algunas de las conclusiones alcanzadas incluyen que la pasividad de la industria editorial a estos cambios significó que el peso de la producción de contenidos recayera en maestros, educadores e incluso compañías como Microsoft, lo que condujo a un bajo nivel de calidad. Para resolver este problema, se proponen dos soluciones: primero, para que la industria editorial "se ponga al día" y, en segundo lugar, que se realicen más investigaciones en el área, para tener un esquema claro de trabajo.

Tabla 6. Mercado de libros digitales Vs Libros convencionales

	Libros convencionales	Libros digitales
Precio a pagar	\$ 26	\$ 12.99
Impresión, almacenamiento y distribución	\$ 3.25	-
Diseño, Edición	\$ 0.80	\$ 0.50
Mercadeo	\$ 1	\$ 0.78

	Libros convencionales	Libros digitales
Pago por el autor	\$ 3.90	\$ 3.25
Compartido por el librero	\$ 13	\$ 3.90
Compartido por el editor	\$ 4.05	\$ 4.56

Fuente: GIRMA LLORENTE Pilar El mercado editorial en EE: UU. ICEX 2010

Para adaptarse al cambio tecnológico, algunas editoriales proponen un libro de texto digital alojado en el servidor de la editorial y al cual los padres pagan el acceso (consulte el libro interactivo SMLIR en la web de la editorial española SM o libros en texto digital). Estos libros son visualmente iguales a los libros de texto tradicionales, los ejercicios propuestos son muy básicos y las modificaciones que se pueden hacer son mínimas.

La principal competencia contra los editores son proyectos como Wikichicos, Textos Marea Verde y Global Text Project que se basan en el formato de libros de texto abiertos.

Como podemos ver, este es un debate interno presidido por preocupaciones financieras. Es un discurso de mercado que parece no prestar atención a las preocupaciones sobre el valor, la calidad de los libros de texto y las posibles implicaciones para la práctica. Por el contrario, parece ser una cuestión de disputa sobre un mercado en crecimiento.

2.2 LIBROS DE TEXTO DIGITALES EN EL CONTEXTO UNIVERSITARIO

Gran parte de la investigación que involucra libros de texto digitales se enfoca en el análisis de libros de texto universitarios, y seguiremos señalando algunos ejemplos importantes. En 2001, la Universidad Estatal de California llevó a cabo un proyecto piloto sobre libros electrónicos. La universidad puso a disposición de los estudiantes

libros electrónicos (a través de bibliotecas) y estudió cómo se aceptaba y utilizaba la introducción de esta tecnología en entornos de aprendizaje. Aunque los resultados fueron positivos, el estudio no fomentó el despliegue de libros de texto digitales en las aulas universitarias (Langston 2003).

Otro estudio, realizado en la Universidad de Auburn (Bailey 2009) midió el uso de estos libros en su biblioteca de Montgomery entre 2000 y 2004. Descubrieron que el uso de libros de texto digitales aumentó en un 22% en comparación con los libros de texto tradicionales. Además, se descubrió que los estudiantes tenían más probabilidades de trabajar con estos libros en ciertos programas de grado, tales como: negocios, literatura, ciencias sociales y medicina. Otros estudios en este sentido incluyen los de Alan D. Eno (2010) quienes analizaron las percepciones de los estudiantes de medicina de los libros de texto electrónicos. Los resultados muestran que, si bien los estudiantes tenían grandes expectativas con respecto al uso de libros de texto digitales antes del estudio, la mayoría de ellos terminaron usando la versión impresa (el 75% usó solo la versión en papel). Esto revela que el uso de libros de texto digitales no incitó a los estudiantes a cambiar sus hábitos. Este autor también afirma que el uso de estos dispositivos puede ser muy beneficioso para los estudiantes con dificultades de lectura siempre que reciban "instrucciones adecuadas sobre cómo usar el libro de texto digital". Otro punto interesante fue que muchos estudiantes abandonaron el uso de libros de texto digitales porque se sintieron frustrados por las dificultades técnicas que encontraron.

Eno afirma que es necesario cerrar la brecha de conocimiento tecnológico y que los estudiantes no pueden aprovechar al máximo el potencial de los libros de texto digitales si no se les instruye previamente sobre su uso. Por lo tanto, la inclusión de una nueva tecnología en una institución debe ir de la mano con la instrucción sobre la tecnología. Finalmente, el estudio destaca la necesidad de cerrar la brecha entre lo que los estudiantes realmente saben sobre tecnología y lo que se supone que deben saber cuándo comienzan la universidad.

Entre los autores que más repetidamente enfocan sus estudios en libros de texto digitales en el contexto del sistema de la Universidad Americana se encuentra Rob Reynolds. Hasta agosto de 2011, Reynolds publicó su investigación y reflexiones en el blog "The Xplanation", luego cambió a un nuevo blog, "El siguiente es ahora: cómo la educación está cambiando la tecnología", en el que publica el libro digital titulado "El futuro de contenido de aprendizaje: libros de texto digitales, contenido abierto, Apple y más allá". Este libro contiene una descripción general de la situación actual en los EE. UU. De los libros de texto digitales y otros contenidos digitales.

También se analiza el contexto universitario la investigación de Mark R. Nelson (2008) y el informe "CDW-G 21st-Century Campus Report" (2011). El primero busca aclarar cómo se llevará a cabo la incorporación de los libros de texto digitales en las aulas universitarias al dar una visión amplia de la situación actual. Nelson explica que una de las principales barreras para la adopción de libros digitales es la desconfianza de los miembros de la comunidad universitaria. Además, señala que el comportamiento de los estudiantes con respecto a los libros de texto digitales depende en gran medida de las percepciones de los maestros sobre estos recursos. Por lo tanto, los datos recopilados por Nelson muestran que, aunque los estudiantes pueden preferir los libros digitales, no los adquirirán ni los usarán si se cree que los maestros prefieren la edición impresa. Sin embargo, en línea con muchos estudios en este campo, Nelson sugiere que la incorporación de libros digitales en los campus universitarios se convierta en una realidad en un futuro próximo y concluye diciendo que "negar el futuro no lo hará desaparecer".

En cuanto a la segunda, el "Informe del campus del siglo XXI CDW-G" es un informe basado en entrevistas con estudiantes y profesores de varias universidades de los Estados Unidos. El informe señala que las nuevas tecnologías son un aspecto importante que los estudiantes tienen en cuenta al elegir una universidad; Además, los resultados muestran que prácticamente todos los profesores y estudiantes encuestados ven los beneficios del contenido digital como una alternativa a los libros

de texto. El beneficio más tangible, según lo identificado por el 81% de los estudiantes, es el ahorro de costos.

También en la universidad, pero en el contexto de Londres, el "Observatorio Nacional de Libros Electrónicos" (Estelle y Milloy 2009) ha estado estudiando las tendencias del mercado en los libros de texto digitales desde 2007. Más específicamente, se centra en el impacto que los libros de texto digitales abiertos tienen en las ventas de libros de texto tradicionales y en bibliotecas.

El estudio que da lugar al informe implica proporcionar a los estudiantes 36 libros digitales de acceso gratuito. Los hallazgos incluyeron lo siguiente:

- ✚ El uso de este tipo de libro estaba estrechamente relacionado con el calendario académico. Los meses de verano tuvieron los picos más bajos. Según los autores, este hallazgo sugeriría la necesidad de reevaluar los libros de texto digitales en términos de demanda.

- ✚ Otro hecho importante, ya mencionado en investigaciones anteriores, es que los estudiantes no leen estos libros en su totalidad, sino que solo acceden a la información que necesitan y pasan un promedio de 22.8 segundos por página. Por lo tanto, los libros electrónicos se convierten en herramientas "justo a tiempo" para consultas específicas, mientras que los estudiantes usan la versión impresa si quieren leer de forma lineal. Por un lado, esto sugiere que la disponibilidad de una versión electrónica no tiene impacto en las ventas, y por otro, que el contenido digital en las bibliotecas universitarias podría ayudar a aliviar la presión sobre los préstamos a corto plazo.

- ✚ Como conclusión final, se afirma que los libros digitales no son una amenaza, sino que pueden proporcionar un nuevo mercado, aunque todavía existen muchas deficiencias.

Entre los estudios que se centran en cómo el uso de contenidos digitales afecta el aprendizaje de los estudiantes, destaca la investigación de la Universidad Abilene

Christina (ACU). Esta institución tiene un programa de becas llamado "Mobile-Learning ACU" en el que se han llevado a cabo una serie de estudios que involucran libros de texto digitales, de los cuales podemos destacar lo siguiente: Phyllis Bolin en su estudio "Learning Mathematics: It's in Your Fingertip" (2012), intenta demostrar que el uso de un libro de texto interactivo que los estudiantes pueden personalizar fomenta un aumento en las horas de lectura y estudio y, por lo tanto, mejora el rendimiento en clase y en los exámenes. El estudio aún está en marcha, por lo que aún no se pueden presentar resultados concluyentes. En su estudio titulado "Capítulo 0: Un libro de texto en línea creado por el estudiante" (2011), Mark Phillips investiga cómo los estudiantes de pregrado pueden desarrollar e implementar sus propios libros de texto digitales y así optimizar su conocimiento. Con este fin, los estudiantes recibieron iPads y iPhones y crearon el libro de texto digital, "The Edge". Entre los resultados destacan los siguientes:

- ✚ Casi el 60% de los estudiantes NUNCA imprimieron THE EDGE.
- ✚ El 40% de los estudiantes creía que The Edge era propicio para estudiar el material antes de la clase, mientras que el 25% pensaba que no era diferente de los libros tradicionales.
- ✚ La mayoría de los estudiantes declararon que el libro de texto digital redujo el tiempo de estudio, es decir, estudian más rápido y de manera más efectiva.
- ✚ En cuanto a la credibilidad, este aspecto es mayor para los libros de texto tradicionales.

Como conclusión del estudio, Phillips afirma que los libros de texto digitales creados por estudiantes deben superar varios obstáculos, como la precisión del contenido, la facilidad de uso y el costo percibido de estos libros (este último aspecto es difícil de evaluar porque los libros de texto digitales previstos para el estudio eran libres). Algunos estudiantes notaron que las variaciones de diseño entre los capítulos de "The Edge" llevaron a la distracción durante el estudio.

De acuerdo con lo anterior se realizó un estudio donde se pretendía evaluar la aceptación de los libros digitales en el ámbito universitario. El piloto fue diseñado para estudiantes de la Universidad Industrial de Santander, de la carrera de Ingeniería de petróleos, en el cual dos ítems fueron evaluados con la finalidad de concluir la aceptabilidad de los libros digitales.

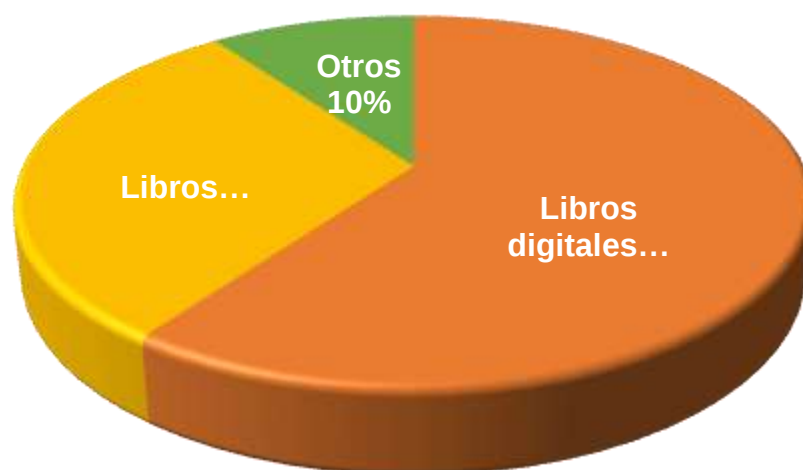
✚ Uso de los libros digitales Vs Libros de texto.

✚ Aprendizaje efectivo.

En cuanto a los resultados, los estudiantes optan por usar los libros digitales como su principal fuente de estudio, en lugar del libro de texto. Señalaron que este tipo de libros permitían obtener un aprendizaje más rápido y eficiente, debido a su diseño asertivo y adecuado a la hora de plasmar la información, de igual forma, la encuesta y estudio arrojo que de 10 libros que leían 6 de ellos eran libros digitales. Además, el fácil acceso a los recursos los motivó a estudiar.

2.3 FUTURO DE LOS LIBROS DE TEXTO DIGITALES

Figura 3. Resultados de los métodos de estudio usados en la UIS



Un tema interesante en torno a los libros de texto digitales es en qué medida reemplazarán los libros de texto tradicionales. Debemos señalar que esta controversia no solo involucra libros de texto sino libros en general.

hay muchos que piensan "que los libros de texto digitales son la ola del futuro" y reemplazarán los libros de texto tradicionales, mientras que otros creen que estos últimos no serán reemplazados. Con respecto a este tema, las conclusiones del proyecto TICSE 2, destacan que alrededor del 60% de los maestros piensan que el libro de texto tradicional permanecerá en el aula.

La importancia del papel en nuestra cultura es innegable, pero debemos recordar que antes de su invención se usaban otros medios para escribir, como piedras, cuero, rollos de papiro, etc. El origen vegetal del papel y la deforestación causada por su producción ha dado lugar a un argumento ecológico que aboga por el uso de libros electrónicos. Por otro lado, algunas personas piensan que los libros de texto en papel son más duraderos porque nadie puede garantizar que el contenido digital dure. Debemos recordar que muchos descubrimientos históricos han sido el resultado de encontrar manuscritos antiguos.

Otra área de controversia en torno a este tema son las consideraciones económicas. La implementación de libros electrónicos implica cambios significativos tanto en la industria editorial como en las profesiones relacionadas (libreros, distribuidores, impresores y editores). Se supone que, si bien los editores continuarán ganando dinero, lo mismo puede no ser cierto para las profesiones relacionadas.

Tabla 7. Comparación de libros digitales Vs libros físicos

	Libros digitales	Libros físicos
Tipo de materiales	Materiales de aprendizaje multimedia como video y virtual, etc.	Materiales de aprendizaje planos y lineales centrados en texto e imagen
Conversión de datos	Reflexión rápida de nuevos hechos y conocimientos.	Difícil de convertir ya que los datos son fijos
Recopilación de datos	Enlace a varios materiales educativos o bases de datos	Se requiere mucho tiempo y costo para encontrar datos fuera de los libros de texto
Contenidos entregando medios	Dispositivos de información (TPC 'y PC de escritorio, etc.)	Medios impresos
Relación con otros cursos.	Posible estudio entre otros grados en el curso o vinculación a otros cursos.	Materiales de aprendizaje individuales separados entre cursos.
Método de aprendizaje	Posible estudio multidireccional entre profesores, alumnos y ordenadores.	Aprendizaje unidireccional centrado en la entrega de conocimiento
Efecto de las lecciones	Actividades de clase centradas en el alumno y experimento de estudio auto dirigido	Lección simultánea en la que es difícil tener clase para la capacidad de cada alumno

Fuente: Tomado de KERIS (Servicio de Información de Educación e Investigación de Corea); www.dtbook.kr/renew/english/sub/dt_book_feature.html

En cuanto a las ventajas de los libros de texto digitales, se mencionan los siguientes (Mardis et al. 2010):

🚦 **Apoyan a los estudiantes en el siglo XXI;** Los estudiantes están más motivados para estudiar.

✚ **Aumentan las oportunidades de aprendizaje al ayudar a los maestros a administrar mejor el tiempo;** Además, proporcionan acceso a una gran cantidad de información en cualquier momento y en cualquier lugar.

✚ **Promueven la buena enseñanza;** Los maestros pueden adaptar los libros a las necesidades específicas de cada clase y cada grupo de estudiantes. Los libros de texto digitales pueden proporcionar acceso en tiempo real a las noticias, conectando así a los estudiantes con su entorno inmediato.

✚ **Menores costos;** Los libros de texto electrónicos representan ahorros para las familias y pueden durar indefinidamente (más allá de la duración de los lectores electrónicos), ya que los editores pueden actualizarlos sin tener que comprar un libro nuevo.

✚ **Protegen la salud y la seguridad de los niños;** El uso de libros de texto digitales reduciría el peso de las mochilas escolares. De hecho, incluso podríamos prescindir de las mochilas escolares porque se puede acceder a los libros en línea desde las escuelas.

✚ **Protegen el medio ambiente;** El origen vegetal del papel y la deforestación causada por su producción proporciona un argumento ecológico a favor del uso de libros electrónicos.

Con respecto a las desventajas de los libros de texto digitales, se mencionan los siguientes:

✚ **Excluyen a los estudiantes con discapacidad visual.** La elaboración de estos materiales debe tener en cuenta a los estudiantes con necesidades educativas especiales. Con respecto a la discapacidad visual, el contenido de los libros electrónicos debe estar disponible en formato de audio.

✚ **Perpetúan las brechas socioeconómicas en la educación** porque no todas las familias pueden asumir el costo de adquirir dispositivos para acceder a estos recursos (es decir, tabletas, computadoras, teléfonos inteligentes, acceso a Internet).

✚ **La conectividad actual a Internet no permite el uso de libros de texto digitales.** Aunque vivimos en una sociedad donde se puede acceder a Internet desde casi

cualquier lugar (existen áreas con wifi gratuito), muchos hogares no tienen este servicio disponible. Los maestros no están capacitados para explotar todo el potencial de los libros de texto digitales. Para hacer un uso efectivo de estos materiales, se debe invertir en el desarrollo profesional de los docentes en esta área.

En el debate entre los libros de texto en papel y digitales, se debe tener en cuenta el concepto de transliteración; Este concepto se refiere a las nuevas formas de alfabetización que se requieren para un contexto digital. Es importante porque este concepto se utiliza para describir y comprender las conexiones entre papel, electrónica y otros.

Es posible definir la alfabetización transliterar como "la capacidad de leer, escribir e interactuar a través de una variedad de plataformas, herramientas y medios desde la firma y la oralidad a través de la escritura, la imprenta, la televisión, la radio y el cine, hasta las redes sociales digitales" (transliteracy.com). Como explica Sue Thomas (2010), "la palabra se deriva del verbo "transliterar", lo que significa escribir una letra o palabra usando las letras correspondientes más cercanas de un alfabeto o idioma diferente". Acerca de su historia, la transliteración se originó con el "grupo de proyectos transliterarios transdisciplinarios, encabezado por Alan Liu del Departamento de Inglés de la Universidad de California-Santa Bárbara" (Asociación de colegios y bibliotecas de investigación 2010) que estudió lectura en línea y son, todavía ahora, particularmente enfocado en los aspectos tecnológicos, sociales y culturales de la lectura en línea. En 2005, este grupo organizó una "conferencia de transliteración" y Sue Thomas (profesora de investigación de nuevos medios en la Facultad de Artes, Diseño y Humanidades, de la Universidad De Montfort en Leicester) asistió a ella y desde entonces ha construido sobre su grupo de investigación en 2006. Se le conoce como PART (Producción e Investigación en transliteración).

Teniendo en cuenta la discusión anterior, el término refleja cosas como la capacidad de los estudiantes para compartir, participar, conectarse, redescubrir, construir conocimiento y personalizar la experiencia (Hamilton 2011).

¿Qué hay de nuevo en la investigación sobre libros digitales?

Finalmente, es necesario reconocer algunas investigaciones y reflexiones pasadas sobre los libros de texto y veremos cómo se relacionan con los principales hallazgos de la investigación sobre libros de texto digitales. La idea es simplemente tratar de identificar los principales desarrollos desde el punto de vista de la didáctica y el plan de estudios que han tenido lugar con respecto al diseño y uso de los libros de texto. Como punto de referencia, aludiremos a uno de nuestros estudios anteriores (Martínez Bonafé y Rodríguez)⁹ que trató sobre el estado de la investigación sobre libros de texto, principalmente en España, pero también en referencia a varias revisiones de otros países. Destacamos algunos de los problemas que han estado estropeando los libros de texto en los últimos años y también analizamos la necesidad de adoptar medidas en las políticas de los libros de texto.

2.4 CARACTERÍSTICAS DEL LIBRO DE TEXTO

Una de las características comúnmente discutidas de los libros de texto involucra sus aspectos formales y la necesidad de mejorarlos. De hecho, aunque hasta la fecha algunos materiales y libros se destacan por su calidad y la integración de la tecnología digital en su diseño, en general, los editores no han mejorado sustancialmente la calidad de los libros de texto digitales de un formato formal. punto de vista, más allá de algunos aspectos de interactividad y legibilidad (Smith 2000).

⁹ MARTÍNEZ BONAFÉ, J. and RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, J. El currículum y el libro de texto. Una dialéctica siempre abierta. En Gimeno Sacristán, J. Saberes e incertidumbres sobre el currículum. Madrid: Morata, 2010 246-268.

Consideraciones como la dificultad de reclutar personal de calidad para unirse a los equipos de publicación debido al costo y la capacitación, así como la necesidad de una cultura de calidad real en los procesos de elaboración de materiales didácticos representan actualmente debilidades en la industria editorial. Del mismo modo, gran parte de la investigación publicada recientemente continúa mostrando la mala calidad de los libros de texto tanto en formato impreso como digital, a pesar de las pequeñas mejoras en términos de interactividad. Algunas de las mejoras formales notables en los libros de texto guardan relación con la capacidad de explorar la información, la resolución de problemas y los efectos positivos en la comprensión de los estudiantes. Sin embargo, no es difícil encontrar estudios que afirmen que los libros de texto digitales tienden a no proporcionar el mismo contenido idiosincrásico e imágenes de calidad que los libros de texto impresos, lo que lleva a los estudiantes a preferir los libros impresos. Del mismo modo, las observaciones de Mardis (2010) en relación con el vale la pena señalar las características y el uso de los libros de texto: "Incluso cuando los desarrolladores de currículos y los maestros tienen la opción de elegir materiales de instrucción en profundidad sobre materiales visualmente más atractivos e interesantes, eligen el contenido menos desafiante (Duth 2005)".

2.5 EL USO DE LIBROS DE TEXTO DIGITALES

Muchos de los estudios y reuniones que involucran libros de texto en los últimos años han enfatizado la necesidad de mejorar su uso junto con la difusión de mejores prácticas y alternativas. Los libros de texto producidos en formato digital podrían hacer una contribución positiva al proporcionar una variedad de propuestas de actividades, adaptarse a diversas situaciones y contextos de aprendizaje, y abordar las necesidades específicas de cada estudiante. Sin embargo, investigaciones recientes sobre el análisis de la atención a la diversidad en los libros de texto impresos y digitales revela una escasa atención a la diversidad de los alumnos con

necesidades educativas especiales (De Paiva 2008, Mardis et al. 2010). Además, investigaciones recientes continúan subrayando el alto grado de dependencia que los maestros y los estudiantes parecen tener en los libros de texto (Rodríguez 2011; Rodríguez y Montero 2012). Especialmente importante es la falta de modelos alternativos de enseñanza y aprendizaje disponibles para mostrar cómo los libros de texto digitales se pueden usar de diferentes maneras. El estudio de Byun et al. (2006) indica que existen muy pocos modelos de instrucción y aprendizaje para usar libros de texto digitales. Otra investigación sobre el mismo tema ha demostrado que los estudiantes prefieren imprimir la información de los libros de texto y prefieren manejar el recurso en formato impreso.

Respeto al proyecto educativo que se refleja en los libros de texto y materiales. Del mismo modo, los problemas de control sugieren una estandarización e interiorización de la vida en el aula y, en ese sentido, el libro de texto parece ocupar una posición privilegiada (Martínez y Rodríguez 2010). Los libros de texto digitales parecen continuar condicionando las prácticas de los maestros y eso no parece estar cambiando.

Todas estas investigaciones, aunque recientes, han ido aclarándose con el paso del tiempo, hoy día es innegable hablar del fenómeno mundial de los libros digitales y del impacto que estos tienen sobre la educación en diferentes niveles educativos, tanto así que hoy día aunque las bibliotecas se mantienen como entes de conocimiento se han vinculado a bibliotecas virtuales, con el fin de satisfacer las necesidades de cualquier tipo de usuario y no quedar obsoletas en esta nueva era moderna, donde los libros digitales son pioneros a nivel educativo. ¿Hacia dónde nos dirigimos?

En la medida en que las necesidades evidenciadas en la investigación analizada que deberían abordarse en los próximos años con respecto a los libros de texto digitales, podemos destacar lo siguiente: las decisiones y reflexiones que involucran

a la industria editorial no pueden centrarse solo en la necesidad de proporcionar más libros de texto y escanearlos, pero debería desarrollar otro tipo de discurso en relación con la calidad de uso, adaptación e integración en el aula. Los equipos de desarrollo de materiales deben incluir profesionales capaces de incluir pedagógicamente aspectos digitales en el diseño y uso de materiales didácticos. Es esencial que los materiales didácticos y los libros de texto digitales pasen por procesos de experimentación, ya que muchos de los libros de texto producidos parecen saltar este paso.

En conclusión, es importante para nosotros resaltar que el debate sobre los libros de texto digitales no debería significar que otras posiciones y enfoques con respecto a los libros de texto sean negativas o queden estos obsoletos. Debemos enfatizar en la idea de que "otro tipo de aprendizaje" es posible y no depende únicamente de los libros de texto. Es necesario una educación donde los maestros puedan analizar y reconsiderar el significado y la importancia atribuidos a los libros de texto digital como un enfoque moderno. Reconocemos que, aunque un gran porcentaje de personas aún utilizan libros de naturaleza convencional, los libros digitales cada día han tomado un valor importante y en el auge de la modernización son principales fuentes de enseñanza en cualquier nivel educativo.

2.6 CREACION DE LIBROS DIGITALES

El primer paso para crear los libros digitales fue obtener información pertinente y concisa sobre el tema de tratamiento de gas natural, principalmente en los temas referentes a deshidratación, endulzamiento y análisis de contenido de agua.

Posteriormente, al obtener la información se realizó una redacción exacta y un desarrollo organizacional de cada tema específico, logrando un texto claro y de fácil comprensión. De igual forma con la finalidad de vincular herramientas didácticas, se

incorporaron gráficas, esquemas y tablas personalizadas, con características dinámicas y propias que permiten fomentar al aprendiz la utilización de este tipo de libros educativos logrando de esta forma que aprenda de manera efectiva y con mayor claridad; todos estos diseños y herramientas fueron realizados con programas básicos como; Power point, Word, Excel y Adobe Acrobat.

Finalmente, se obtuvieron cuatros libros digitales con información referenciada y segura a la hora de aprender acerca de tratamiento de gas natural, así como diseños de herramientas con características especiales y visualmente asertivas a la hora de brindar conocimiento. Estos libros se pueden obtener fácilmente y abrir en cualquier herramienta tecnológica ya que se presentan en formato PDF.

3. PROCESOS EN EL TRATAMIENTO DEL GAS

El gas natural que se recibe de los yacimientos muchas veces se caracteriza por ser un gas amargo, hidratado y húmedo: amargo por los componentes ácidos que contiene, hidratado por la presencia de agua, y húmedo por la presencia de hidrocarburos líquidos. Debido a esto para el uso comercial o doméstico, el gas natural debe ser tratado de tal forma que se disminuyan o eliminen completamente la concentración de aquellos compuestos indeseados. El acondicionamiento del gas natural consta de tres procesos fundamentales: el endulzamiento (eliminación de componentes ácidos), la deshidratación (eliminación del agua) y ajuste de punto de rocío (eliminación de hidrocarburos líquidos) (Campbell, 2001).

Diferentes problemas operacionales se puede presentar si el gas no es tratado de la forma correcta y llevado a las especificaciones requeridas para su posterior venta, problemas como corrosión en gasoductos y equipos (por componentes ácidos tales como H_2S , CO_2 , compuestos de azufre, contenido de agua, entre otros), Taponamiento (Cantidad de agua en el gas que debido a cambios de temperatura y presión puede formar Hidratos), Toxicidad (Componentes ácidos y pesados que causan no solo problemas operacionales si no ambientales y que atentan contra la integridad humana), Déficit de poder calorífico del gas (Debido a las impurezas, el gas pierde poder calorífico y por tanto calidad, lo que afecta la comercialización del mismo); entre otros problemas.

Remitiéndonos a la Resolución 054 de 2007, en la cual se complementan las especificaciones de calidad del gas natural suministrado en el Sistema Nacional de Transporte, definidas en la Resolución CREG 071 de 1999 la cual establece el Reglamento único de transporte de gas natural - RUT; estableciendo este reglamento que el gas natural debe entregarse con una calidad tal que no forme

líquidos a las condiciones críticas de operación del sistema de transporte. En la tabla 1, se representan algunas especificaciones de transporte.

Figura 4. Problemas asociados al contenido de agua en el gas



Tabla 8. Especificaciones de calidad del gas natural

ESPECIFICACIONES	VALOR
Agua	6 lb H ₂ O/MMSCF
CO ₂	2% Max
O ₂	0,1% Max
N ₂	3% Max
Max Temperatura entrega	120 °F
Min Temperatura entrega	40 °F
Max poder calorífico	1150 BTU/SCF
Min poder calorífico	950 BTU/SCF
Temperatura de punto de rocío o cricondentérmico	45° F

Fuente: Resolución CREG 071 de 1999

Así como el contenido de agua en el gas natural es un parámetro importante de especificación para el proceso de transporte y comercialización del gas y debe ser tratado con diferentes procesos, tales como, deshidratación con aminas, deshidratación por adsorción y membranas, la cantidad de compuestos ácidos juegan un papel crucial y es por esto que según el porcentaje de estos, el gas debe ser sometido a un proceso de Endulzamiento que es un proceso mediante el cual se ajusta el contenido de gases ácidos, como el CO_2 o H_2S , de las corrientes que salen de pozo, a los valores permitidos por especificación, generalmente del ente regulador competente, en este caso, nos centraremos en la tecnología de endulzamiento por aminas.

3.1 CONTENIDO DE AGUA EN EL GAS NATURAL

La especificación de contenido de agua en el gas natural es necesaria para prevenir la condensación de agua libre y la formación de hidratos en los gasoductos y en general en las plantas de proceso principalmente en las que operan a bajas temperaturas. Se establece como la masa de agua por unidad de volumen de gas, presente en éste. El gas natural al extraerse del subsuelo y llevarlo a la superficie tiene una capacidad para soportar agua conocida como contenido de agua de saturación.

La cantidad de agua de saturación depende de la composición química del gas o en otros términos de la densidad relativa (gravedad específica), así como de la presión y temperatura de flujo de la corriente gaseosa. Las condiciones que determinan el máximo contenido de agua son la máxima presión de operación de la línea o del proceso y la temperatura mínima a la cual puede estar sometida la corriente de gas. En el diseño de la mayoría de los sistemas es necesario prever la remoción de agua y prevención de hidratos. El hidrato es un sólido, pero de estructura diferente al hielo el cual es de estructura sólida cristalina; es una forma de compuesto químico que

puede existir en forma estable pero no es el resultado de una verdadera reacción química de las moléculas que integran el hidrato.

3.1.1 Determinación de la cantidad de agua en el gas natural. La medición del contenido de agua en el gas es una parte normal del proceso de acondicionamiento del gas. Existen muchos instrumentos en el mercado para este propósito, en un amplio rango de precios. Algunos son difíciles, o ciertamente incómodos de calibrar. Algunos no soportarán un tratamiento físico fuerte, mientras que otros no son adecuados para atmósferas peligrosas.

El abuelo de esta familia de instrumentos es lo que a menudo se llama el Probador de Punto de Rocío de la Oficina de Minas. Consiste en un espejo pulido que se puede enfriar a una velocidad constante. Cuando las primeras gotas de líquido "rocío" aparecen visualmente en este espejo, el técnico registra la temperatura y la presión. Es simple y resistente. Pero, depende del juicio visual del técnico. Diferentes personas obtienen diferentes resultados.

Un problema es el hecho de que los hidrocarburos a menudo se condensan a una temperatura más alta que el agua e inundan el espejo. Ese pequeño punto opaco puede ser difícil de detectar. Una solución para esto es colocar una cámara de carbón activado en la línea de prueba delante del probador.

El carbono tiene poca afinidad por el agua. Una vez que se ha saturado, el gas que sale será representativo del gas que se está probando.

También hay un tipo visual basado en la expansión de gas a través de una válvula para producir niebla. Consiste en encontrar el punto de fuga de la niebla para determinar el punto de rocío. Es un instrumento de baja presión que requiere expansión de gas.

Una forma más sofisticada del concepto de espejo utiliza un espejo chapado en oro unido a un soporte de termopar de cobre. A medida que este conjunto se enfría, un puente de sensor óptico detecta el cambio en el nivel de luz que ocurre cuando se forma rocío en el espejo.

Uno de los mejores (y más caros) instrumentos utiliza dos osciladores de cristal de cuarzo recubiertos higroscópicamente que vibran a 9 MHz. El vapor de agua se adsorbe y des adsorbe alternativamente en cada cristal. El cambio de masa involucrado se refleja en cambios en la frecuencia, que se comparan electrónicamente. Cada cristal se expone alternativamente al gas de muestra húmedo durante 30 segundos mientras que el otro se expone a un gas de referencia seco.

Todavía otro instrumento usa una tira de aluminio anodizado que proporciona una capa de óxido de aluminio sobre la cual se depositó una capa delgada de oro. Se utilizan dos conductores. Cuando el agua se adsorbe en la superficie del óxido, cambia las propiedades dieléctricas. La impedancia se mide y se convierte en contenido de agua en equilibrio con el sensor.

Hay muchas variaciones disponibles del analizador de humedad electrolítico. El sistema exacto varía según el fabricante. Un tipo consiste en un tubo de vidrio con dos alambres de platino enrollados en una doble hélice en la superficie interior. El espacio en esta superficie, entre los cables, está recubierto con pentóxido de fósforo (P_2O_5). Cuando la humedad moja el P_2O_5 , se produce una corriente de electrólisis a medida que se aplica un potencial a los cables. La magnitud de esta corriente se usa para medir el contenido de agua.

Otro tipo de instrumento mide el contenido de agua midiendo la energía térmica intercambiada cuando el gas se adsorbe o des adsorbe en la superficie de un adsorbente sólido. La muestra se divide en dos corrientes, una de las cuales se

seca completamente. También se puede medir el contenido de agua en un cromatógrafo. En un método, el gas pasa a través del carburo de calcio, el agua reacciona produciendo cantidades equivalentes de acetileno que se pueden medir en el cromatógrafo. Otro método cromatográfico mide el contenido de agua usando dos columnas idénticas recubiertas con glicerol.

Muchos de los instrumentos descritos brevemente arriba pueden ser satisfactorios en un caso dado. Ninguno es perfecto, algunos requieren calibración, lo que representa una molestia. Si tiene gases ácidos, la elección se vuelve muy limitada y ninguna puede ser realmente satisfactoria. Las células electrolíticas son particularmente susceptibles a la intoxicación.

El concepto de presiones parciales para determinar el contenido de agua también es un método utilizado, pero este es válido solo cuando el gas se encuentra en presiones de 3 a 4 bares sin embargo esta ecuación es válida a presiones cercanas a la atmosférica – Pero para presiones diferentes a la atmosférica hay otras correlaciones. Si se asume que el agua está presente en el gas en la fase líquida y por tanto en equilibrio con el gas.

Aplicando la ley de Dalton de las presiones parciales:

$$P \times Y_w = P_v$$

P = Presión total del sistema

Y_w = Fracción molar del agua en la fase gaseosa en condiciones de equilibrio.

P_v = Presión del vapor de agua a la Temperatura dada en la fase líquida de agua.

$X_w = 1.0$ A presión cercana a la atmosférica la ecuación es totalmente válida.

La solubilidad del contenido de agua en el gas se establece cuando se alcanza la temperatura del punto de rocío del gas a una presión dada. Es decir, el gas está completamente saturado con agua. Esta es la máxima cantidad de agua que el gas puede contener en las condiciones especificadas. Muchos otros métodos son usados para la determinación del contenido de agua del gas, entre ellos el análisis composicional del gas, cuando este posee cantidades considerables de componentes como CO_2 y H_2S los cuales afectan negativamente, absorbiendo y reteniendo mayor cantidad de agua en el gas.

3.1.2 Contenido de agua en gases con presencia de compuestos ácidos CO_2 y H_2S . Hay muchos métodos disponibles para determinar el contenido de agua en gases que contienen H_2S y CO_2 . Una de estos es el uso de la ecuación (6.2) en la cual se multiplica el contenido de agua de los componentes ácidos por la fracción molar que estos representan en la mezcla. Esto representa el contenido efectivo de agua del componente en la mezcla de gas natural y no el contenido de agua del componente puro. Estas curvas fueron basadas sobre los datos de Sharma. La figura 5 y 6 fueron obtenidas por trazado cruzado y suavizado de los datos binarios de Sharma para metano - CO_2 , y metano- H_2S .

$$W = yW_{hc} + y_1W_1 + y_2W_2 \quad (1)$$

Dónde:

W = Contenido de agua del gas con contenido de H_2S y/o CO_2

W_{hc} = Contenido de agua de la parte hidrocarburo del gas ver Gráfica 6.1

W_1 = Contenido efectivo de agua por contenido de CO_2 ver Gráfica 6.2

W_2 = Contenido efectivo de agua por contenido de H_2S ver Gráfica 6.3

y = Fracción molar de hidrocarburos

y_1 = Fracción molar de CO_2

y_2 = Fracción molar de H_2S

3.1.2.1 Correlación SRK para gases ácidos. La figura 7 es otra correlación utilizada para estimación del contenido de agua de un gas ácido. Los gráficos mostrados fueron calculados con la ecuación de estado SRK asumiendo que la porción de hidrocarburo del gas era metano. También fue asumido que el CO_2 tiene 75% de contenido de agua que el H_2S a las mismas condiciones. Se multiplica así el porcentaje de CO_2 por 0.75 y se agrega el resultado a el porcentaje de H_2S para obtener el contenido de H_2S equivalente.

$$H_2S(equiv) = \%H_2S + 0.75(\%CO_2)$$

La figura 7 es un camino simple y rápido para estimar el contenido de agua de un gas ácido. Para usar la gráfica, se entra a la porción inferior de la gráfica en el sistema de temperatura, se procede horizontalmente a la concentración equivalente de H_2S y posteriormente se procede verticalmente a el sistema de presión luego horizontalmente de vuelta al eje Y. El factor debe multiplicarse por el contenido de agua dulce para obtener el contenido de agua del gas ácido. Como se muestra, sin embargo, esto también está algo limitado por su dependencia con los datos binarios.

Figura 5. Contenido de agua por presencia de CO₂

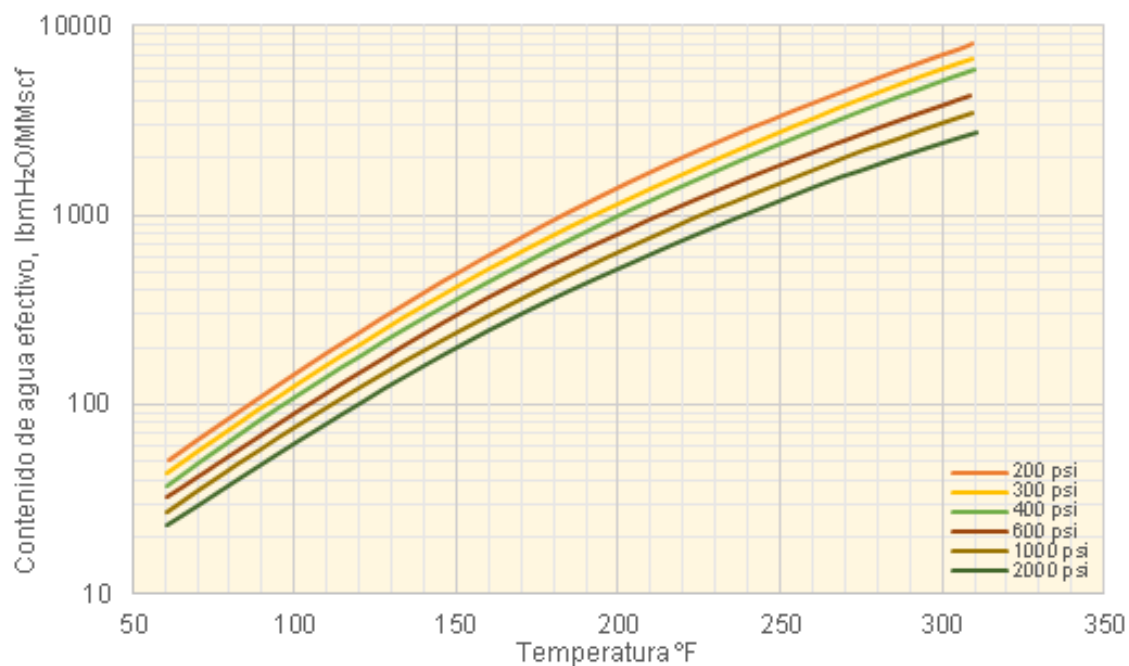


Figura 6. Contenido de agua por presencia de H₂S

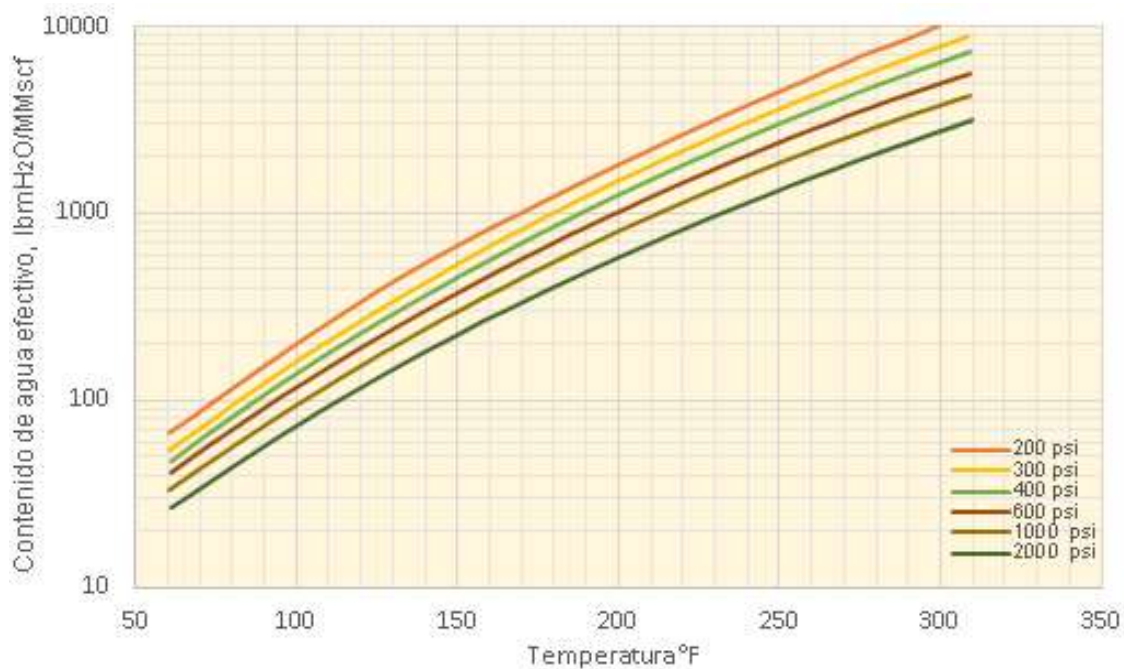
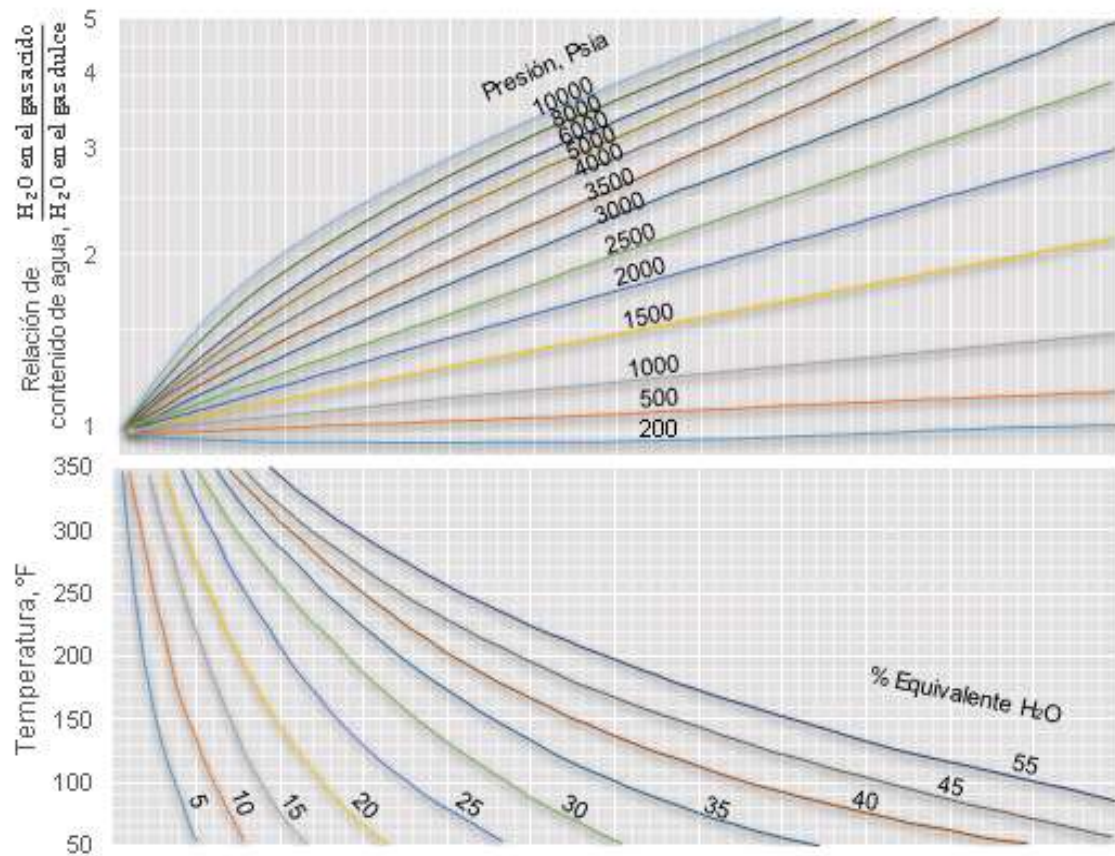


Figura 7. Relación de contenido de agua para un gas ácido



3.1.2.2 Razones para medir el contenido de agua en el gas natural

✚ El gas natural a menudo debe secarse antes de que pueda distribuirse a sus usuarios finales. El secado es necesario para evitar la formación de hidratos y la deposición de agua líquida en las tuberías o la condensación en los compresores; todo lo cual causaría daños o un bajo rendimiento del equipo. Este secado a menudo se logra mediante la deshidratación utilizando contactores de Trietilenglicol (TEG), que son muy efectivos, pero uno de sus problemas es producir arrastre de residuos de TEG en el gas natural. El proceso de secado tiene un alto costo asociado, por lo tanto, es importante secar el gas, pero no llevarlo hasta condiciones de secado extremas. Por lo tanto, es importante realizar mediciones del contenido de humedad

en el gas natural después de que haya pasado por el equipo de deshidratación. Así, dos importantes criterios se deben tener en cuenta;

- ✓ Si no está lo suficientemente seco, podría producir fallas en los equipos y en lo que se encuentre a su paso

- ✓ Si es secado en exceso se incurre en gastos excesivos.

- ✚ Cuando el gas natural licuado (NGL) se "gasifica de nuevo" para la transmisión y distribución por tubería, se pasa a través de intercambiadores de calor que pueden tener fugas o daños, por lo que puede vincularse agua en exceso no deseada en el gas muy seco. Por lo tanto, es importante controlar el contenido de agua después de los intercambiadores de calor para detectar daños o problemas y controlar la calidad.

- ✚ La transferencia de custodia del gas natural requiere el monitoreo del contenido de agua del gas como control de calidad, de esta manera se vincula la venta y compra de gas en el mercado. Si, por el contrario, la cantidad de agua no es monitoreada correctamente, el gas a la venta perderá su valor y no será objetivo de compra para los empresarios.

- ✚ Si el contenido de agua en el gas es muy alto muchos problemas se pueden presentar, es por esto que el gas debe estar lo suficientemente seco para no formar sólidos (Hidratos), durante las caídas de presión.

3.1.2.3 Desafíos en la medición del contenido de agua en el gas natural. El gas natural está conformado principalmente por metano; sin embargo, los contaminantes casi siempre están presentes en este en cualquier estado o forma. Los contaminantes que se encuentran más ampliamente son el glicol (TEG), etanol, líquidos de gas natural (NGL), CO_2 , H_2S y una variedad de partículas, así como otros contaminantes dependiendo del tipo de gas. El gas puede estar a presiones de 700 psig a 1400 psig. Estas condiciones de operación afectan el analizador de humedad típico, en la mayoría de los casos estos requieren procedimientos de limpieza complejos, tales como procedimientos elaborados de enjuague o lavado,

indeseados por los equipos de mantenimiento, pero necesarios para mantener el sensor típico funcionando de manera confiable.

El vapor de H_2S combinado con agua se convierte en un ácido corrosivo. El gas natural generalmente es secado a 6 libras de agua por millón de pies cúbicos estándar (lbs/MMSCF), esta densidad de vapor de agua corresponde a aproximadamente -40 °F de punto de rocío o 143 PPM de contenido de agua. Aunque este no es un nivel de humedad muy alto, no es lo que se consideraría muy seco; por lo tanto, se espera que se presenten algunos problemas de corrosión y, por lo tanto, tengan un efecto en el equipo que es usado para medir.

La presencia de deshidratación con TEG puede causar interferencia a la hora de medir la cantidad de agua que queda en el gas por dos razones principales:

1. Disminuye la velocidad de la medición debido a que este tipo de glicol es de naturaleza altamente Higroscópica.

De igual forma, el uso de filtros TEG en realidad hace que la medición sea aún más lenta porque los filtros acumulan mucho más TEG de lo que tendrían los dispositivos de detección sin ninguna filtración.

2. Puede causar cortos en el sensor debido a su conductividad eléctrica (0.002mΩ / cm @ 20° C para TEG puro, y significativamente mayor en presencia de contaminantes iónicos).

Para comprender la importancia del efecto de la conductividad eléctrica de TEG en los aparatos de medición de contenido de agua del gas, es necesario observar el diseño de los dispositivos de medición. Todos los sensores que utilizan el método de medición de impedancia. El óxido de aluminio, cerámica, polímero, etc. tienen un condensador que depende de la cantidad de agua. En todos los modelos de fabricantes, excepto PhyMetrix, ambos contactos de las placas del condensador están expuestos al gas que se está midiendo. Normalmente, esto no presenta un problema ya que los gases que se miden actúan como aislantes en los voltajes más

bajos de excitación que son utilizados para medir la capacitancia del sensor. Sin embargo, cuando el sensor está recubierto con una película TEG que es eléctricamente conductora, las corrientes conducidas a través de la película TEG (desde una placa del condensador del sensor a la otra placa) hacen que la electrónica de medición falle. PhyMetrix ha diseñado la construcción de su sensor de modo que solo una de las placas del condensador esté expuesta al gas que se está midiendo (la otra placa está completamente aislada), por lo que un recubrimiento de una película eléctricamente conductora no afecta la medición. Esta es una característica única presente solo en el diseño del sensor PhyMetrix. Se encuentra un problema similar cuando hay vapor de mercurio en el gas que se está midiendo, donde forma una película conductora y acorta los sensores de todos los demás fabricantes, mientras que el sensor PhyMetrix no se ve afectado por ningún tipo de recubrimiento conductivo.

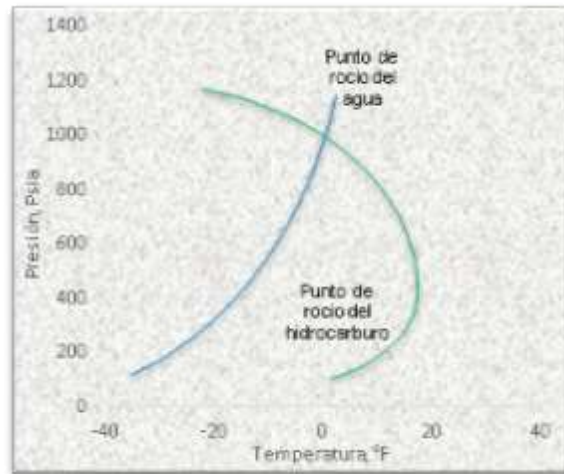
La conveniencia del gas natural es su contenido energético, sin embargo, esta propiedad también presenta un peligro incendiario; así el equipo de medición este aislado y seguro.

3.1.2.4 Punto de rocío. Es común expresar el contenido de agua en términos de punto de rocío y generalmente, la temperatura de punto de rocío es expresada en °F o en °C. Conociendo la temperatura ambiente es posible hacerse a la idea del punto de rocío, a medida que, la temperatura baja durante la noche, el agua comienza a condensarse formado una película de agua sobre la superficie en la que se encuentre, a esta película se le conoce como “rocío”; está es la temperatura a la cual un gas forma la primera gota de líquido al enfriarse. Si la temperatura de operación del gas se encuentra por debajo de la temperatura de congelación del agua, el agua se condensará como una fase solidad llamada “Hidrato”.

En el gas natural hay dos temperaturas de punto de rocío relevantes, el punto de rocío del agua, y el punto de rocío de hidrocarburos. Esta última es simplemente la

temperatura a la que se condensan los hidrocarburos líquidos del gas al enfriarse. Dichos hidrocarburos líquidos comprenden los componentes de mayor peso molecular de la composición del gas, típicamente butano y superior. Este parámetro, como con el punto de rocío del agua, requiere una planta de procesamiento dedicada (en forma de enfriadores de condensación) e instrumentación de medición diseñada específicamente. Sin embargo, la importancia para la medición del punto de rocío del agua surge si se utiliza un analizador de contenido de agua que utiliza una técnica de medición del punto de rocío de condensación. Esta forma de medidor de punto de rocío de espejo enfriado visualmente manual, y cualquier otro tipo de analizador automático de condensación de punto de rocío, puede dar resultados confusos cuando se usa para medir el punto de rocío del agua en el gas natural. Esto se debe a la dificultad de observar el punto de rocío del agua por separado del de los hidrocarburos y el glicol que tienen una alta probabilidad de condensarse en la superficie del espejo a una temperatura más alta que el punto de rocío del agua (Fig. 8). El uso de un sensor basado en un principio de medición sin condensación, como el sensor de humedad de cerámica, evita esta dificultad ya que no emplea una técnica de medición de condensación y, por lo tanto, no sufrirá tales efectos de medición cruzada.

Figura 8. Variación del punto de rocío de hidrocarburos y agua con el cambio de presión



3.1.2.5 Conversión del punto de rocío medido a contenido de agua. La presión del gas natural es típicamente de 4 a 8 MPa en la planta de procesamiento y transporte terrestre, mientras que el gas que ingresa a las tuberías en alta mar a menudo se comprime a 16 MPa o más. En cualquier análisis de punto de rocío se debe considerar la influencia de la presión del gas.

El parámetro del punto de rocío del agua es el parámetro más utilizado para concertar este elemento de calidad del gas en las especificaciones contractuales de suministro entre los productores de gas y los operadores de tuberías hasta los clientes finales. Sin embargo, en algunas especificaciones para plantas de proceso, como contactores de deshidratación de glicol y operaciones de tuberías, es más común que se estipule un contenido de agua máximo permitido. La conversión del punto de rocío medido al contenido de agua necesita una consideración específica para el comportamiento no ideal del gas natural a alta presión que requiere el uso de factores de mejora al realizar la conversión del punto de rocío medido a la presión de análisis conocida al contenido de agua.

Varias fuentes de dichos datos de conversión, que se originan principalmente del trabajo realizado en IGT, Chicago, en la década de 1950, son de uso común en la actualidad y se reproducen en un estándar ASTM actual. Los datos solo se proporcionan hasta un punto de rocío de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que limita su aplicabilidad en regiones climáticas más frías, donde las especificaciones de contenido de agua son más estrictas para evitar la posibilidad de que se produzca condensación y problemas asociados al contenido de agua. Además, cuando se utilizan columnas desecantes como planta de deshidratación de segunda etapa, que es una necesidad, por ejemplo, en una planta de licuefacción de gas natural para evitar el congelamiento dentro del proceso criogénico, entonces los niveles de humedad deben ser inferiores a 1 ppm, generalmente inferiores a 0.1 ppm, lo que equivale a menos de -70°C en las condiciones del proceso. Michell Instruments y otros fabricantes analizadores de contenido de agua han utilizado extrapolaciones de los datos de IGT, pero esto aumenta la incertidumbre de la medición y puede generar disputas en la transferencia de custodia entre productores de gas, operadores de tuberías y clientes finales si se utilizan datos de conversión diferentes. Para las aplicaciones que requieren que se indiquen las unidades de contenido de agua, la conversión generalmente se realiza en la electrónica de medición del higrómetro, donde el punto de rocío medido, a una presión conocida, se convierte en la unidad de medición deseada por la compañía de gas natural. Las unidades en uso regular incluyen Lb/MMSCF (industria del gas en EE. UU. Y también usuarios mundiales de plantas de procesamiento diseñadas en Estados Unidos) y $\text{mg} / \text{stdm}^3$ (especificaciones europeas). Conocer la presión de análisis para la medición del punto de rocío primario es crítico para la precisión de la conversión de la unidad, ya que un error porcentual al definir la presión de análisis se transpondrá directamente al mismo error porcentual al calcular el contenido de agua. Por lo tanto, la presión del analizador debe fijarse mediante un regulador de presión ajustado al nivel mínimo de presión de línea o mediante la medición en línea de la condición de análisis utilizando un transductor de presión para proporcionar una entrada en tiempo real de las variaciones con presión de línea en el cálculo.

3.1.3 Hidratos de gas. El gas natural en el yacimiento puede existir como gas libre, gas disuelto o gas en estado sólido. La distribución de gas entre estas fases está determinada por las condiciones termodinámicas y la composición del gas y el agua. Los hidratos de gas natural son un mineral metaestable cuya formación, existencia estable y descomposición dependen de la presión, temperatura, composición y otras propiedades del gas y el agua.

El volumen de gas en las formaciones productoras depende de las condiciones geológicas en el área y los cambios de estas condiciones geológicas a lo largo del tiempo. El recurso potencial total de gas natural es superior a $3 \times 10^{16} \text{ m}^3$. Este se clasifica en:

- ✚ Gas libre; recurso probado de gas natural - $1.56 \times 10^{14} \text{ m}^3$ (Datos de BP, 2003).
- ✚ Hidratos sólidos; $1.5 \times 10^{16} \text{ m}^3$ (Makogon, 1984; Kvenvolden, 1988).

Los hidratos de gas son compuestos de inclusión de clatratos en los que las moléculas que varían en tamaño de 0,35 nm a 0,9 nm se alojan en una red cristalina formada por moléculas de agua unidas por hidrógeno. Algunas propiedades de los hidratos tienen implicaciones significativas para la producción de energía. pero debido a que los volúmenes específicos de hidratos son 26-32% más grandes que el del agua líquida, un metro cúbico de hidrato contiene 164 m^3 de metano en condiciones estándar. La formación de hidratos es un proceso exotérmico; por lo tanto, los hidratos liberan calor durante la formación y absorben calor durante la disociación. Se requiere aproximadamente 6-12% de la energía contenida dentro del hidrato de gas para descomponer ese hidrato en condiciones naturales. Además, la disociación del hidrato de metano en gas y agua en un volumen cerrado puede generar presiones muy altas.

3.1.3.1 Inhibición de hidratos. La manera positiva de prevenir los hidratos (y la corrosión) es mantener las líneas y los equipos "secos" de agua líquida. Hay ocasiones (correcta o incorrectamente) cuando se toma la decisión de operar una

línea que contiene agua líquida. Si se toma esta decisión, y la temperatura mínima de la línea está por debajo del punto de hidrato, es necesaria la inhibición de esta agua.

Se pueden agregar muchos materiales al agua para deprimir las temperaturas tanto de hidrato como de congelación. Por muchas razones prácticas, se inyecta un alcohol o uno de los glicoles como inhibidor, generalmente metanol, Dietilenglicol (DEG) o etilenglicol (EG). Todos pueden recuperarse y recircularse, pero la economía de la recuperación de metanol puede no ser favorable en muchos casos.

El metanol puede usarse de manera efectiva a cualquier temperatura. Por lo general, no se recomienda DEG debajo de -10°C debido a su viscosidad y la dificultad de separación si hay hidrocarburos líquidos; Encima de -10°C , podría ser preferible porque hay menos pérdida de vaporización que con el EG o MeOH.

3.2 SISTEMAS DE DESHIDRATACIÓN DE GAS NATURAL

Los sistemas o plantas de deshidratación, engloban una cantidad de tecnologías que se pueden aplicar según las condiciones del gas de producción, tales como; Deshidratación supersónica, la cual es una tecnología que fue desarrollada por Shell (1997) y habla de la condensación y separación a velocidades supersónicas siendo esta la clave para obtener beneficios únicos, se considera un dispositivo estático, simple, confiable y sin partes móviles. Deshidratación por adsorción, que se aplica para llegar hasta puntos de rocío del agua menores de -40 a -58°F tales como los requeridos en plantas de refrigeración y procesos de licuefacción, como en la extracción profunda de NGL y las plantas de LNG. son principalmente utilizados para control de punto de rocío de hidrocarburos, encontrando mecanismos como Tamiz molecular, Alúmina activada, Sílice gel entre otros, finalmente contemplaremos una de las tecnologías más utilizadas en la deshidratación de gas

de producción, siendo esta, deshidratación con Glicol. En este tipo de sistema, podemos encontrar 5 tipos de Glicoles con características específicas, como son Etilenglicol, Dietilenglicol, Trietilenglicol, Tetraetilenglicol y Propilenglicol, sin embargo, cada uno tiene propiedades que lo hacen eficiente o ineficiente en este tipo de procesos, por ejemplo, el Dietilenglicol tiene desventajas como mayores pérdidas por arrastre, difícil regeneración a altas concentraciones y temperaturas, menor depresión en el punto de rocío, etc.; lo cual hace que este sea más costoso y que presente mayores problemas asociados a pérdidas de glicol, arrastre de condensados en la corriente de gas de venta, mayor cantidad de glicol de reposición entre otros, por tanto no es un tipo de glicol utilizado, de esta misma manera se pueden resaltar otro tipo de funciones que puede cumplir este compuesto orgánico (Glicol), por ejemplo, el etilenglicol se utiliza para inhibición de hidratos, entre otras funciones. Finalmente, el Trietilenglicol, glicol base en este trabajo, cumple especificaciones óptimas para llevar el gas a cumplimiento normativos, siendo este fácil de regenerar a temperaturas moderadas, posee presiones de vapor bajas y es económico.

3.2.1 Deshidratación con glicol. La deshidratación es el proceso de eliminación de agua de un gas para que no haya agua condensada en el sistema. Mientras que la inhibición es el proceso de agregar algunos químicos al agua que ya se condensó para que no se formen hidratos o cualquier otro problema.

Anteriormente se había mencionado que el gas dependiendo de dónde y cómo se formará tendría características propias y particulares, una de estas son las impurezas que para el mundo ingenieril son simples enemigos operacionales, principalmente se habló de vapor de agua, componentes ácidos e hidrocarburos líquidos como aquellas impurezas que deben ser eliminadas con el fin de cumplir estándares de calidad, en este caso, es el vapor de agua uno de los enfoques más predominantes para los supervisores en el proceso de tratamiento de gas natural,

por tanto, un arduo control en su eliminación y en los parámetros que la afectan directamente tales como presión y temperatura deben ser pan de cada día.

De igual forma, algunos tratamientos del gas natural dejan el gas saturado con agua, este es el caso de la eliminación de gases ácidos con aminas, por tanto, posteriormente el gas debe ser deshidratado con el fin de que llegue a las líneas a las condiciones especificadas, la mayoría de las especificaciones del producto requieren que la cantidad de agua máxima en el gas sea de 4-7 lbm/MMscf.

Generalmente se prefiere la deshidratación, si es factible económica y mecánicamente, porque evita que el agua se condense en el proceso y se presenten potenciales problemas de hidratos, corrosión, erosión, entre otros. Además de que se evita el paso de inhibir el agua condensada y de esta manera se evita incurrir en malas prácticas operacionales, por ejemplo, sobredosificación de inhibidor que al final solo empeorarán los efectos del agua en el sistema.

El gas natural es comercialmente deshidratado en uno o tres pasos.

✚ Absorción	Deshidratación con Glicol
✚ Adsorción	Tamiz molecular, gel de sílice o alúmina activada
✚ Condensación	Refrigeración con Glicol o inyección de metanol

Aunque muchos líquidos poseen la capacidad de absorber agua del gas. La deshidratación con glicol (absorción) es el proceso de deshidratación más común que se utiliza para cumplir con las especificaciones de transporte por líneas y los requisitos de campo (sistema Gas lift, combustible, etc.), además, los sistemas de deshidratación con glicol no solo son las tecnologías más utilizadas por su característica higroscópica, esta tecnología también es eficiente en la eliminación de impurezas de la corriente de gas natural, tales como; benceno, tolueno, etilbenceno, (BTEx), así como otros compuestos orgánicos volátiles. Además de estas características, este solvente cumple con propiedades como:

- ✚ Alta eficiencia de absorción (Higroscópicos)
- ✚ Fácil y económica regeneración a altas concentraciones y temperatura
- ✚ No corrosivo y no tóxico
- ✚ Sin problemas operativos, como la alta viscosidad cuando se usan a altas concentraciones
- ✚ Insoluble en hidrocarburos líquidos
- ✚ Que no reaccionen con hidrocarburos, CO₂ y compuestos de azufre

Como anteriormente se había mencionado, Cuatro tipos de glicol son usualmente usados para procesos de deshidratación y /o inhibición:

Mono etilenglicol (MEG) – a menudo denominado etilenglicol (EG)

Dietilenglicol (DEG)

Trietilenglicol (TEG)

Tetra-etilenglicol (TREG)

Propilenglicol (PG)

Las principales propiedades que gobiernan la elección de glicol para una determinada aplicación son:

- ✚ Viscosidad
- ✚ Presión de vapor
- ✚ Solubilidad en hidrocarburos

Varios de los glicoles se acercan al cumplimiento de todos estos criterios. Los glicoles de Dietilenglicol (DEG), Trietilenglicol (TEG), Tetraetilenglicol (TREG) poseen todos los rasgos adecuados. Sin embargo, casi el 100% de los deshidratadores de glicol usan TEG.

El Trietilenglicol es el glicol más común y más utilizado en el proceso de deshidratación del gas natural a nivel industrial, no solo por sus bajos costos de

operación” Opex” y su relativamente bajo capital de inversión “Capex”, sino porque, este agente químico tiene una afinidad muy fuerte por el agua y cuando este entra en contacto con una corriente de gas natural húmedo, el etilenglicol absorbe el agua del gas.

El DEG es más barato de comprar y a veces se usa por este motivo. A veces también se usa como inhibidor además de como absorbente. Sin embargo, cuando se maneja, almacena y agrega a las unidades, a menudo no hay ahorros reales. En comparación con el TEG, el DEG tiene una mayor pérdida de arrastre, ofrece una mayor depresión del punto de rocío y la regeneración a altas concentraciones es más difícil. Por estas razones, es difícil justificar una unidad DEG, aunque algunas se construyen cada año.

El TREG es más viscoso y más caro que otros glicoles en los mismos procesos. la única ventaja real es su menor presión de vapor que reduce las pérdidas de arrastre en el contactor. Este puede usarse en aquellos casos relativamente raros en los que se empleará la deshidratación de glicol en un gas cuya temperatura exceda aproximadamente 50°C [122°F].

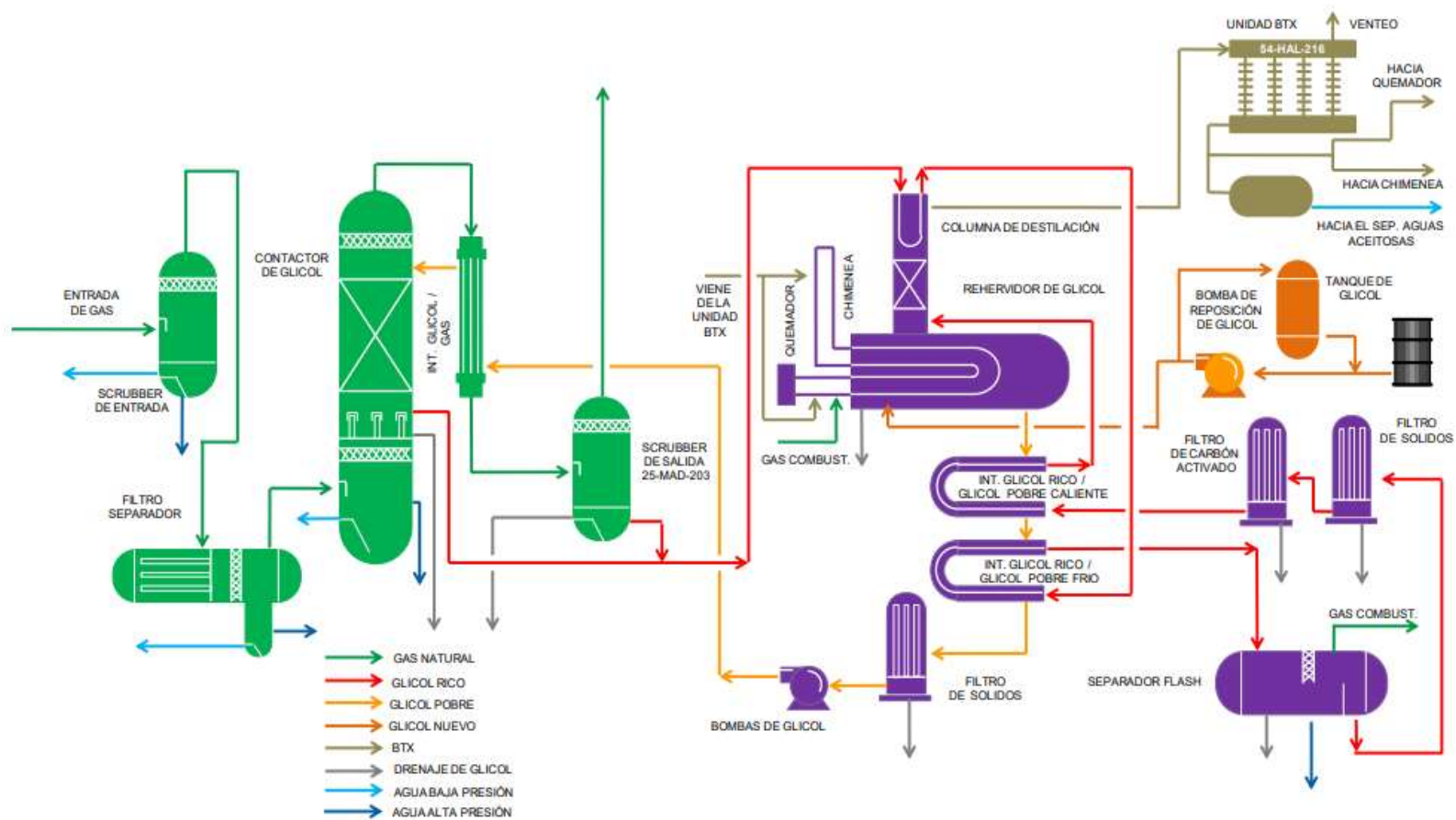
En años recientes algunas unidades han sido empleadas con propilenglicol (PG). El PG es el glicol menos toxico y tiene una baja afinidad con aromáticos, pero el PG tiene una presión de vapor más alta que el TEG, y un punto de inflamación mucho más bajo.

3.2.2 Unidad de deshidratación con glicol. La figura 9, muestra una unidad de deshidratación con glicol TEG típica. Como se puede ver, el gas natural húmedo entra en un separador con el fin de eliminar el agua libre, posteriormente, va a un separador filtro que remueve los hidrocarburos líquidos y trazas de agua libre que el separador anterior no pudo remover. El gas que sale del separador filtro se

alimenta luego en la parte inferior de un contactor donde esté entra en contacto con el glicol con el fin de eliminar el agua disuelta en el gas.

El gas separado anteriormente, se pone en contacto en contracorriente con TEG pobre o libre de impurezas que están normalmente a una temperatura entre 5-10°F por encima de la temperatura a la cual entra el gas, la carga de líquido en la bandeja (GPM por pie cuadrado) es muy baja, debido a la baja relación de líquido y gas. Para evitar la mala distribución de líquidos, se deben utilizar diseños adecuados del contactor ya sea de empaque estructurados o bandejas

Figura 9. Unidad de deshidratación con glicol



Fuente: Tomado de presentación digital, Manuel Cabarcas

El solvente TEG absorberá el contenido de agua, y la remoción depende de la concentración de glicol pobre y la tasa de flujo de TEG. El solvente TEG no absorberá hidrocarburos pesados en ningún grado; sin embargo, eliminará una porción significativa (hasta 20%) de los componentes BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos), ya en este caso, el TEG es llamado glicol rico o cargado con contaminantes.

El BTEX se considera un compuesto orgánico volátil (VOC), que debe incinerarse para cumplir con requisitos de emisiones, esta quema debe hacerse reguladamente y bajo las normas ambientales específicas, ya que un incumpliendo conllevaría a parar la operación y pagar grandes sumas de dinero, además de la reposición ambiental que se debe llevar acabo, es por esto que un sistema de BTEX es diseñado con el fin de reducir las emisiones y los peligros potenciales de los mismos operadores del sistema.

El gas natural seco que sale del contactor pasa a través de un intercambiador de calor con el fin de enfriar la corriente de TEG pobre que viene del rehervidor, para posteriormente pasar a un separador que se encargará de separar el solvente TEG para evitar pérdidas del mismo. Debido a que el caudal de TEG es relativamente bajo, no hay mucho intercambio de calor sensible, por lo tanto, la temperatura del gas seco es casi la misma que la del gas de alimentación. El glicol rico o glicol que sale del contactor contaminado con vapor de agua que fue retirado del gas y con trazas de compuestos BTEX, es enviado a una columna de despojo que normalmente está a una temperatura de 213°F y a presión atmosférica con la finalidad de remover el agua absorbida por el glicol y los compuestos indeseados que se encuentren en este y que finalmente el glicol (TEG) sea regenerado al pasar al rehervidor que se encuentra a la temperatura máxima permitida a la cual el Trietilenglicol no es degradado, normalmente esta temperatura está entre 395-400°F.

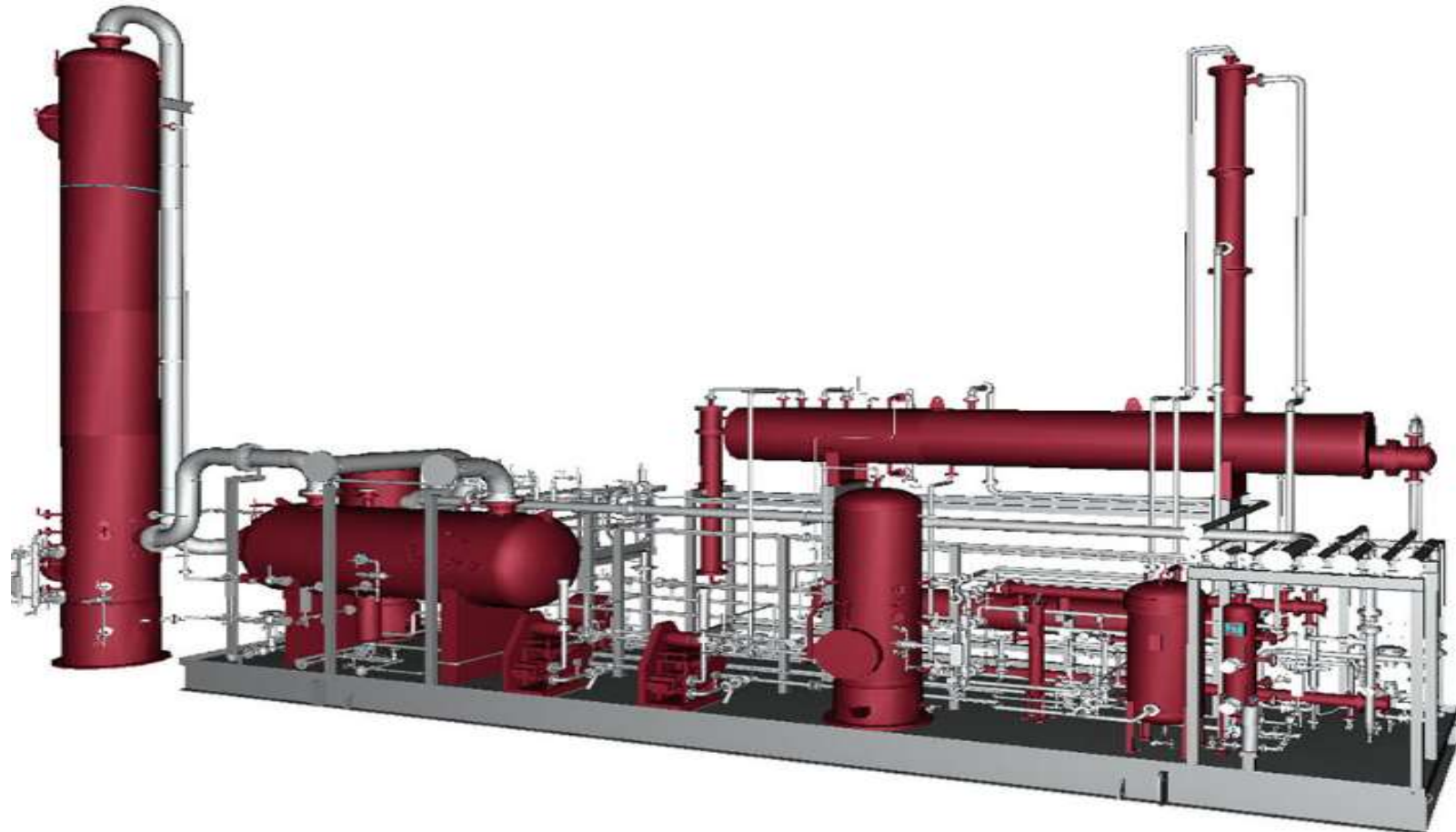
Es necesario tener en cuenta, que los contaminantes del glicol rico dependiendo de su concentración y toxicidad pueden ocasionar daños severos en los equipos, por ejemplo; separadores, intercambiadores de calor, rehervidor, entre otros, estos daños pueden conllevar a costos altos, ya que es necesario detener la operación para poder hacer cambios o reparaciones, por todo esto, dependiendo de qué tan contaminado pueda estar el glicol rico, se utilizan una serie de equipos tales como separador flash, que realizan la separación de hidrocarburos líquidos que fueron acarreados por el solvente durante el proceso de deshidratación y los filtros que permiten remover partículas sólidas y compuestos químicos, condensados etc., antes de que el glicol rico entre en contacto con los tubos de fuego del rehervidor. Estos filtros normalmente son; el filtro de carbón activado y el filtro de sólidos, que serán estudiados posteriormente. “Se debe advertir que los líquidos hidrocarburos pesados deben eliminarse ya que cualquier arrastre provocará la contaminación del equipo de procesamiento y producirá emisiones de carbono severos”.

Aunque se siga un paso a paso del proceso y se realicen mejoras enfocadas en la protección y equilibrio dinámico del sistema, se pueden presentar perdidas de glicol a lo largo de su recorrido, sobretodo en el rehervidor donde se somete al glicol a temperaturas de operación muy cercanas a las de degradación del mismo. Por esto y con el fin de compensar estas pérdidas y evitar reducir la eficiencia de absorción de agua se utilizan bombas de reposición de glicol en puntos estratégicos, en el esquema anterior, se puede observar la inyección de glicol en el rehervidor, aunque muchas veces se encuentra aguas arriba de este equipo.

Aunque en la figura 9 no se observa este equipo, el tanque de surgencia o compensación es uno de los instrumentos más utilizados en un sistema de deshidratación, su ubicación claramente se puede observar en el esquema anterior, en el cual se observa que este equipo se encuentra en la parte inferior del rehervidor, una de las funciones más importantes de este, es recibir el glicol drenado del rehervidor durante reparaciones o inspección del equipo, entre otras funciones

3.2.3 Equipos del proceso

Figura 10. Sistema de deshidratación de glicol en 3D



Fuente: Enerflex oil and gas solution

3.2.3.1 Separador. Sin duda, los mayores problemas operativos en sistemas de deshidratación con glicol son resultado directo de un inadecuado tratamiento del gas de entrada aguas arriba del contactor. El separador aguas arriba debe remover el líquido hidrocarburo, el agua líquida, sólidos, inhibidores de corrosión, etc.

Antes de la unidad de glicol. John Campbell Sr. dice: "No puede permitirse la deshidratación si no pueden colocar un separador efectivo en la entrada de gas"¹⁰. Una unidad de glicol es un sistema cerrado. Los contaminantes no volátiles permanecen en el glicol y deben eliminarse por filtración o purga.

Algunos de los contaminantes más nocivos son la sal y los hidrocarburos de alto punto de ebullición. Estos permanecen en el glicol. La sal precipita en el rehervidor, en la columna de despojo y en los intercambiadores de calor glicol rico-pobre. Esto puede provocar que la obstrucción aumente la caída de presión y disminuya el caudal. En el rehervidor, la sal puede cubrir el tubo de fuego causando puntos calientes y eventual falla del tubo de fuego.

Los hidrocarburos pesados pueden "coquearse" en el rehervidor causando puntos calientes en el tubo de fuego y tapando la columna de despojo y de regeneración. Además, estos hidrocarburos quemados hacen que el glicol se vuelva negro y promueva la formación de espuma en el contactor, y provocan frecuentes cambios de filtros. Si hay compuestos de azufre en el gas, estos pueden combinarse con los hidrocarburos pesados para formar un "lodo" corrosivo que se acumula en el sistema. Ciertamente, un separador de tamaño adecuado es el primer paso para evitar el arrastre de líquidos no deseados. Muchas unidades también utilizan separadores de filtro coalescentes y / o sobre - calentadores aguas abajo del separador primario. Con frecuencia, un intercambiador de calor diseñado para aumentar la temperatura del gas en 5°C [9 °F] se instala inmediatamente aguas

¹⁰ CAMPBELL, J. M. John Campbell - Gas Conditioning and Processing - Vol 2. 1984

arriba del contactor. Esto sirve para vaporizar las partículas líquidas arrastradas en el gas.

Muchos diseños utilizan un separador integral (depurador) instalado en la base del contactor. Si bien esto puede proporcionar una cierta eliminación de las partículas arrastradas, estos "depuradores" son típicamente de tamaño inferior, particularmente cuando el contactor está diseñado de empaque estructurado. Estos separadores integrales nunca deben usarse como separador primario, solo como separador secundario.

Un separador es un dispositivo mecánico que puede ser trifásico, bifásico o tener características de filtros para separaciones más complejas, estos, permiten la separación de dos o más fluidos a través de mecanismos gravitacionales, centrífugos, coalescedor etc. El separador está compuesto como se puede observar en el esquema () por cuatro partes principales:

- Deflector de entrada.
- Sección de asentamiento gravitacional.
- Extractor de niebla.
- Sección de asentamiento de líquido.

Figura 11. Separador horizontal



Fuente: <https://ventura3d.blogspot.com>

3.2.3.2 Contactor de glicol. Un contactor de Glicol es una torre empacada o de platos según su configuración donde el gas saturado se pone en contacto con el glicol. El glicol que llega a la torre del contactor por la parte superior va bajando a medida que llena los platos o bandeja de burbujeo, mientras tanto el gas que sube entra por la parte inferior del absorbedor y se pone en contacto con el glicol que baña los platos, rompe el sello líquido y sale a la superficie para entrar nuevamente en contacto íntimo con el glicol de la bandeja superior, cuando el gas natural burbujea en el líquido se va produciendo una transferencia de masas, en el cual se le entrega el agua de la corriente de gas al solvente TEG.

Figura 12. Contactor de glicol



Fuente: KIRK process solutions

3.2.3.3 Rehervidor. El rehervidor es un equipo que opera a presión atmosférica y es usado para generar altas temperaturas en el fondo, tiene un condensador en la cima con el fin de eliminar la cantidad de agua y gases contaminantes de la corriente de entrada, de esta manera en el fondo se obtendrán composiciones de glicol más puras según requerimiento. Es en este equipo donde el TEG es purificado para que llegue a las condiciones óptimas al contactor y de esta manera se realice la deshidratación correcta del gas de entrada, en el caso en que haya limitantes de temperatura por degradación del TEG como se había dicho anteriormente se puede ingresar en el rehervidor una cantidad de Gas stripping o de regeneración según requerimientos de deshidratado. De igual forma en este equipo se eliminan componentes ácidos o de efecto invernaderos según la composición del gas de entrada, por lo tanto, es necesario aguas abajo del mismo utilizar equipos que permitan tratar estos gases de manera correcta y llevarlos a condiciones de TEA o quema sin afectar el medio ambiente.

Figura 13. Rehervidor



Fuente: Gas Processing & LNG; Technology and business information for the global gas Processing Industry

3.2.3.4 Bomba. La bomba es una maquina generadora de energía que trasforma la energía cinética en energía potencial, entregando así un fluido con una presión más alta aguas abajo de la misma. En el diseño se utilizaron dos bombas, una es utilizada para aumentar la presión del TEG pobre hasta las condiciones de presión de entrada al Contactor y la segunda bomba se utiliza como bomba de reposición de glicol.

Figura 14. Bomba booster



Fuente: CaC systems

3.2.3.5 Intercambiador de calor. Este es el intercambiador de calor básico. Su eficiencia tiene un efecto directo sobre la carga de calor del rehervidor. El glicol rico del absorbedor ingresa a una temperatura de 5-13°C [9 – 23°F] más caliente que el gas de entrada debido al calor del condensador de reflujo. El glicol pobre del regenerador entra generalmente a aproximadamente 204°C[400 °F]. El intercambiador está diseñado para que la temperatura del glicol pobre no sea mayor que 60-65°C [140 – 149 °F].

Figura 15. Intercambiador de calor



Fuente: Tomado del software de diseño HYTEG

En la mayoría de los casos, es deseable un aumento de 15-20°C [27 – 36 °F] en el intercambiador de calor. Si es demasiado alto, aumentarán las cargas de calor en el rehervidor y en el enfriador de glicol. Un intercambiador de calor, es un equipo en el cual se presenta un intercambio de calor entre dos fluidos con el fin de llevar uno de ellos a condiciones de temperatura más altas o más bajas. Este es uno de los equipos más utilizados en estos procesos en los que hay fluidos a temperatura muy alta y no pueden llegar a esas condiciones a ciertos equipos del sistema. El mecanismo principal de transferencia de calor en los intercambiadores de calor es el de convección. También existe transferencia de calor por conducción en la pared del tubo, pero debido al bajo espesor del tubo su efecto no es muy apreciable en el proceso.

También existe transferencia de calor por conducción en la pared del tubo, pero debido al bajo espesor del tubo su efecto no es muy apreciable en el proceso.

3.2.3.5 Filtros. La buena filtración es crítica. Se prefiere el tipo de flujo completo. Se recomienda dos filtros en paralelo, sin líneas de derivación o bypass, para garantizar una filtración completa.

Es preferible un elemento fabricado de tela que sea capaz de reducir sólidos a aproximadamente 100 ppm en peso. Los elementos de papel y fibra de vidrio generalmente dan resultados insatisfactorios. El tamaño del filtro en un sistema de glicol correctamente operado debe ser 5-10 μm . Se pueden requerir tamaños más grandes (25 – 50 μm) durante el inicio y servicios donde se espera suciedad.

Puede ser imposible juzgar la efectividad de la filtración solo por el color. Incluso el glicol bien filtrado a menudo es negro. Pero, la eliminación de la mayoría de los sólidos reducirá la corrosión, el taponamiento y los depósitos en el rehervidor, y puede reducir las pérdidas por espuma. Una buena filtración es crítica para un desempeño satisfactorio. Es deseable medir la presión diferencial a través del filtro y cambiar los elementos cuando se alcanza el máximo ΔP recomendado por el proveedor del filtro, que a menudo es 170kPa [25 *psi*].

A menudo se recomienda el uso de un purificador de carbono aguas abajo del filtro. Esto puede producir esencialmente agua-glicol blanco. El mantenimiento de este color ha demostrado ser deseable porque tiende a aumentar la eficiencia de deshidratación y minimizar la formación de espuma, la cual es una fuente importante de pérdida de glicol.

Los hidrocarburos aromáticos están a menudo presentes en el glicol rico que entra al regenerador y son absorbidos en el filtro de carbono. Estos componentes alcanzarán rápidamente la carga de equilibrio en el filtro de carbón, aunque es

probable que finalmente sean desplazados (en cierta medida) por hidrocarburos más pesados. Debido a este alto contenido aromático, el cambio de filtros de carbón requiere precauciones especiales para evitar la exposición innecesaria de los trabajadores a los componentes BTEX.

En algunas unidades, el filtro de carbón se instala en la corriente de TEG pobre, aguas arriba del contactor, para evitar una carga aromática significativa.

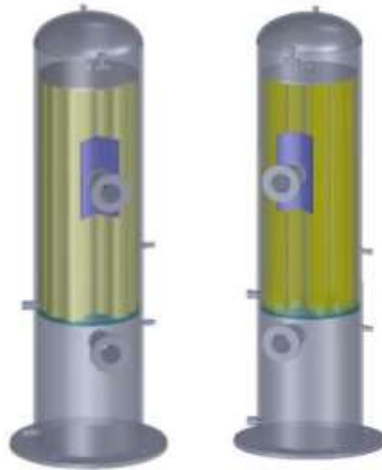
El carbón activado a base de carbón debe usarse ya que el carbón a base de madera tiende a descomponerse cuando está en uso. Este carbón puede colocarse en un recipiente metálico o instalarse como relleno en un recipiente. En cualquier caso, se necesitan buenas pantallas para evitar la pérdida de carbono en el sistema. Las partículas de carbono, al igual que el sulfuro de hierro, tienden a promover una espuma estable.

Los filtros de glicol solo son efectivos cuando se usan. En sistemas de glicol especialmente sucios, los filtros a menudo se omiten para evitar el cambio frecuente de filtro. Los problemas con esto deberían ser obvios. Si el taponamiento del filtro es excesivo, pruebe con un tamaño de filtro más grande y busque la fuente del problema (por ejemplo, mala separación de la entrada, degradación, productos de corrosión, etc.).

➤ **Filtros de sólidos**

Los filtros son equipos que remueven los sólidos contaminantes del glicol con tamaños iguales o mayores de 5 micrones. Evitan que los sólidos ingresen al rehervidor donde pueden formar costras e incrustaciones sobre el tubo de fuego.

Figura 16. Filtro de solidos



Fuente: Tomado del software de diseño HYTEG

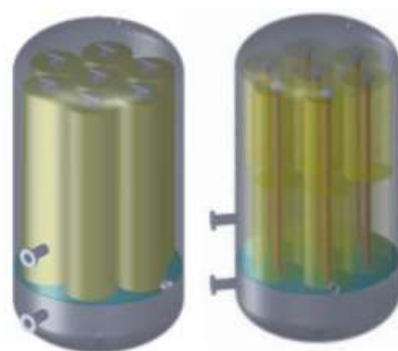
Parámetros operacionales

Los filtros están diseñados para una pérdida de presión de 3 a 6 psi y de cambio de los elementos filtrantes en 15 a 25 psi.

➤ Filtros de carbón activado

Remueven condensados, surfactantes, químicos de tratamiento, productos de degradación del TEG e impurezas químicas.

Figura 17. Filtros de carbón activado



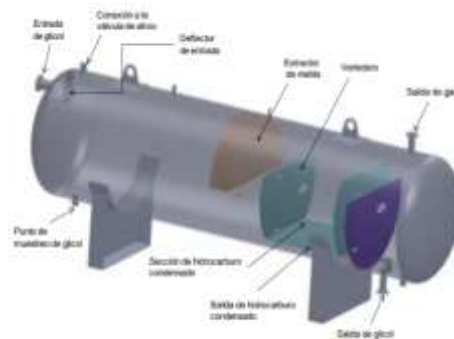
Fuente: Tomado del software de diseño HYTEG

Parámetros operacionales

Funcionan con el 100% del flujo del glicol rico.

3.2.3.6 Separador Flash. Este equipo, tiene el propósito de separar en tres fases la corriente de glicol rico que viene del contactor: en fase gaseosa, hidrocarburos condensados y TEG rico. Normalmente se ubica aguas arriba del rehervidor con el fin de que el glicol rico entre al equipo con trazas o totalmente libre de algunos contaminantes acarreados, en este caso (Hidrocarburos condensados y componentes gaseosos).

Figura 18. Separador flash



Fuente: Tomado del software de diseño HYTEG

Parámetros operativos

Este separador de tres fases tiene un tiempo de retención de líquidos de 20-30 minutos. Sus condiciones óptimas de operación son 100-150 °F y 50-75 psig. Según el tipo de diseño, la separación suele ser más eficiente, por ejemplo, con separadores horizontales se obtienen separaciones más eficientes.

3.2.3.7 Tanque Surge. Este equipo, cumple varias funciones en el sistema de deshidratación, como se había mencionado anteriormente, además de hacer las veces de almacenador de glicol, este proporciona:

Figura 19. Tanque de surgencia



Fuente: Tomado del software de diseño HYTEG

- Tiempo entre adiciones de glicol “Reposición de glicol”
- Tiempo de retención de 20 minutos entre los niveles bajo y normal
- Permite la adición de química para el control de PH, además de inhibidores de corrosión.

Este equipo al igual que las condiciones de calidad de salida del gas seco del contactor, permite determinar si el sistema está funcionando correctamente y si no se están presentando problemas de espumas o pérdidas de glicol durante el proceso, esto es posible observarlo en el tanque de surgencia monitoreando el nivel de glicol, ya que, si este nivel está muy bajo o empieza a disminuir gradualmente, será señal de pérdidas de glicol, de igual forma, si no es sencillo determinar el nivel de glicol en el tanque de surgencia debido a volúmenes fantasma, como por ejemplo un aumento acelerado del volumen de glicol, será una señal de problemas de espumas y se determinará el paso a seguir para las respectivas correcciones de mejora.

3.2.3.8 Unidad BTEX

Figura 20. Unidad BTEX



Fuente: Tomado de presentación digital, Manuel Cabarcas

A nivel mundial, el aumento del cambio climático es uno de los problemas más preocupantes y severos que se han vivido en los últimos años, debido a esto nuevas reglamentaciones han surgido con el fin de controlar las actividades que causan efectos negativos en el medio ambiente y por tanto en toda la sociedad, ante esto, las empresas que trabajan a nivel industrial, comercial o de servicios deben no solo mantener una actividad o proceso adecuado y seguro si no que deben velar por el control y mitigaciones de daños medio ambientales. Unas de estas reglamentaciones están centradas en la disminución de la emisión de gases de efecto invernadero, que son uno de los principales problemas que están causando fuertes daños a la capa de ozono. Este problema requiere atención cuidadosa en la fase de diseño. Las consideraciones ambientales impulsan cada vez más la selección y operación de los equipos de proceso. En algunos casos, el uso de una unidad desecante seca (aunque con un costo de capital y de operación más alto)

puede ser una alternativa de menor costo al glicol dado el impacto ambiental de estas emisiones de BTEX.

La afinidad de los aromáticos por el TEG es bastante reconocida. El proceso UDEX fue usado por muchos años en refinerías y plantas químicas para extracción de hidrocarburos aromáticos de parafinas con TEG. En los servicios de deshidratación de gas, el TEG absorbe cantidades limitadas de hidrocarburos aromáticos (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) del gas. Estos componentes a menudo se abrevian como BTEX. La cuantificación de los niveles de absorción se ha vuelto más importante en los últimos años debido al aumento de restricciones de las emisiones aromáticas de las unidades de glicol.

En este tipo de procesos industriales, según las características del gas producido o de entrada al proceso, se van a presentar una serie de efectos sobre todo a la hora de tratar el TEG y regenerarlo ya que se van a desprender componentes como CO₂, H₂S, Benceno, Tolueno, Xileno, entre otros compuestos que son tóxicos y dañinos a nivel socio ambiental. Anteriormente, los operadores estaban expuestos al venteo de estos componentes dañinos y muchas enfermedades se presentaban por esta exposición, sin embargo, hoy día se han implementado diferentes tecnologías que mitigan la exposición a estos componentes y que permiten controlar el venteo de estos al medio ambiente. Una de estas es la unidad BTEX, que consta de un sistema de condensación y un separador, la función de la unidad es retener estos compuestos, llevando unos hacia el separador, para posteriormente disponer en piscinas los componentes líquidos, otros van hacia el quemador y otros hacia venteo (Según especificaciones).

Los niveles de absorción pronosticados para los componentes BTEX varían de 5-10% para benceno y 20-30% para etilbenceno y xileno. La figura 21 muestra porcentajes de absorción aproximados para los componentes BTEX frente a las tasas de circulación del TEG y la temperatura del contactor a 6900 kPa [1000 psia].

La figura 22 se regeneró utilizando el simulador de procesos *PROSIM*[®]. Se favorece la absorción a temperaturas más bajas, aumento en concentración de TEG y tasa de circulación. La presión no tiene un fuerte efecto sobre la absorción aromática. La absorción en realidad puede disminuir a una presión más alta debido al comportamiento retrógrado.

La mayor parte de los aromáticos absorbidos se ventean con el vapor de agua en el tope del regenerador. En algunos casos, estos aromáticos pueden condensarse y recuperarse, sin embargo, la eficiencia de la condensación disminuye rápidamente con el aumento de las tasas de gas de regeneración. En estos casos, muchos operadores usan un condensador parcial para condensar el agua y enviar los hidrocarburos volátiles a un incinerador o al rehervidor como combustible. La contrapresión en el regenerador puede minimizarse mediante el uso de un eductor (que a menudo es la válvula de gas combustible en el rehervidor) o por un condensador enfriado por agua con pendiente descendente.

Otra medida de mitigación que parece prometedora es quitar el aromático del TEG con una pequeña corriente de gas de regeneración en el tanque de desgasificación o Flash Tank. Los vapores de regeneración están entonces a una presión suficientemente alta para permitir el reciclaje a un compresor o su uso en un sistema remoto de gas combustible. Otros han propuesto utilizar membranas o carbón activado, pero estos métodos no han demostrado ser comerciales.

Figura 21. Absorción aproximada de BTEX en el TEG

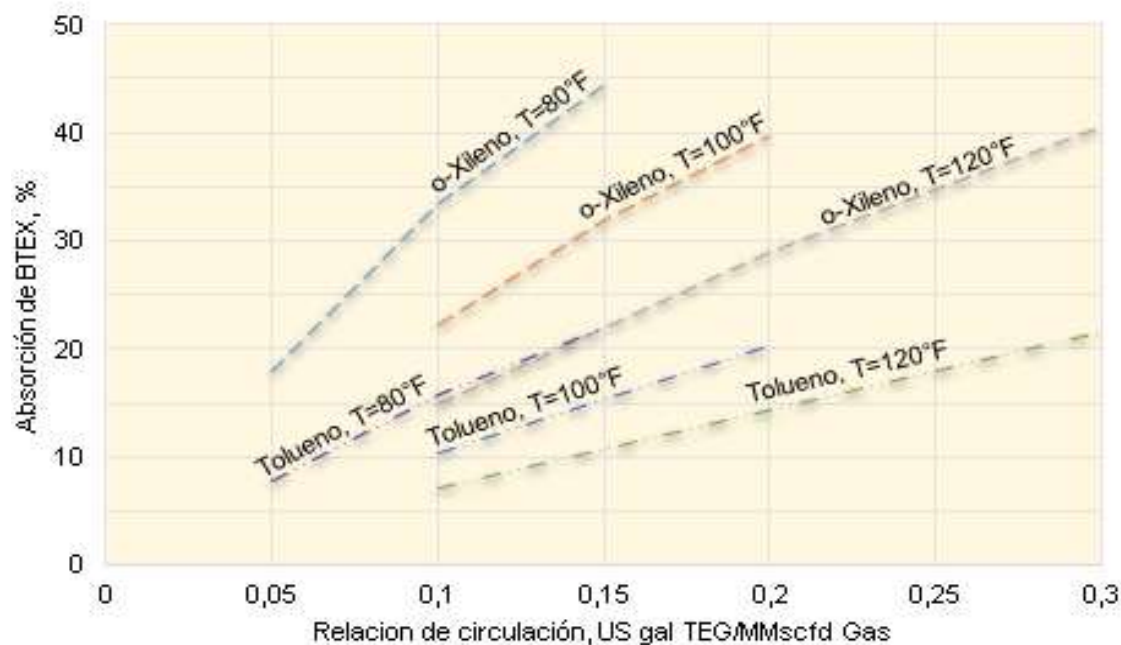
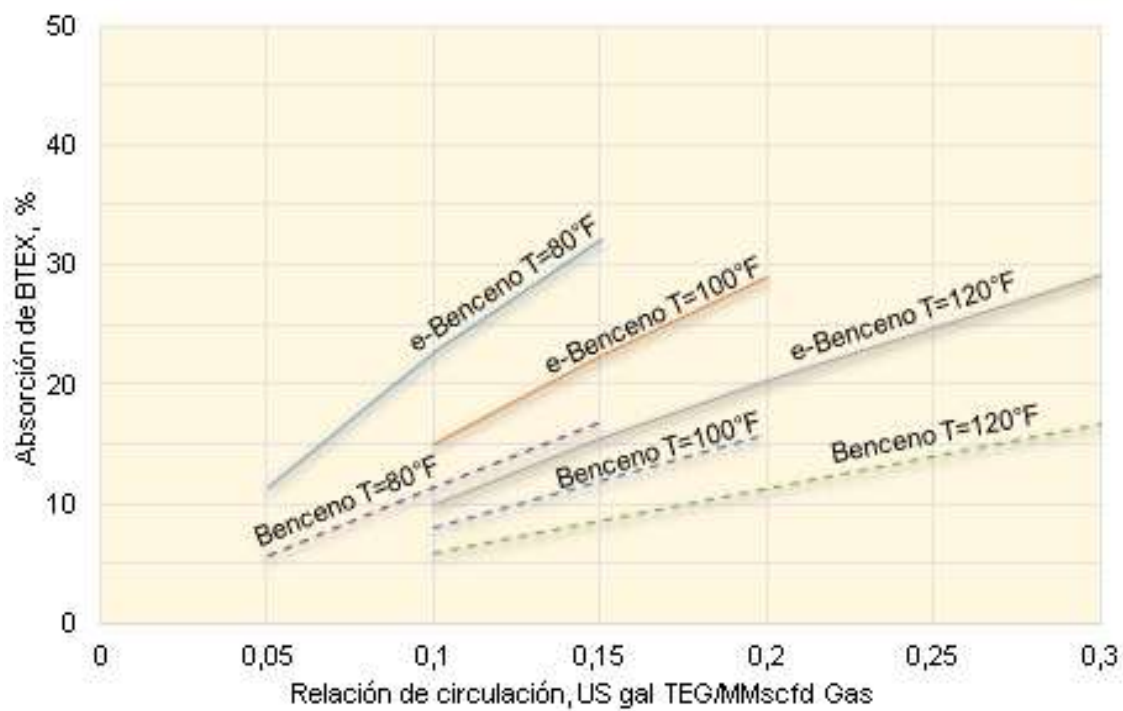


Figura 22. Absorción aproximada de BTEX en el TEG



3.2.4 Factores básicos de diseño del proceso. Todos los factores que controlan el comportamiento de los sistemas de absorción también se aplican para la deshidratación con TEG. De hecho, desde el punto de vista del proceso, el sistema de deshidratación utilizando TEG como solvente es uno de los procesos de absorción más simples que se emplean en la industria del petróleo. Para diseñar adecuadamente una unidad, se necesita conocer los siguientes factores de diseño;

- + Máximo y mínimo caudal de gas
- + Máxima y mínima temperatura y presiones la composición del gas y
- + El punto de rocío del agua requerido o el contenido de agua del gas de salida.
- + Composición del gas

De estos factores se pueden calcular los siguientes parámetros claves:

- + La mínima concentración de TEG en la solución pobre que entrará en el tope del contactor requerida para cumplir con las especificaciones de salida de agua en el gas.
- + La tasa de circulación de TEG pobre requerida para remover “absorber” la cantidad necesaria de agua del gas para cumplir con la especificación del contenido de agua del gas de salida.
- + La cantidad de contactos o platos en el absorbedor, requeridos para producir el acercamiento necesario para obtener el equilibrio requerido en el numeral (1) a la velocidad de circulación elegida.
- + La eficiencia de remoción de agua.

Para obtener estas respuestas, es necesario, tener una correlación de equilibrio Vapor-líquido para un sistema TEG-agua. A partir de estos datos básicos de entrada, se puede evaluar o dimensionar equipos y desarrollar especificaciones mecánicas.

Estos se convierten en los cuatro parámetros claves para el diseño de una unidad TEG, aunque muchos otros también son importantes tales como, temperatura de

entrada al contactor, temperatura del rehervidor, etc. Normalmente para un sistema de deshidratación de este tipo, las relaciones de recirculación más utilizadas están entre un intervalo de (2 a 5 Galones de TEG/ lbm agua absorbida).

En el caso del número de etapas, según el diseño del contactor el número de etapas (Platos) o metros de empaque más utilizados son:

✚ 1 a 3 etapas teóricas

✚ 4 a 12 platos reales / 2 a 6 metros de empaque

Parámetros como concentración de TEG pobre y tasa de circulación de TEG deben ser monitoreados y controlados ya que son claves para mantener la eficiencia de remoción de agua en condiciones óptimas. Una concentración de TEG pobre bajo, por ejemplo, valores inferiores al 98,7% en peso de TEG pobre no removerá la misma cantidad de agua que una concentración de TEG pobre más puro (Ej. 99,92% en peso o más). Lo que significa que, el TEG rico que entra al rehervidor debe regenerarse a condiciones tales que cumplan los niveles de concentración según las condiciones especificadas de cantidad de agua en el gas de venta.

Como anteriormente se había citado, muchos problemas operacionales se pueden presentar a lo largo del proceso, tema que será tratado en profundidad posteriormente.

Estos problemas operacionales son observados en algunos equipos con mayor facilidad, como por ejemplo en el tanque de surgencia, en la salida del gas seco del contactor, en la concentración de TEG pobre que llega al contactor, entre otros puntos estratégicos.

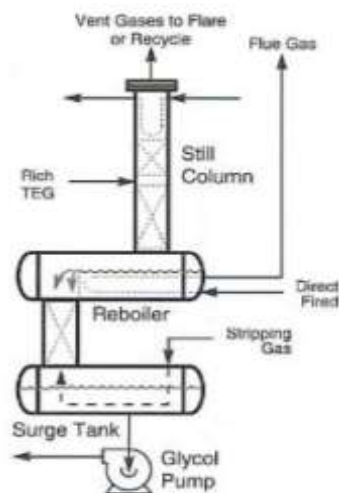
En este caso, tomaremos como referencia el gas de venta (Gas que sale del contactor después del proceso de deshidratación). Es claro que, antes de diseñar la planta de deshidratación se deben calcular los parámetros de diseño

mencionados, teniendo en cuenta que estos son dependientes principalmente de la calidad con la que el gas de venta saldrá del contactor, al final, es este el objetivo principal de todo el sistema y el que rige la eficiencia del mismo.

Con el fin de corregir o realizar operaciones de mejora sin afectar o cambiar el diseño general del sistema, se utiliza una tecnología llamada gas stripping. Es este un parámetro de diseño muy importante a la hora de mantener en equilibrio el dinamismo de la planta, realizando cambios enfocados en mejoras de eficiencia, consumo energético y optimización.

3.2.4.1 Gas Stripping. El gas stripping o gas de regeneración es un gas inerte, deshidratado o gas de combustión, normalmente se utiliza el gas que sale del contactor (Gas seco o de venta).

Figura 23. Proceso de gas stripping



Fuente: CAMPBELL, J. M. John Campbell - Gas Conditioning and Processing - Vol 2, 337 1984

Este gas puede introducirse directamente en el rehervidor o en una columna empacada entre el rehervidor y el tanque de surgencia. Se debe tener en cuenta

que si el gas stripping se introduce en el rehervidor se requiere una tubería de distribución de fondo.

Se requieren pequeñas cantidades de este gas, por tanto, son mayores los beneficios a nivel operativo en la planta que el costo que representa este para el proceso.

Normalmente las máximas tasas de gas stripping están en el orden de 10 SCF/gal a menos que se requieran concentraciones de TEG pobre del orden del 99,99%. En peso. En estos casos, se deben implementar otras tecnologías.

➤ **Beneficios del Gas stripping**

La concentración de TEG pobre es uno de los parámetros operativos más importantes como ya antes se había mencionado. Este parámetro depende principalmente de la temperatura de regeneración a la que es sometido en el rehervidor, ejemplo:

Aumento de la temperatura del rehervidor, representa aumento de la concentración de TEG pobre. Sin embargo, no se puede dejar de lado que el glicol utilizado en el proceso es el Trietilenglicol el cual tiene especiaciones operativas máximas de trabajo, como, por ejemplo, la temperatura máxima de descomposición que es 404°F, la cual no se debe sobrepasar en el rehervidor. Normalmente la temperatura de trabajo en el rehervidor es 395°F, ya que, si se trabaja a la temperatura máxima o se sobrepasa la temperatura de descomposición, puede causar degradación del TEG cuando este se pone contacto con las paredes del equipo.

Diminución de la temperatura del rehervidor, representa disminución en la concentración de TEG pobre, es decir menos pureza y por tanto menos eficiencia

de absorción de agua, sin embargo, la capacidad energética utilizada por el rehervidor y por el sistema se beneficia notablemente.

A nivel operativo, un cambio en la temperatura de operación del rehervidor no sería una dificultad, sin embargo, surgen preguntas como; ¿Es factible económicamente admitir descomposición de glicol al sobrepasar o mantener la temperatura máxima de descomposición, solo por obtener un glicol más puro?; en este caso, la respuesta es No, por varias razones; 1) Al aumentar la temperatura del rehervidor los requerimientos de energía son muy altos y por lo tanto el equipo va a trabajar sobrecargado, 2) Las pérdidas de glicol por descomposición son muy altas, lo que llevaría a tener que reponer una cantidad de glicol muy elevada, conllevando esto a gastos excesivos de dinero y a riesgos operativos en la planta, por fallas de bombas u otros equipos, 3) Aunque, se opere el rehervidor a la temperatura máxima de descomposición de TEG, las concentraciones de glicol pobre máximas alcanzadas según los cálculos de diseño basados en la data de equilibrio de Parrish, citado en el libro (Campbell Vol.2) en este tipo de plantas es 98,7% en peso a presión atmosférica y una temperatura de 404°F. Las concentraciones de 98,7% y 98,8% en peso son comunes, algunas veces se han encontrado concentraciones del 99,1% en peso, siendo estos casos especiales, ya sea por el ingreso de hidrocarburos que proporciona un stripping natural o por presiones atmosféricas menores de 14,7 psia.

Por lo anterior, la tecnología de gas stripping es una de las tecnologías más utilizadas y eficientes en este tipo de procesos, ofreciendo beneficios como, posibilidad de disminuir los requerimientos de capacidad energética del rehervidor (Trabajar a menor temperatura operativa) y menor tasa de recirculación de TEG obteniendo los mismos resultados de remoción de agua, con solo utilizar Gas stripping. En este caso se realiza una comparación para llegar al mismo valor de contenido de agua sin gas stripping, sin embargo, si es requerido un contenido menor, solo con incrementar la tasa de stripping se puede lograr.

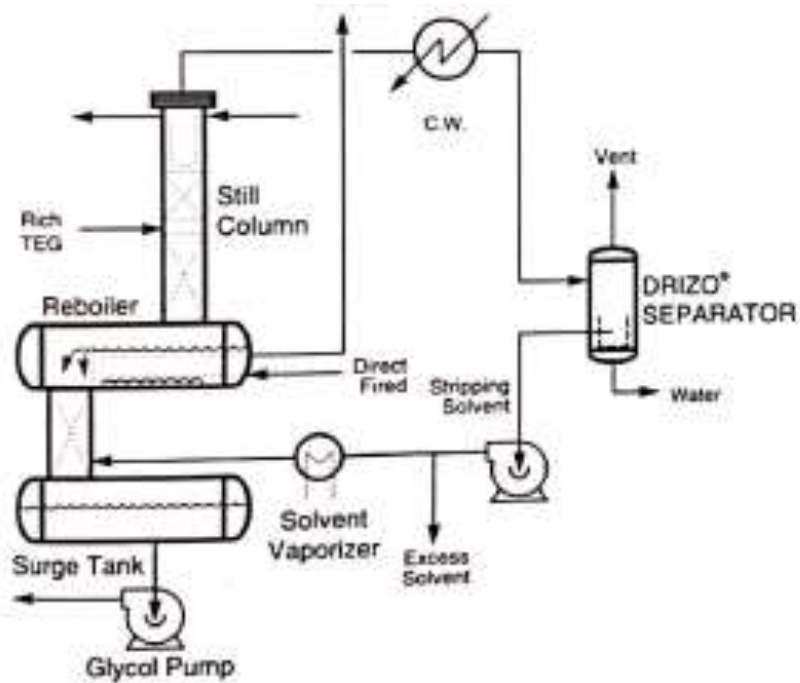
El diseño de una planta de deshidratación es un proceso meticuloso y arduo, ya que requiere que todos los equipos estén equilibrados entre ellos y haya un balance general de cada parámetro operativo. Debido a esto, con el fin de no realizar cambios drásticos que afectan el equilibrio del sistema, otros tipos de tecnologías se han incluido en el proceso. Por ejemplo; en el caso en que la planta esté trabajando con el fin de entregar un contenido de agua en el gas de venta específico y se requiera cambiar este, no es necesario hacer cambios drásticos en los parámetros operativos, solo con incluir gas stripping es suficiente. Aunque se mantengan iguales las condiciones operativas, al incluir tasas prudentes de gas stripping la eficiencia de remoción mejora notoriamente (Alcanzando contenidos de agua muy bajos).

Como toda tecnología tiene sus desventajas ya que la máxima tasa de gas stripping está en el orden de los 10 SCF/gal, de esta manera si se requiere concentraciones de TEG pobre en el orden de los 99,99% en peso, habría que recurrir a otro tipo de alternativas.

3.2.5 Alternativas de regeneración con TEG

3.2.5.1 Proceso DRIZO

Figura 24. DRIZO



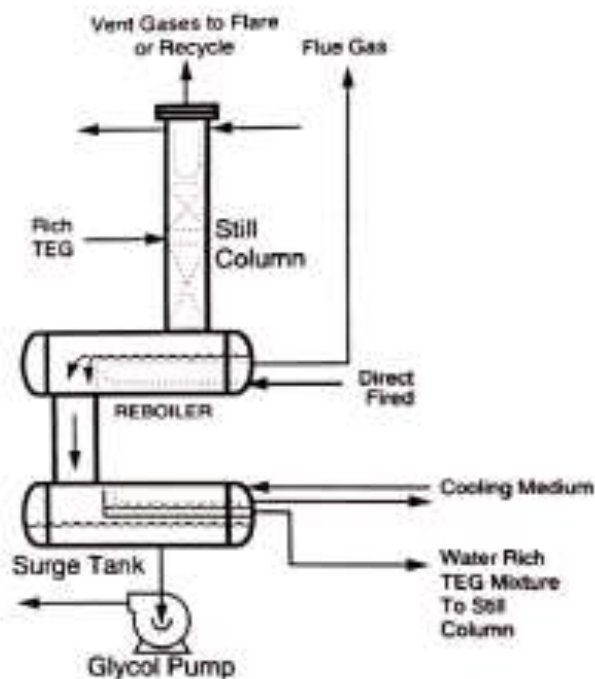
Fuente: CAMPBELL, J. M. John Campbell - Gas Conditioning and Processing - Vol 2, 337 1984

Una segunda alternativa de gas stripping es cerrar el circuito de gas de stripping y usar un material como isooctano, como se muestra en el esquema. Se vaporiza a temperatura del rehervidor, pero puede condensarse y separarse del agua en un separador trifásico. El solvente stripping o de regeneración es entonces bombeado nuevamente al regenerador para completar el circuito de stripping o circuito de mejoramiento de concentración del glicol pobre. Este último vendido bajo el nombre comercial DRIZO®, esta unidad tiene la ventaja de proveer altos caudales de gas stripping con poco o ningún venteo a la atmosfera de hidrocarburos. Con el sistema DRIZO® se han alcanzado concentraciones de glicol superiores al 99,99% en peso.

Este sistema tiene la ventaja de condensar y recobrar hidrocarburos aromáticos desde la cima de la columna de despojo. En la práctica, estas unidades a menudo operan con un solvente stripping estas unidades a menudo funcionan con un disolvente de stripping que no es isooctano sino una mezcla de hidrocarburos aromáticos, nafténicos y parafínicos en el rango $C_5 - C_{10}$.

3.2.5.2 Proceso Coldfinger

Figura 25. COLDFINGER



Fuente: CAMPBELL, J. M. John Campbell - Gas Conditioning and Processing - Vol 2, 337 1984

El esquema muestra una tercera alternativa regeneradora llamada COLDFINGER®, El proceso COLDFINGER® logra el enriquecimiento de glicol al pasar por un medio de enfriamiento (A menudo el glicol rico) a través de unos “dedos” fríos insertados en el espacio de vapor del tanque de compensación o surgencia. Esto condensa

una mezcla de agua-TEG que es rica en agua. Esta tecnología logra la concentración de TEG pobre en el rango de 99,5 a 99,9 % en peso.

Provoca una disminución de la presión parcial de agua en el espacio de vapor del tanque de surgencia y de esta forma aumenta la concentración de glicol.

3.2.6 Problemas operativos. La operación de la unidad de glicol es esencialmente libre de problemas. Ya que muchos de los problemas se derivan de un diseño inadecuado o fallas operativas. La simplicidad básica de la unidad y la disponibilidad de unidades "estándar" tienden a ocultar la necesidad de prestar atención a los detalles de diseño mecánico. Los glicoles son químicamente reactivos y deben protegerse de la contaminación.

Un síntoma común de muchos problemas es la pérdida excesiva de glicol. Esta pérdida se debe a uno o una combinación de lo siguiente:

- + Espumas
- + Degradación
- + Taponamiento por sal en la columna de despojo del rehervidor
- + Inadecuado extractor de niebla en los separadores
- + Inadecuado diseño del contactor para condiciones de flujo
- + Pérdida de glicol por picaduras en un intercambiador de calor de gas-glicol, en la parte superior del contactor o en una bandeja de chimenea en la parte inferior del absorbedor.
- + Derrame de glicol o fuga de la bomba
- + Glicol pobre demasiado caliente en el contactor
- + Inadecuado reflujo (Temperatura demasiado alta en la columna de despojo)

La pérdida excesiva de glicol, se puede presentar severamente si alguno de estos cuatro problemas se encuentre dentro del sistema.

3.2.6.1 Espumas. Al glicol le gusta hacer espuma. Hará espuma cada vez que se lo permita. La espuma normal puede no ser crítica si la unidad está diseñada cuidadosamente. Cualquier espuma tiende a ser más estable cuando están presentes compuestos aromáticos o azufrados. Los sulfuros y sulfitos metálicos, y los productos de degradación, contribuyen al problema. Las espumas solo se rompen usando la superficie, el tiempo o productos químicos. El espacio entre platos debe ser lo suficientemente grande como para que la espuma no pueda llenar el espacio entre estos y formar una fase líquida continua. Un extractor de niebla no rompe la espuma de manera efectiva.

El uso de un agente antiespumante puede reducir el problema. Hay muchos agentes antiespumantes disponibles. Uno que funciona en una unidad puede no funcionar igual de bien en otra. Con frecuencia es necesaria alguna prueba de ensayo y error de un agente antiespumante y la concentración de ese agente.

Evitar la sobredosificación de agente antiespumante; si se agrega demasiado, puede acelerar la formación de espuma. Establecer una política de control cuidadosa para que los operadores mantengan la concentración de antiespumante de la unidad dentro de los límites especificados.

3.2.6.2 Degradación. Parte de la degradación es natural, pero se acelera en presencia de compuestos de oxígeno y azufre. La respuesta es una filtración efectiva. Los productos de degradación contribuyen a la formación de espuma, pero también son fuentes importantes de problemas de corrosión.

3.2.6.3 Sal. La sal es un problema continuo. Una buena separación aguas arriba del contactor es obligatoria. Cualquier sal que llegue al regenerador se deposita en la columna de despojo, el rehervidor o el intercambiador de glicol rico – pobre. Es común que las columnas de despojo empaquetadas se tapen hasta el punto de que el glicol se pierda por encima. Incluso si esto no ocurre, la sal puede precipitarse en

la superficie de transferencia de calor en el rehervidor y causar fallas. No proporcionar una buena separación es imperdonable.

El vapor de agua en el gas es relativamente fresco, pero puede ser ligeramente salino. $NaCl$ es soluble en TEG hasta cierto punto. A los 50°C, aproximadamente 3,3 kg se disolverán en 100 kg de TEG. Entonces, un poco de sal siempre está presente. Una porción de la sal soluble puede hidrolizarse a HCL y reducir el pH del glicol en la torre.

3.2.6.4 Corrosión- Erosión. El glicol puede reaccionar con componentes de azufre. El material resultante tiende a polimerizarse y formar “gunk” (mugre) el cual es muy corrosivo. Además, el pH del glicol se vuelve más bajo. Los inhibidores de corrosión por sí solos no pueden resolver el problema satisfactoriamente. La verdadera solución es un buen diseño mecánico y una buena filtración complementada con un inhibidor de corrosión.

Un buen diseño implica factores como el control de las velocidades de los fluidos, los radios largos y una gran cantidad de pequeños detalles que rara vez se realizan correctamente. En muchos casos, un buen diseño mecánico eliminará la necesidad de costosos aceros de aleación.

Si es factible hacerlo, el pH del glicol debe mantenerse por encima de 6. Algunos se preocupan tanto manteniéndolo a 7 o más que agregan grandes cantidades de cáustico, carbonato de sodio y otros similares a la unidad. El resultado rara vez es satisfactorio. El ajuste del pH es adecuado, pero la cura puede ser peor que la enfermedad si se exagera.

Los inhibidores de corrosión que se depositan en superficies metálicas y forman una película pueden ser efectivos para minimizar la corrosión. El uso juicioso del acero inoxidable también puede ser efectivo para minimizar la corrosión. Esto es

particularmente cierto para la deshidratación de gases con alto contenido de CO_2 . Cuando la presión parcial de CO_2 es alta, el pH del TEG rico puede ser inferior a 5. A menudo es más efectivo usar acero inoxidable en los lados de la unidad que se secan para combatir la corrosión con inhibidores.

En un ambiente corrosivo, la eliminación total de la corrosión es un objetivo poco realista. El objetivo adecuado es reducirlo a niveles económicamente tolerables.

3.3 DESHIDRATACIÓN POR ADSORCIÓN

La deshidratación con glicol o deshidratación mecánica (Refrigeración); es usada en muchas aplicaciones donde la deshidratación de gas natural debe ser llevada a especificaciones de transporte, cumpliendo contenidos de agua de 6 lb agua/MMscf. Sin embargo, hay aplicaciones en las cuales es necesario llevar el gas natural a condiciones más extremas, es aquí donde nace la deshidratación por desecantes secos o deshidratación por adsorción. Estas son algunas aplicaciones de esta alternativa:

- ✚ Deshidratación hasta puntos de rocío de agua menores de -40 a -58 °F, tales como los requeridos en plantas de refrigeración y procesos de licuefacción.
- ✚ Unidades de control de punto de rocío de hidrocarburos donde se requiere la extracción simultánea de agua e hidrocarburos para cumplir especificaciones de ventas.
- ✚ Endulzamiento y deshidratación simultánea del gas.
- ✚ Deshidratación y remoción de compuestos de azufre (H_2S , COS, CS_2 , mercaptanos) para corrientes de LPG y NGL.
- ✚ Deshidratación de gases que contienen H_2S donde la solubilidad del H_2S en el glicol puede causar problemas de emisiones en el regenerador.

La adsorción se describe como el proceso único donde las moléculas del gas son sostenidas sobre la superficie de un sólido debido a fuerzas superficiales. Los adsorbentes se pueden dividir en dos clases: los que deben la "actividad" a la adsorción superficial y la condensación capilar, y los que reaccionan químicamente. La adsorción física requiere el uso de un material adsorbente que probablemente tenga las siguientes características:

- + Gran área de superficie para alta capacidad
- + Poseer "actividad" para los componentes que se eliminarán
- + Tasa de transferencia de masa alta
- + Fácil y económicamente regenerado
- + Buena actividad de retención con el tiempo
- + Pequeña resistencia al flujo de gas
- + Alta resistencia mecánica para resistir el aplastamiento y la formación de polvo
- + Económico, no corrosivo, no tóxico, químicamente inerte y posee una alta densidad aparente "Bulk"
- + No presentar cambios apreciables en el volumen durante la adsorción y desorción, y debe retener el esfuerzo aun cuando esta "Mojado".

Los adsorbentes más comerciales tienen un área superficial de 500 a 800 m^2/g [2 400 000 a 3 900 000 ft^2/lbm]. Una libra se puede sostener fácilmente en sus manos, Esta área excepcionalmente grande solo se logra produciendo un material con una gran superficie interior resultante de capilares o un tipo de red de malla cristalina. La superficie exterior de las partículas es casi despreciable.

Los materiales que cumplen los requisitos anteriores se pueden dividir en varias categorías generales:

- + **Bauxita** - mineral natural compuesto principalmente de Al_2O_3 .
- + **Alúmina** - una versión más pura y fabricada de bauxita.
- + **Geles** - compuesto en gran parte de SiO_2 o alúmina gel; fabricado por reacción química.

✚ **Tamices moleculares**- un alumino-silicato de calcio y sodio (Zeolita).

✚ **Carbón** - un producto de carbono tratado y activado para tener capacidad de adsorción.

(Solo se enumeran aquellos materiales comúnmente utilizados para el tratamiento a granel).

Todos menos el carbono, son utilizados para la deshidratación. El carbono tiene propiedades deseables para la eliminación de hidrocarburos y la adsorción de ciertas impurezas, pero posee una capacidad de agua insignificante.

3.3.1 Desecantes comerciales. Los diversos desecantes comerciales se pueden dividir en tres amplias categorías; geles, alúmina y tamices moleculares. Dentro de cada uno hay una serie de nombres comerciales.

La alúmina es una forma hidratada de óxido de aluminio (Al_2O_3). Cuando se fabrica es esencialmente libre de hierro. En su estado natural (bauxita) contiene diferentes niveles de hierro. Se activa al expulsar parte del agua adsorbida en la superficie.

El gel es un sólido granular, amorfo. El gel de sílice es el nombre genérico de un gel fabricado a partir de ácido sulfúrico y silicato de sodio. Es esencialmente 100% de dióxido de silicio (SiO_2). Otros geles como el gel de alúmina pueden ser en gran medida una forma de Al_2O_3 . Otros desecantes de tipo gel son alguna combinación de estos dos.

Los tamices moleculares son aluminosilicatos cristalinos de metal alcalino muy similares a las arcillas naturales. Los tamices moleculares 4A están compuestos de Na_2O_3 , Al_2O_3 y SiO_2 . Los tipos 3A y 5A son producidos por el hierro intercambiado de aproximadamente el 75% de los iones Na por los iones potasio y calcio, respectivamente. El tipo 10X se produce a partir de 13X mediante la extracción de

iones de aproximadamente el 75% de los iones Na por iones Ca. Todos los tipos tienen un pH de aproximadamente 10 y un área estable en el rango de pH de 5-12. La afinidad por el agua se basa en el entorno anterior. Sin embargo, la polaridad de la molécula de agua también juega un papel importante.

Los tamices moleculares tienen cargas eléctricas en la superficie interna de las cavidades de cristal que son atraídas por cargas similares en las moléculas polares. Dichas moléculas, incluyendo sulfuro de hidrógeno, amoníaco, monóxido de carbono, la metilamina y los alcoholes se adsorben con preferencia a las moléculas no polares. Del mismo modo, los tamices moleculares muestran una preferencia por los hidrocarburos "insaturados", en los que algunos de los átomos de carbono están unidos por enlaces químicos dobles o triples. Esto se debe a que estos compuestos contienen electrones débilmente unidos que les dan características polares similares a las de las moléculas de agua. Por ejemplo, si es pasada una corriente mixta de etano (un hidrocarburo saturado) y etileno (un hidrocarburo insaturado) a través de un lecho de tamiz molecular, el ochenta por ciento de las moléculas adsorbidas serán etileno.

Los tamices de tipo A tienen una estructura de zeolita cristalina que consiste en huecos intracristalinos. Toda adsorción tiene lugar en estos vacíos. Los huecos tienen un diámetro de 11,4 Å y se conectan mediante un diámetro teórico de 4,2 Å (diámetro de poro). El diámetro efectivo de los poros está determinado por el catión y su posición en la estructura. El diámetro máximo de las moléculas que pueden entrar en la estructura cristalina y ser absorbidas son las siguientes:

Tabla 9. Máximo diámetro de moléculas adsorbidas

Tipo	Diámetro de la molécula Å
3A-Zeolita de potasio	3
4A-Zeolita de sodio	4
5A-Zeolita de calcio	5

Tipo	Diámetro de la molécula Å
10X-Zeolita de calcio	8
13X-Zeolita de sodio	10

Los tamices tipo X se diferencian del tipo A en el carácter interno de la estructura cristalina. Sus características de adsorción son las mismas. El tipo X puede adsorber todas las moléculas adsorbidas por el tipo A con una capacidad algo mayor. El 13X puede adsorber moléculas grandes como mercaptanos pesados y aromáticos.

La capacidad selectiva de los tamices de moléculas para diferentes tamaños de moléculas es importante. Hasta cierto punto, uno puede excluir esos tamaños demasiado grandes para entrar en el cristal. Esta es la razón por la cual se puede usar un tamiz 3A o 4A para secar. Los tamices también se usan a altas temperaturas porque su capacidad no disminuye tanto como el gel o la alúmina por encima de 38 °C [100 °F]. La siguiente tabla () resume las características de estos.

La mayoría de los proveedores de tamices moleculares también ofrecen tipos especiales de tamices para aplicaciones únicas. Algunos de estos se enumeran a continuación:

- ✚ Los tamices 5A, comúnmente utilizados para la eliminación de trazas de compuestos de azufre del gas natural, se fabrican para minimizar la formación de COS.
- ✚ Los tamices 4A, comúnmente utilizados para la deshidratación de gas natural, se fabrican para aumentar la capacidad de eliminación de CO₂ del desecante para aplicaciones de LNG.
- ✚ Tamices resistentes a los ácidos, para la deshidratación de gas natural que contiene altas concentraciones de gas ácido (H₂S + CO₂).

Tabla 10. Características básicas de tamices moleculares

Tipo Básico	Diámetro nominal del poro (Angstroms)	Forma disponible	Capacidad de equilibrio en el agua (% en peso)	Moléculas adsorbidas	Moléculas excluidas	Aplicaciones
3A	3	Polvo Píldoras de 1/16" Píldoras de 1/8" Perlas de 1/16" Perlas de 1/8"	23 20 20 20 20	Moléculas con un diámetro efectivo menor de 3 Angstroms, incluyendo H ₂ O y NH ₃	Moléculas con un diámetro efectivo mayor de 3 Angstroms, ejemplo: Etano	Secado de olefinas, Metanol, etanol y gas natural
4A	4	Polvo Píldoras de 1/16" Píldoras de 1/8" Perlas de 1/16" Perlas de 1/8" Malla 14 x 30	28,5 22 22 22 22 22	Moléculas con un diámetro efectivo menor a 4 Angstroms, incluyendo etanol, H ₂ S, CO ₂ , SO ₂ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ y C ₃ H ₈	Moléculas con un diámetro efectivo mayor de 4 Angstroms, ejemplo: Propano.	Secado de gas natural, remoción de H ₂ S
5A	5	Polvo Píldoras de 1/16" Píldoras de 1/8" Perlas de 1/16" Perlas de 1/8"	28 21,5 21,5 21,5 21,5	Moléculas con un diámetro efectivo menor de 5 Angstroms, incluyendo n – C ₄ H ₉ OH n – C ₄ H ₁₀ , C ₃ H ₈ – n – C ₂₂ H ₄₆ , R – 12.	Moléculas con diámetro efectivo mayor de 5 Angstroms, ejemplo: compuestos iso y todos los anillos de 4 carbonos.	Separa parafinas normales de cadenas ramificadas e hidrocarburos cíclicos a través de un proceso de adsorción selectivo, remueve H ₂ S y mercaptanos ligeros.
10X	8	Polvo Píldoras de 1/16" Píldoras de 1/8" Perlas de 1/16" Perlas de 1/8"	36 28 28 28 28	Iso-parafinas y olefinas, C ₆ H ₆ , moléculas con un diámetro efectivo menor de 8 Angstroms	Di-n.butilamina y mayores	Separación de hidrocarburos aromáticos
13X	10	Polvo Píldoras de 1/16" Píldoras de 1/8" Perlas de 1/16" Perlas de 1/8"	36 28,5 28,5 28,5 28,5	Moléculas con un diámetro efectivo menor de 10 Angstroms.	Moléculas con un diámetro efectivo mayor de 10 Angstroms	Remoción de mercaptanos y H ₂ S a partir de hidrocarburos líquidos, remoción de H ₂ O y CO ₂ .

Fuente: CAMPBELL, J. M. John Campbell - Gas Conditioning and Processing - Vol 2, 399 1984

3.3.2 Selección del desecante. Criterios de selección, la selección del desecante para una aplicación particular depende de factores como:

- ✚ Especificaciones de punto de rocío del agua
- ✚ presencia de contaminantes (Especialmente compuestos de sulfuro)
- ✚ Co-Adsorción de hidrocarburos pesados
- ✚ costos

Todos los desecantes comerciales tienen la capacidad de producir puntos de rocío del agua debajo de -60 °C [-76 °F].

En una unidad bien diseñada y operada adecuadamente, se pueden lograr los siguientes puntos de rocío:

Tabla 11. Puntos de rocío en desecantes

Desecantes	Puntos de rocío obtenidos
Alúmina	-73°C [−100 °F]
Sílice Gel	-60 °C [−76 °F]
Tamiz molecular	-100°C [−150 °F]

Para la mayoría de las aplicaciones de conducción de gas aguas arriba de plantas de extracción de NGL a baja temperatura y plantas de LNG, el tamiz molecular será la primera opción debido a los puntos de rocío de salida de agua muy bajos y una mayor capacidad efectiva. Los tamices moleculares también se utilizan en aplicaciones que requieren la eliminación de compuestos de azufre. Los tamices moleculares son más caros que los geles o la alúmina y requieren mayores cargas de calor de regeneración.

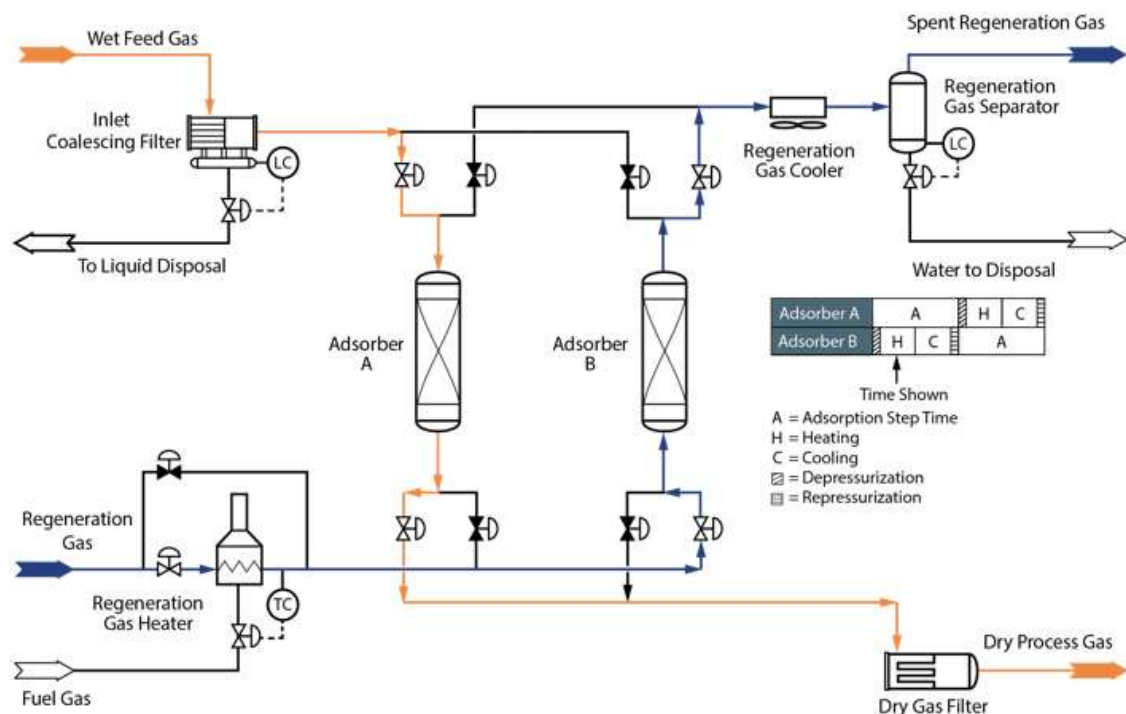
En presencia de una corriente de gas saturada con agua, las alúminas tienen una mayor capacidad de equilibrio para el agua que los tamices, pero la carga de agua disminuye rápidamente a medida que disminuye la saturación relativa de la corriente de gas. Las alúminas también tienen un calor de regeneración más bajo que los tamices. Sin embargo, los limitados puntos de rocío de agua de salida que se pueden lograr con alúmina impiden su uso en aplicaciones de procesamiento de gas a muy baja temperatura. Las alúminas a veces se usan junto con tamices en una aplicación de lecho compuesto: alúmina en la parte superior y tamices en la parte inferior. Este esquema aprovecha las ventajas de la carga de agua de mayor equilibrio de alúmina, pero también se utiliza para lograr puntos de rocío de agua de salida más bajos.

El gel de sílice a veces se usa cuando se requiere cumplir tanto el punto de rocío del agua como el del hidrocarburo. Algunos geles de sílice (Sorbead H) tienen una capacidad apreciable para los hidrocarburos $C_5 +$, así como para el agua.

Esto permite que se alcancen ambos puntos de rocío en una sola unidad. La capacidad de equilibrio del gel para los hidrocarburos es menor que para el agua, por lo tanto, el lecho se satura con hidrocarburos mucho más rápidamente que con el agua. Esto da como resultado tiempos de ciclo de adsorción cortos, a veces menos de 1 hora, por lo tanto, el nombre de unidades de ciclo corto a menudo se aplica a estas instalaciones.

3.3.3 Sistema básico de desecante

Figura 26. Unidad de deshidratación de dos torres con desecante



Fuente: Safety & process training center, <http://www.sptc.us>

En el esquema anterior se muestra el sistema desecante seco más simple, está compuesto de dos torres que contienen desecantes, mientras uno se seca el otro se regenera. Durante la regeneración, todos los materiales adsorbidos son expulsado por calor para preparar la torre para su siguiente ciclo de funcionamiento.

Se puede observar que la torre 2 se está secando. La corriente principal de gas fluye hacia la parte superior de la torre y sale por la parte inferior. El filtro no se usa en todos los sistemas, el ciclo de regeneración consta de dos partes principales: calentamiento y enfriamiento. Durante la porción de calentamiento, el gas de regeneración se calienta a 200-315°C [400 – 600 °F]. La temperatura depende del desecante que se use y del carácter del material que debe ser expulsado.

El gas de regeneración pasa por alto “by-pasea” el calentador para enfriar el lecho una vez que el lecho desecante se ha calentado al nivel deseado. Este enfriamiento normalmente se detiene cuando el lecho esta entre 10-15 °C [18 – 27 °F] más alto que la temperatura del gas de entrada.

Algunas unidades están diseñadas para usar la regeneración "Pulse". En estas unidades, el ciclo de calentamiento se acorta y la primera porción del gas de enfriamiento se usa para desplazar el gas de regeneración caliente desde la parte superior del lecho. Esta estrategia da como resultado ciclos de regeneración más cortos y a menudo se usa en aplicaciones de recuperación de hidrocarburos.

El gas de regeneración que sale de la torre se enfría para condensar los materiales expulsados. Después de la separación, el gas de regeneración puede regresar a la corriente principal de entrada de gas o, si las especificaciones son apropiadas, puede enviarse a ventas. En aplicaciones de deshidratación, esta tasa de gas de regeneración será normalmente del 5 al 15% del rendimiento total, siendo el 10% un buen promedio. En la deshidratación de gas, el flujo de adsorción es casi siempre descendente debido a la mayor velocidad permitida en esta dirección. Se prefiere la

regeneración hacia arriba a pesar de que se requiere más válvulas y tuberías. El porcentaje más alto de contaminación del lecho ocurre en la parte superior. Mediante la regeneración hacia arriba, el "vapor" producido desde la parte inferior del lecho ayuda a eliminar la contaminación sin extenderla por todo el lecho. La dirección del flujo para el enfriamiento es opcional. El enfriamiento de flujo ascendente ahorra dos válvulas de conmutación por torre (ya que puede usarse gas de regeneración sin calentar), pero se requiere gas seco. Se prefiere enfriar el flujo descendente (misma dirección que la adsorción) si el gas refrigerante contiene agua.

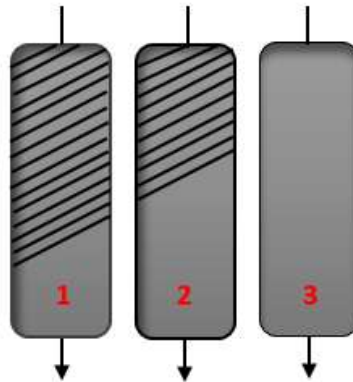
Existen tres fuentes básicas de gas de regeneración en la deshidratación de gas:

1. Gas de entrada.
2. Un ciclo cerrado separado de la corriente que se deshidrata.
3. Efluente seco (cola) de gas de la unidad.

(1) Implican cierto grado de re-saturación del lecho durante el enfriamiento, lo que limita la capacidad útil del lecho y si se usa enfriamiento por flujo ascendente, se puede alcanzar el punto de rocío mínimo del agua; (2) Se requiere un sistema de tuberías separado y un compresor centrífugo en línea de alta velocidad; (3) Es el más eficiente y es la norma en el servicio de secado criogénico.

Un factor de diseño muy apropiado es el número de torres. La mayoría de las unidades desecantes secas grandes para el secado con gas natural contienen más de dos torres para optimizar la economía. Hay diferentes formas de usar estas múltiples torres. Por ejemplo, mientras que dos están operando en adsorción en paralelo, la tercera está siendo regenerada y enfriada.

Figura 27. Unidad de adsorción de tres torres



En el esquema es posible observar que el área sombrada dentro de la torre 1 y 2 muestra el progreso de la adsorción de agua en el lecho o en la parte del lecho que está siendo esencialmente saturada de agua. Se debe observar que debajo de esta área, el desecante es capaz de adsorber más agua. La parte inferior de esta área representa la posición del frente de adsorción a medida que se mueve hacia abajo a través de la cama con el tiempo.

En la torre 1, el frente de adsorción en el lecho 1 está más bajo que en el lecho 2, ya que la torre 1 ha estado en funcionamiento por más tiempo. Cuando el frente de adsorción llega a la salida, el lecho cambiará a regeneración y los demás lechos continuarán en adsorción hasta que lleguen al final. En cualquier caso, las dos torres que están en el proceso de adsorción tendrán diferentes grados de saturación, y cuando el lecho 2 esté listo para la regeneración, el lecho de la torre 1 debe estar listo para volver al proceso de adsorción.

Una secuencia operativa normal de las torres de funcionamiento es:

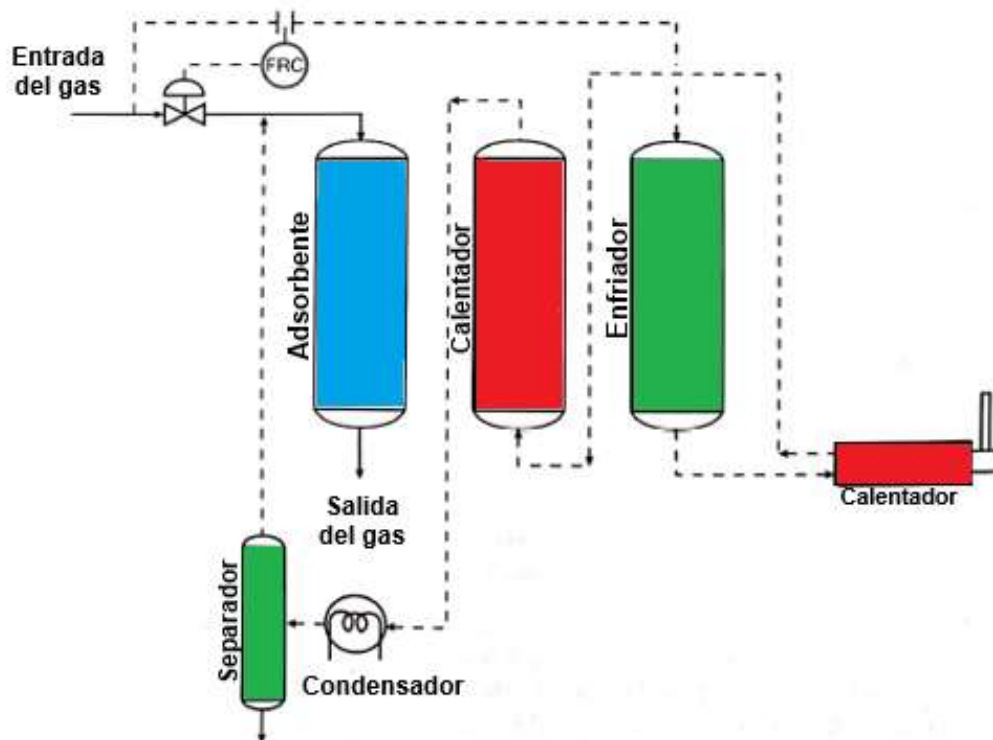
1 y 2, 2 y 3, 1 y 3, 1 y 2, repetitivo.

Un arreglo similar podría ser con cuatro torres, con tres en funcionamiento a la vez. Obviamente, la disposición del flujo afecta el tiempo de ciclo elegido.

Otra variación del sistema de 3 torres en el esquema (). En este sistema, una cama está en adsorción, una en calefacción y otra en enfriamiento. Este esquema se usa a menudo en unidades de recuperación de hidrocarburos de ciclo corto cuando se requiere la adsorción simultánea de hidrocarburos $C_5 +$ y agua

El ciclo de adsorción en estas instalaciones es a veces menos de una hora. Esto no deja suficiente tiempo para calentar y enfriar completamente una cama durante el ciclo de regeneración, de ahí el uso de camas de calefacción y refrigeración separadas.

Figura 28. Planta de adsorción de tres torres



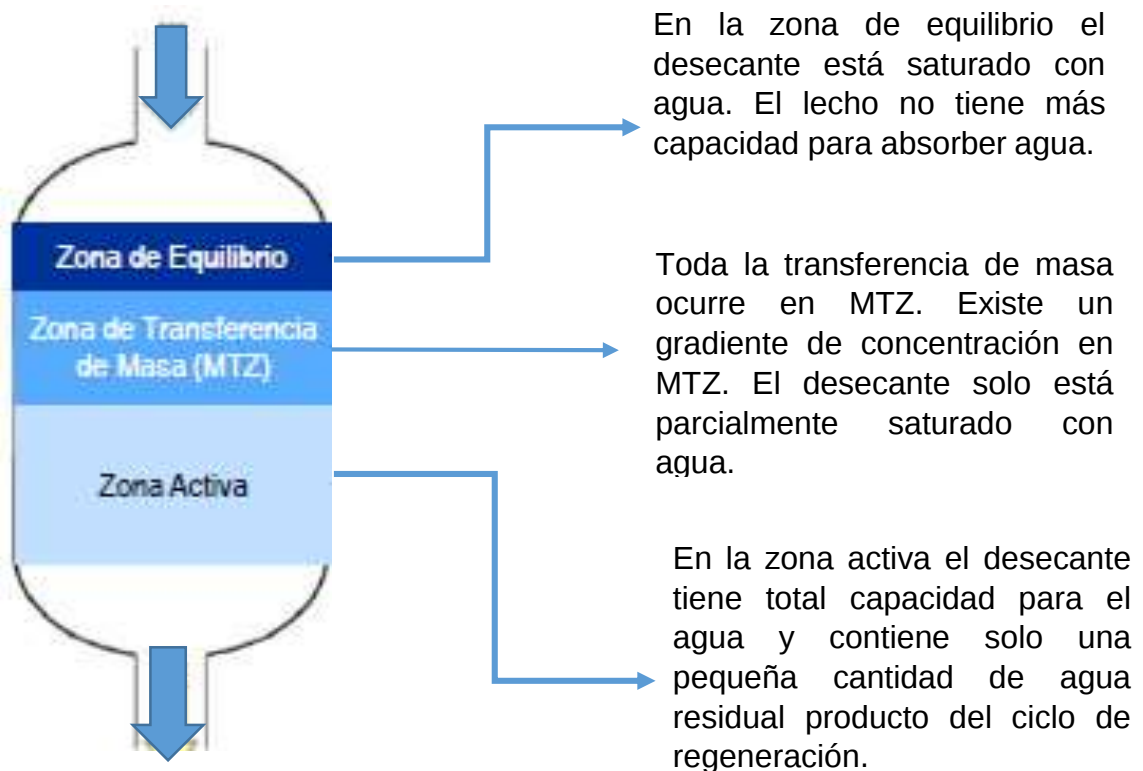
El flujo de gas de regeneración se crea manteniendo una pequeña cantidad de contrapresión en el lado de entrada de la unidad y usando la válvula de control ΔP para forzar el gas de regeneración a través del circuito. Alternativamente, se puede instalar un pequeño compresor centrífugo de alta velocidad en línea en el circuito de regeneración. Este último requiere un mayor mantenimiento, pero es más eficiente energéticamente. La regeneración puede ocurrir a presión de adsorción total o a presión reducida. Si los lechos se regeneran a la presión de adsorción total, el gas de regeneración húmedo a veces se puede dirigir directamente a la línea de gas de ventas sin deshidratarlo. Además, dado que la presión de regeneración y adsorción es casi la misma, no es tan importante igualar la presión del sistema con el lecho antes de abrir las válvulas de conmutación o bola.

Algunos lechos se regeneran a una presión más baja que la presión de adsorción. En una planta de turbo-expansión, una fuente común de gas de regeneración es la succión recompresora (descarga del compresor de refuerzo expensor). Las principales ventajas son la mayor capacidad de transporte de agua del gas a baja presión y la mayor velocidad de regeneración a través del lecho para el mismo caudal másico. Esto da como resultado una tasa de gas de regeneración más baja en comparación con la regeneración a alta presión. Cuando se utiliza gas de regeneración a baja presión, es necesario un sistema de ecualización de presión para igualar la presión del lecho con la presión del sistema para evitar daños en el lecho debido a un aumento de flujo de gas cuando se abren las válvulas de conmutación. Además, con frecuencia se requiere deshidratación separada de la línea de regeneración (generalmente con una pequeña unidad de glicol) y a menudo se usa un compresor centrífugo en línea para forzar el gas de regeneración a través del circuito de regeneración. Si el gas de alimentación contiene H_2S , se puede requerir un manejo especial del gas de regeneración debido al incremento de H_2S que ocurre durante el ciclo de calentamiento.

3.3.4 Naturaleza de la adsorción. Durante la operación normal en el ciclo de secado (Adsorción), existen tres zonas separadas en el lecho: 1) Zona de equilibrio; 2) Zona de transferencia de masa (MTZ) y 3) Zona activa.

En el esquema posterior se puede observar la ubicación de cada zona y su respectiva función dentro del proceso de desecado.

Figura 29. Transición del lecho en el proceso de adsorción



El 100% de cualquier componente se adsorbe en el desecante hasta que el frente de su zona alcance la salida del lecho. Cuando la parte posterior de su zona alcanza la salida del lecho, no se producirá más adsorción de ese componente. Además, será desplazado casi por completo por el componente en la zona que lo sigue abajo de la cama si el ciclo continúa. Si el proceso continúa lo suficiente, no quedará ninguna cantidad efectiva o remanente en el lecho.

Con gel de sílice, en caudales y configuraciones de torres típicos, el pentano puede tener un tiempo de ruptura de 15-45 minutos. El metano y el etano explotan casi instantáneamente. En la mayoría de las instalaciones, si el ciclo del proceso continúa más allá de 1-2 horas, solo los componentes $C_7 - C_8$ +permanecerán en el lecho. A partir de este momento, se produce principalmente deshidratación. Por lo tanto, el rendimiento de una unidad dada depende de la duración del ciclo utilizado. Para ciclos muy cortos, ocurre tanto la adsorción de hidrocarburos como la deshidratación.

El efecto del tamaño del desecante en la longitud de la zona es un factor muy importante ya que cuanto más empinada es la zona, más nítida es la separación, mayor es la capacidad efectiva del desecante. Por lo tanto, el desecante utilizado siempre debe ser el más pequeño y compatible con las limitaciones de caída. Los tamaños más comunes son malla 4-8 (escala de pantalla Tyler), normalmente 3 mm [1/8 in] y malla 8-12 –nominalmente 1.5 mm [1/16 in].

3.3.5 Capacidad del desecante. La capacidad de un desecante para agua es expresada normalmente como masa de agua adsorbida por masa de desecante. Hay tres términos de capacidad utilizados.

- ✚ Capacidad de equilibrio estático: la capacidad de agua de un desecante nuevo y virgen determinado en una celda de equilibrio sin flujo de fluidos.

- ✚ Capacidad de equilibrio dinámico: la capacidad de agua de un desecante nuevo sin uso, donde el fluido fluye a través del desecante a una velocidad comercial.

- ✚ Capacidad útil: la capacidad de diseño reconoce la pérdida de capacidad del desecante con el tiempo, según lo determinado por la experiencia y las consideraciones económicas y el hecho de que el lecho desecante nunca se puede utilizar por completo.

Tres aspectos claves se pueden encontrar en el proceso de adsorción:

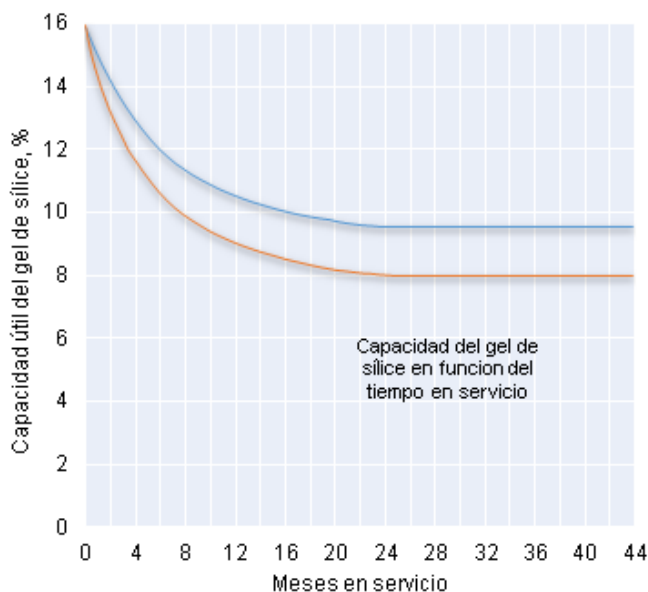
- ✚ La capacidad de equilibrio estático no tiene un uso directo en el diseño, aunque muestra el efecto de P, T y la saturación de agua sobre la capacidad

✚ La capacidad dinámica es típicamente del 50-70% de la capacidad de equilibrio estático.

✚ La capacidad dinámica es una función de la saturación relativa del gas y de la temperatura.

Todos los desecantes se degradan en servicio. La figura 30 es una curva típica para gel de sílice. Otros desecantes tendrán la misma forma de curvas en servicio normal, aunque los valores variarán. Los tamices moleculares 4A y 5A tienden a degradarse más lentamente porque su tamaño de poro es tal que las moléculas de hidrocarburos pesados quedan excluidas de la adsorción. Sin embargo, un revestimiento externo pesado de hidrocarburos aglomerados en los macro poros aún comprometerá su rendimiento.

Figura 30. Capacidad del gel de sílice en función del tiempo en servicio



La degradación normal ocurre por la pérdida del área superficial efectiva en los repetidos ciclos de regeneración. Esta pérdida es rápida al principio y luego se vuelve más gradual a medida que el desecante "madura". La degradación anormal ocurre principalmente a través del bloqueo de las pequeñas aberturas capilares o

reticulares que controlan el acceso a la superficie interior. Los aceites pesados, aminas, glicoles, inhibidores de corrosión y similares, que no pueden eliminarse mediante regeneración, pueden reducir la capacidad a niveles no económicos en cortos períodos de tiempo. No hay espacio para las ilusiones. Si estos contaminantes están presentes antes de la unidad, se deben tomar medidas para manejarlos justo antes de la unidad. Además de un separador de impacto normal, se requiere un separador de filtro coalescente u otro dispositivo de separación de alta eficiencia.

El agua libre siempre es un problema. La entrada de agua salada se evaporará y llenará el lecho con sal. Con los geles, esta agua provocará la rotura de la malla a menos que se proporcione una sección de protección en la entrada. La única solución permanente es no dejar que entre agua líquida en el lecho. Pueden ocurrir otras formas de degradación si el agua líquida ingresa al lecho. Algunos desecantes explotan en presencia de agua líquida. Los finos producidos aumentan la caída de presión, reducen la capacidad efectiva y pueden abandonar el lecho y dañar o tapar el equipo aguas abajo. Por lo tanto, se puede colocar una capa de desecante resistente al agua en la parte superior del lecho para minimizar este problema. La solución más positiva es el lavado efectivo de la entrada. Además, los filtros de polvo se instalan frecuentemente aguas abajo de la unidad para eliminar estos finos.

La incorporación del efecto tanto de la MTZ como de la pérdida de capacidad desecante con el tiempo proporciona el valor de capacidad útil que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 12. % en peso de pérdidas de capacidad del desecante

	x, % en peso
Alúmina activada	5-12
Sílice Gel	5-8
Tamiz Molecular (4A)	7-14

3.4 ENDULZAMIENTO DEL GAS NATURAL

Además de los procesos de remoción de agua, hidrocarburos líquidos y otros compuestos indeseables del gas natural, una de las partes más importantes del procesamiento de gas implica la eliminación de azufre y dióxido de carbono. El gas natural puede contener compuestos de azufre y dióxido de carbono que según las cantidades que representen dentro de la corriente de gas hacen que este tome el nombre de gas agrio o gas dulce, por ejemplo, aquel gas que contiene más de 5,7 miligramos de H_2S por cada metro cúbico de gas natural es "agrio". Sin embargo, si contiene solo CO_2 y ningún otro compuesto de azufre, se llama gas "dulce". El gas agrio es indeseable porque los compuestos de azufre pueden ser extremadamente dañinos, incluso tóxicos, si nos exponemos a estos, también pueden ser extremadamente corrosivos, entre otros problemas operacionales que pueden ser acarreados por la presencia de estos compuestos. Además de remover estos compuestos por los daños que representan dentro de la corriente de gas, se deben cumplir especificaciones de transporte, tales como 2-4% de CO_2 para gasoductos, 20ppm para plantas de GNL, y 4 ppm de H_2S para gasoductos y 2 ppm para plantas de GNL. De igual forma, el azufre que existe en la corriente de gas puede extraerse y ser comercializado si se reduce a su forma elemental.

El azufre elemental es un polvo amarillo brillante como material y se puede ver en grandes pilas cerca de las plantas de tratamiento. Para recuperar azufre elemental de las plantas de procesamiento de gas, la descarga que contiene azufre de un proceso de endulzamiento de gas debe ser tratado más a fondo. El proceso utilizado para recuperar azufre se conoce como proceso Claus e implica el uso de reacciones térmicas y catalíticas para extraer el azufre químico de la solución de sulfuro de hidrógeno. El proceso Claus generalmente puede recuperar el 97% del azufre que se ha eliminado de la corriente de gas natural. El 15% de la producción de azufre de EE. UU. se obtiene de plantas de procesamiento de gas.

3.4.1 Descripción general y métodos utilizados. El endulzamiento del gas natural es un paso vital por tres razones principales:

- ✚ Peligros para la salud: A 500 ppm de H_2S , se observan problemas respiratorios y se puede esperar la muerte en minutos.
- ✚ Contratos de venta: no más de 0.25 granos de H_2S por 100 scf de gas.
- ✚ El principal beneficio obtenido de la remoción de ambos gases ácidos de una corriente de gas natural es minimizar los efectos de corrosión. Además, la recuperación de azufre representa un incentivo comercial en el proceso.

Los métodos utilizados para endulzar el gas natural se pueden clasificar en tres categorías:

1. Disolventes químicos reactivos.
2. Métodos físicos.
3. Otros métodos.

En los esquemas inferiores, se puede observar la clasificación de los procesos de endulzamiento de forma detallada.

Figura 31. Proceso de endulzamiento del gas natural

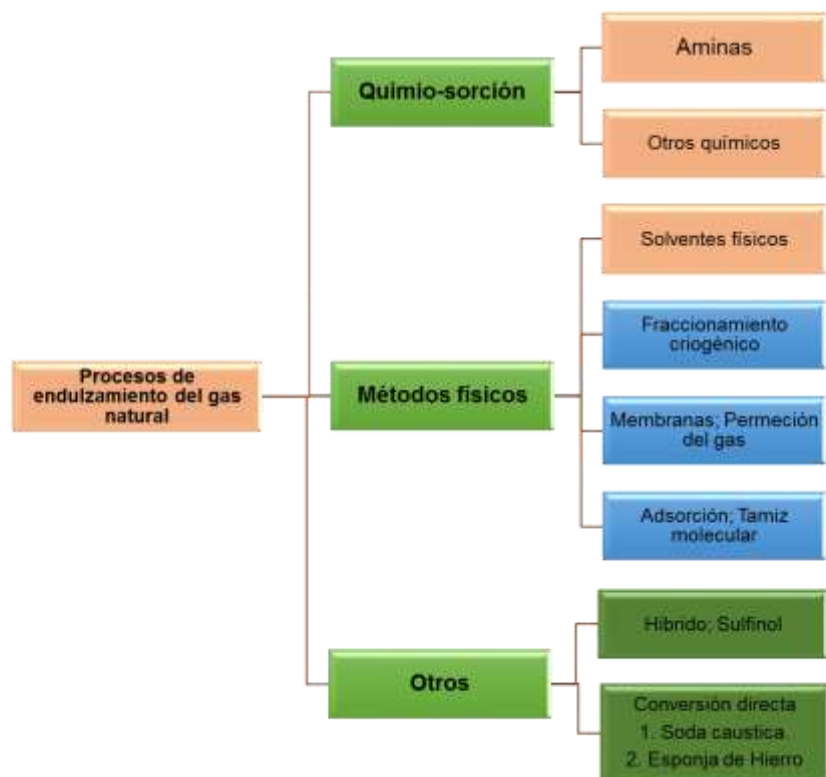
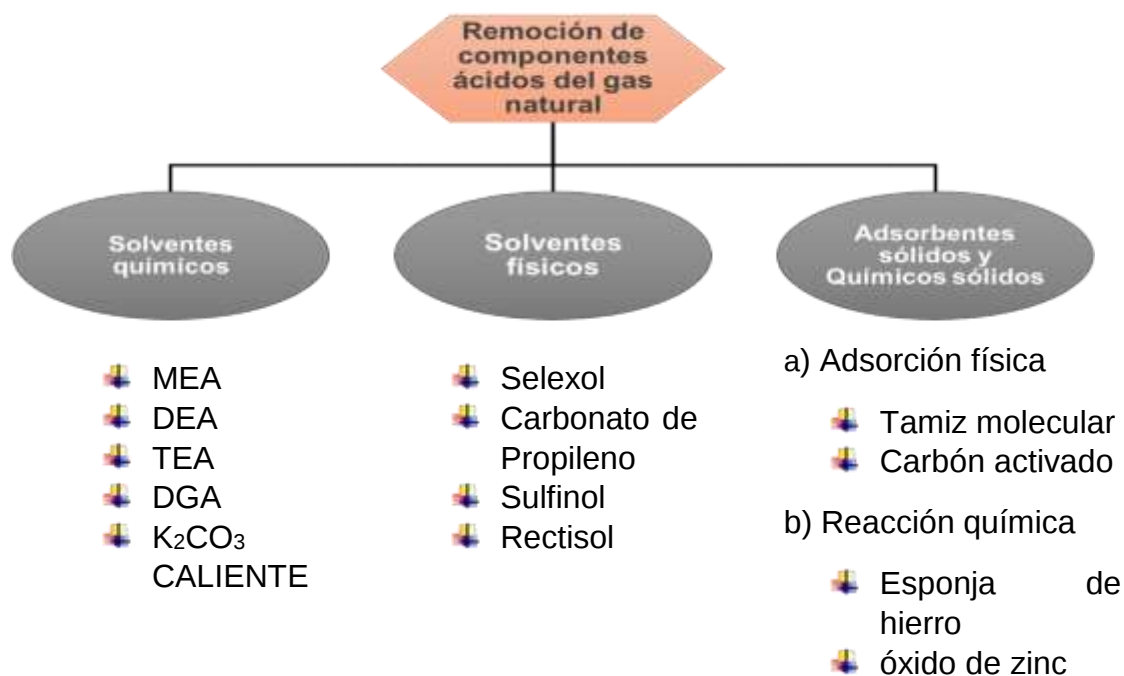


Figura 32. Remoción de componentes ácidos del gas natural



3.4.2 Proceso de endulzamiento quimio-sorción (aminas). El proceso de endulzamiento de gas natural es similar a los procesos de deshidratación con glicol y absorción de NGL.

Las soluciones de amina son usualmente usadas para remover el sulfuro de hidrógeno y el dióxido de carbono.

El proceso se conoce simplemente como el "proceso de amina" y se utiliza en la mayoría de las operaciones de endulzamiento de gas natural.

El gas con sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono es enviado a través de una torre, la cual contiene la solución de amina. Esta solución tiene afinidad por el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno, por tanto, absorbe estos contaminantes de la misma forma que el glicol absorbe el agua contenida en el gas.

Las dos principales soluciones de aminas utilizadas son:

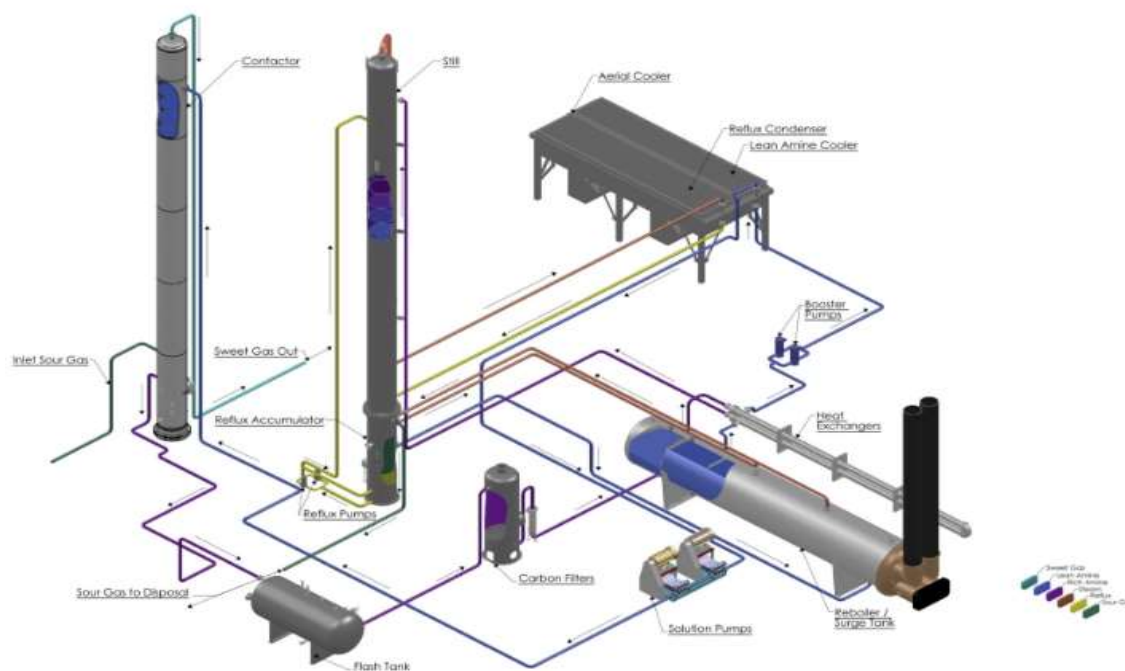
✚ Monoetanolamina (MEA)

✚ Dietanolamina (DEA)

Ambos procesos eliminan CO_2 y H_2S para especificaciones de transporte a través de gasoducto.

Estos compuestos en forma líquida, absorben dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno contenido en el gas natural. El gas al entrar en contacto con la solución de amina queda prácticamente libre de dióxido de carbono y compuestos de sulfuro de hidrógeno. Estos procesos a groso modo, utilizan una solución acuosa de una base débil para reaccionar químicamente junto con la absorción de los gases ácidos (H_2S o CO_2) que se eliminarán del gas natural. La absorción se atribuye a la tasa de transferencia de masa impulsada por la diferencia en la presión parcial entre la mayor parte del gas y el líquido. Las reacciones se identifican como absorción química o quimio-sorción. Se invierten por el efecto de la temperatura o la presión, lo que da como resultado la regeneración del disolvente utilizado.

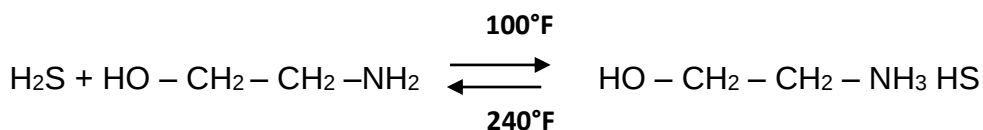
Figura 33. Planta de endulzamiento de gas natural



Fuente: NEW POINT GAS, LLC; Innovative oil & gas solution, <https://www.newpointgas.com/services/amine-treating-plants/>

El proceso de regeneración del solvente se explica como la eliminación de los compuestos ácidos absorbidos por este, permitiendo así que el solvente sea reutilizado para tratar otras corrientes de gas. Aunque muchas plantas de endulzamiento de gas usan el proceso de absorción con amina, también es posible utilizar sólidos desecantes como esponjas de hierro y permeación de gas (Membranas).

El proceso de endulzamiento de aminas se describe en la figura 33. Consiste básicamente en un contactor y un regenerador, donde la reacción en el contactor ocurre a 100°F, mientras que la regeneración tiene lugar a 240°F.



La reacción también podría aplicarse al CO_2 . Los procesos de etanol-amina se recomiendan cuando la presión parcial del gas ácido es baja o se desean niveles bajos de gas ácido en el gas residual. Si la cantidad de gas ácido es grande, puede justificarse el carbonato de potasio caliente seguido de un tratamiento con aminas.

El proceso de una planta de endulzamiento con aminas, es un proceso muy parecido al de deshidratación con glicol en cuanto a equipos y configuración del sistema, sin embargo, se diferencian notoriamente en las condiciones de trabajo de la unidad. En un recorrido general, el gas agrio ingresa al sistema a través de la entrada del separador para eliminar el agua arrastrada o hidrocarburos líquidos. El gas ingresa al fondo del absorbedor de amina y fluye en contracorriente a la solución de amina. La torre de absorción dependiendo su diseño consta de:

- ✚ Bandejas (diámetros mayores de 20 in (500 mm))
- ✚ Empaque convencional (diámetros inferiores a 20 in. (500 mm))
- ✚ Empaque estructurado (diámetros mayores que 20 in. (500 mm))

El gas dulce sale por la parte superior de la torre contactora. Si se requiere, es posible incluir un separador de salida con el fin de recuperar amina arrastrada por el gas dulce. En este tipo de procesos, es normal que el gas natural que sale de la parte superior de la torre este saturado con agua, por tanto, se debe tener en cuenta que posterior al endulzamiento es necesario deshidratar el gas aguas arriba del gasoducto con el fin de que se envíe a las condiciones requeridas de transporte. Debido a esto, es normal encontrar plantas de amina y glicol en serie, con el fin de someter al gas a un tratamiento completo.

La amina rica, solución que contiene CO_2 y H_2S , sale del fondo del absorbedor y fluye hacia el tanque de flash donde la mayoría de los gases de hidrocarburos disueltos o condensados de hidrocarburos arrastrados son removidos. Una pequeña cantidad de gases ácidos se va a la fase de vapor. Desde el tanque flash, la amina rica procede al intercambiador de calor de amina rica / amina pobre, equipo

que recupera parte del calor sensible de la corriente de amina pobre lo que disminuye el trabajo térmico en el rehervidor de amina y el enfriador de solvente.

La amina rica precalentada luego ingresa a la torre de extracción de amina donde debido al calor del rehervidor se presenta ruptura de los enlaces entre la amina y los gases ácidos. Los gases ácidos se eliminan en la parte superior del rehervidor y la amina pobre es removida desde el fondo del mismo. La amina pobre caliente posteriormente fluye hacia el intercambiador de calor de amina rica / amina pobre y luego a refrigeradores adicionales, típicamente enfriadores aéreos, para bajar su temperatura a aproximadamente 10 °F (5.5 °C) por encima de la temperatura del gas de entrada.

Para reducir la cantidad de hidrocarburos condensados en la solución de amina cuando la amina entra en contacto con el gas agrio (ácido), una corriente lateral de amina, de aproximadamente el 3%, es tomada después del intercambiador de calor de amina rica / pobre y fluye a través de un filtro de carbón con el fin de limpiar la solución de contaminantes. La amina pobre es enfriada y posteriormente bombeada a la presión del contactor y enviada a la parte superior del mismo. La solución de amina fluye por el absorbedor (Contactor) donde absorbe los gases ácidos. La amina rica se elimina en la parte inferior de la torre y el ciclo se repite.

3.4.3 Características de las aminas. En la historia evolutiva del endulzamiento con aminas, desde 1930 fecha en el que nace la TEA (Trietanolamina), se han venido desarrollando otros tipos de solventes de aminas con la finalidad de que el proceso de endulzamiento sea más eficiente. En este caso, nos centraremos en cinco tipos de tratamiento de etanol aminas más utilizados; Metildietanolamina (MDEA), Monoetanolamina (MEA), Dietanolamina (DEA), Trietanolamina (TEA) o Diglicolamina(DGA)

3.4.3.1 Metildietanolamina (MDEA). Proceso más nuevo utilizado para la eliminación selectiva de H_2S en presencia de CO_2 . Reduce significativamente los costos de tratamiento cuando la eliminación de CO_2 no es necesaria.

3.4.3.2 Sistemas de monoetanolamina (MEA). Amina primaria, es la amina que ha tenido un uso generalizado como agente de endulzamiento de gas, es un proceso probado y puede cumplir con especificaciones requeridas. La MEA es un compuesto estable y en ausencia de otros productos químicos no sufre degradación o descomposición a temperaturas de hasta su punto de ebullición normal.

➤ **Regeneración**

Las reacciones con CO_2 y H_2S son reversibles en la columna de regeneración calentando la MEA rica a aproximadamente 245 °F a 10 psig (118 °C a 69 kPa). Los gases ácidos van hacia la fase vapor y son eliminados en la parte superior. De esta manera se regenera la MEA.

➤ **Desventajas**

MEA reacciona con sulfuro de carbonilo (COS) y disulfuro de carbono (CS_2) para formar sales termoestables, que no se pueden regenerar a temperaturas normales en la columna de regeneración. A temperaturas superiores a 245°F (118 °C) existe una reacción secundaria con CO_2 que produce un oxazolidona-2, una sal estable al calor, que consume MEA del proceso.

El recuperador a menudo se incluye para eliminar estos contaminantes.

➤ **Recuperador**

Una corriente secundaria del 1% al 3% de circulación de MEA se extrae de la parte inferior de la columna de regeneración. La corriente es entonces calentada para que el agua y la MEA hiervan en la parte superior mientras las sales termoestables y oxazolidona-2 son retenidas en el recuperador “Reclaimer”. El recuperador se cierra periódicamente y los contaminantes recolectados se limpian. Cuando se eliminan los contaminantes del sistema, cualquier MEA unida a ellos también se pierde.

➤ **Concentración de solución y carga de solución**

Ambos están limitados para evitar excesiva corrosión. La MEA generalmente circula en una solución de 15–20% de MEA en peso en agua. La experiencia operativa indica que la carga de la solución no debe ser mayor de 0.3 a 0.4 mol de gas ácido por mol de MEA. En gran medida determinado por la relación de H_2S/CO_2 .

Cuanto mayor sea la relación (es decir, mayor concentración de H_2S en relación con el CO_2), mayor será la carga permitida y la concentración de amina. Esto se debe a la reacción de H_2S y hierro (Fe) para formar sulfuro de hierro (Fe_2S_3 y FeS), Lo cual forma una barrera protectora sobre la superficie del acero.

Esta barrera se puede quitar por altas velocidades de fluido y puede conducir a un aumento de la corrosión en el acero expuesto.

➤ **Consideraciones de corrosión**

Los gases ácidos en la amina rica son corrosivos, pero los límites de concentración anteriores pueden mantener la corrosión a niveles aceptables.

La corrosión aparece comúnmente:

- ✚ En áreas de acero al carbono que han sido estresadas, como zonas afectadas por el calor cerca de soldaduras.
- ✚ Áreas de alta concentración de gas ácido, o en una interfaz de gas caliente y líquido.

Por lo tanto, aliviar el estrés de todo el equipo después de la fabricación es necesaria para reducir corrosión y metalurgia especial es usualmente utilizado en áreas específicas tales como en la columna de despojo o en los tubos de fuego del rehervidor.

➤ **Consideraciones de espuma**

Los sistemas que trabajan con MEA hacen espuma fácilmente, lo que resulta en arrastre excesivo de aminas desde el contactor.

La espuma puede ser causada por una serie de materiales extraños tales como:

- ✚ hidrocarburos condensados
- ✚ Productos de degradación
- ✚ Sólidos como el carbono o el sulfuro de hierro.
- ✚ Exceso de inhibidor de corrosión
- ✚ Grasa de válvula, etc.

➤ **Separador filtro de microfibra**

Instalado en la entrada de gas al contactor de MEA. Método eficaz de control de espuma, elimina muchos de los contaminantes antes de que entren al sistema.

Los hidrocarburos líquidos generalmente se eliminan en el tanque de flash (Tanque de recuperación de condensado). Los productos de degradación se eliminan en un recuperador como se describió anteriormente.

➤ Pérdidas de MEA

La MEA tiene el punto de ebullición más bajo y la presión de vapor más alta de las aminas. Resultando en pérdidas de MEA de 1–3 lbs / MMSCF (16–48 kg/MMm³) de gas de entrada.

Los sistemas de endulzamiento con MEA pueden tratar eficientemente el gas agrio para llevarlo a especificaciones de transporte por gasoducto. Sin embargo, el cuidado en el diseño y correcta selección de materiales de los sistemas MEA es necesario para minimizar problemas operacionales tales como, la corrosión de los equipos.

3.4.3.3 Sistemas de Dietanolamina (DEA). La amina secundaria también se usa para tratar gas a las especificaciones de transporte por gasoducto. Como una amina secundaria, la DEA es menos alcalina que la MEA. Los sistemas DEA sufren los mismos problemas de corrosión, pero no tan graves como los que se presentan usando MEA.

Las resistencias de la solución son típicamente del 25% a 35% DEA en peso en agua. La DEA tiene ventajas significativas sobre MEA cuando compuestos como COS o CS₂ están presentes.

La DEA reacciona con COS y CS₂ para formar compuestos que pueden ser regenerados en la columna de regeneración. Por lo tanto, COS y CS₂ se eliminan sin una pérdida de DEA.

➤ **Recuperador**

Se ha observado que los altos niveles de CO₂ causan degradación de DEA a oxazolidonas. Los sistemas DEA generalmente incluyen un filtro de carbón, pero no suelen incluir un recuperador debido a la pequeña cantidad de producto de degradación.

➤ **Concentración de solución y Carga de solución**

La fuerza de la solución de DEA varía hasta 35% en peso comparado con 20% para MEA. Las cargas para los sistemas DEA van desde 0,35 a 0,65 mol de gas ácido por mol de DEA sin corrosión excesiva. El resultado de esto es que la tasa de circulación de una solución DEA es ligeramente menor en comparación con la de un sistema MEA.

➤ **Pérdidas de amina**

La presión de vapor de DEA es aproximadamente 1/30 de la presión de vapor de MEA. Por lo tanto, las pérdidas de amina DEA son mucho más bajas que en un sistema MEA.

3.4.3.4 Sistemas DIGLICOLAMINA® (DGA). El DGA es una amina primaria utilizada en el proceso de Econamine Flúor para endulzar el gas natural. Las reacciones de DGA con gases ácidos son las mismas que las de MEA., con la diferencia que los productos de degradación de las reacciones con COS Y CS₂ pueden regenerarse.

➤ **Concentración de solución y carga de solución**

Los sistemas DGA suelen hacer circular una solución de 50–70% de DGA en peso en agua. Cargas normales de hasta 0.3 mol de gas ácido por mol de DGA, la corrosión en los sistemas DGA es ligeramente menor que en sistemas MEA.

➤ **Ventajas**

La baja presión de vapor disminuye las pérdidas de amina. Alta resistencia de la solución permite menores tasas de circulación.

3.4.3.5 Sistemas de Metildietanolamina (MDEA). La metildietanolamina (MDEA) es una amina terciaria, que al igual que las otras aminas, se usa para endulzar las corrientes de gas natural.

Principales ventajas sobre otros procesos de aminas:

Si se contacta el gas a presiones que van de 800 a 1000 psig (5500–6900 kPa), los niveles de H₂S se pueden reducir a concentraciones requeridas por tuberías. Mientras que, al mismo tiempo, 40-60% del CO₂ presente fluye a través del contactor, sin tratar.

➤ **Concentración de solución y carga de solución**

Las resistencias de la solución generalmente varían del 40% hasta 50% de MDEA en peso. La carga de gas ácido varía de 0.2 a 0.4 o más moles de gas ácido por mol de MDEA dependiendo del proveedor. MDEA tiene un peso molecular de 119. La composición de la solución MDEA depende del proveedor. Se puede ajustar para optimizar tratamiento para una entrada de gas con composición particular.

➤ Ventajas

Mayor concentración de MDEA y carga de gas ácido da como resultado una circulación de flujo reducida. Se realizan importantes ahorros de capital debido a la reducción de la bomba y los bajos requerimientos de regeneración.

En algunas aplicaciones, los requisitos de energía para el tratamiento de gases pueden ser reducido hasta un 75% al cambiar de DEA a MDEA.

3.4.4 Proceso de permeación de gas: membranas. Barreras semipermeables delgadas que selectivamente separan algunos compuestos de otros.

Se utiliza principalmente para la eliminación de CO₂ a granel de productos naturales de la corrientes de gas.

- + Pueden eliminar CO₂ y H₂S a especificaciones de transporte por tubería.
- + Reduce los niveles de H₂S
- + Usado en tierra / costa afuera, en boca de pozo o en instalaciones de recolección.
- + Operaciones de recuperación mejorada de petróleo (EOR)

Se utiliza para recuperar CO₂ de los inundaciones EOR para reciclar la inyección en el depósito de aceite, así aumentar la recuperación de petróleo.

El CO₂ asociado se elimina de una corriente de gas natural y es reinyectado en el aceite para mejorar la recuperación de petróleo.

Los materiales más utilizados para la eliminación de CO₂ son:

- + Basados en polímeros (propiedades modificadas a mejorar el rendimiento)
- + Acetato de celulosa (más resistente)
- + poliamidas, polisulfona, policarbonatos, polieterimida.

3.4.5 Permeación de membrana. No realizan el funcionamiento de un filtro, proceso donde moléculas pequeñas son separadas de moléculas más grandes a través de un medio de poros.

Las membranas operan según el principio de difusión de la solución a través de una membrana no porosa. Los componentes altamente solubilizados se disuelven y se da la difusión a través de la membrana. El CO_2 primero se disuelve en la membrana y luego se difunde a través de esta. Las membranas permiten la eliminación selectiva de gases rápidos y de gases lentos. Las membranas no tienen característica poral, por tal razón, no separan en función del tamaño molecular. La separación se basa en qué tan diferente los compuestos se disuelven en la membrana y entonces penetran o atraviesan está.

✚ Más soluble (gases más rápidos) $\rightarrow \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{H}_2\text{S}, \text{CO}_2, \text{O}_2$

✚ Menos soluble (gases más lentos) $\rightarrow \text{N}_2, \text{CH}_4, \text{C}_2^+$

3.4.5.1 Parámetros importantes al seleccionar una membrana Es importante determinar que parámetros se deben tener en cuenta a la hora de realizar la selección de un tipo de membrana, ya que dependiendo de las características con las que debe salir el gas de la membrana, hay propiedades propias de estas que hacen el proceso más balanceado, sin incurrir en costos de más.

➤ **Permeabilidad (P)**

Altas permeabilidades resultan en menos requerimientos de área de membrana para una separación dada y por tanto menor costo del sistema.

➤ **Selectividad (α)**

Una mayor selectividad da como resultado menores pérdidas de hidrocarburos cuando el CO_2 es eliminado. Mayor volumen de producto vendible.

Desafortunadamente, la alta permeabilidad al CO_2 no corresponde a alta selectividad. La elección debe hacerse entre altamente selectiva o membrana permeable o en algún punto intermedio en ambos parámetros.

La opción habitual es utilizar un material altamente selectivo y luego hacerlo lo más delgado posible para aumentar la permeabilidad.

Reducir el espesor hace que la membrana este extremadamente frágil y por lo tanto inutilizable.

En el pasado, los sistemas de membrana no eran un proceso viable porque el espesor de la membrana requerido para proporcionar la resistencia mecánica era tan alto que la permeabilidad se convertía en mínima.

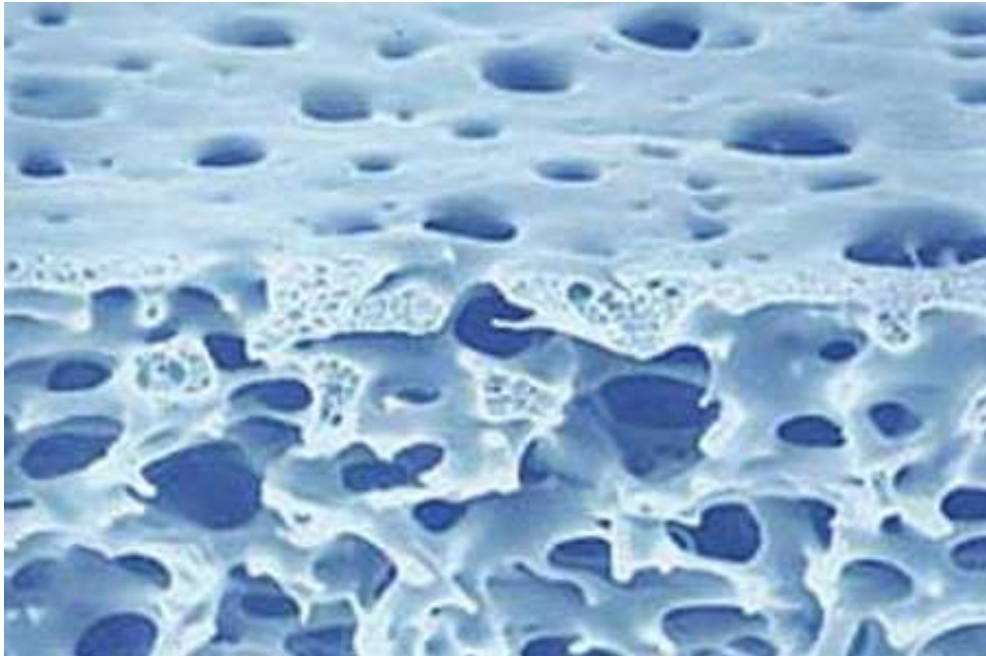
3.4.5.2 Estructura de membrana asimétrica

- + **Únicamente polímero;** Consiste en un polímero extremadamente delgado

- + **Capa no porosa;** montada en una capa mucha más gruesa

- + **Capa altamente porosa;** del mismo material, opuesto a una estructura homogénea, donde la porosidad de la membrana no es uniforme totalmente, pero se acerca a esta característica.

Figura 34. Estructura de membrana asimétrica



Fuente: 26th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Volume 38, 1st Edition

Cumple los requisitos de la membrana ideal:

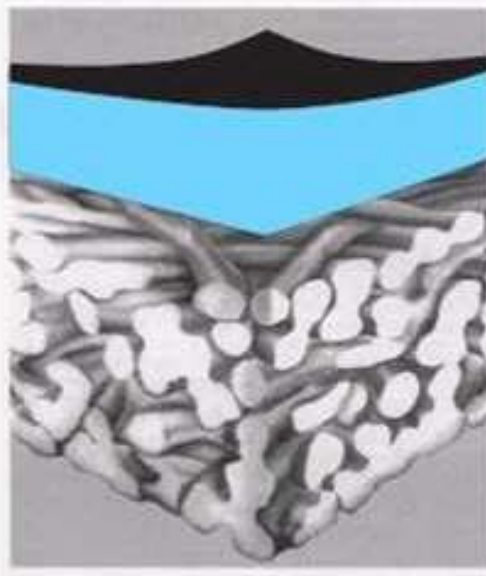
- + Altamente selectiva y delgada
- + Capa porosa
- + Proporcionar soporte mecánico y permite el flujo libre de compuestos que penetren a través de la capa no porosa.

3.4.5.3 Estructura de membrana compuesta. Compuesto de un solo polímero, caro para hacer exótico, polímeros altamente personalizados y producido en pequeñas cantidades, consiste en una delgada capa selectiva hecha de un polímero montado sobre una membrana asimétrica, que está hecho de otro polímero.

La estructura compuesta permite a los fabricantes usar materiales fácilmente disponibles para la porción asimétrica de la membrana y polímeros especialmente desarrollados, que son altamente optimizado para la separación requerida, para la

capa selectiva. Las estructuras compuestas se están utilizando en la mayoría de las más nuevas membranas avanzadas de eliminación de CO₂ porque las propiedades de la capa selectiva se pueden ajustar fácilmente sin aumentar el costo de la membrana significativamente.

Figura 35. Estructura de membrana compuesta



Fuente: 26th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, Volume 38, 1st Edition

3.4.5.4 Elementos de una membrana. Fabricado en una de dos formas:

- + Hoja plana
- + Fibra hueca

➤ **Hoja plana**

Es una combinación con un elemento enrollado en espiral. Dos láminas planas de membrana con un permeado espaciador en el medio están pegadas a lo largo de tres de sus lados para formar un sobre (u hoja) que es abierto en un extremo. Los sobres están separados por separadores de alimentación y envueltos alrededor de

un tubo de permeado con sus extremos abiertos frente al tubo de permeado. El alimento entra a lo largo del costado de la membrana y pasa a través de los espaciadores de alimentación separando los sobres (Hojas). A medida que el gas viaja entre los sobres, compuestos como CO_2 y H_2S y otros altamente permeables penetran en el sobre.

Los componentes permeados tienen solo una salida: deben viajar dentro del sobre al tubo de permeado. La fuerza impulsora para el transporte es el bajo contenido de permeado y altas presiones de alimentación.

➤ **Gas permeado**

Entra en el tubo de permeado a través de agujeros perforados en el tubo. Viaja por el tubo para unirse al permear desde otros tubos. Cualquier gas de alimentación que no tenga posibilidad de penetrar las hojas a través del costado del elemento opuesto a la posición de alimentación.

➤ **Consideraciones de optimización**

Involucra el número de capas y diámetro del elemento

Numero de capas

El gas permeado debe viajar por la longitud de cada capa. Tener muchas capas más cortas tiene más sentido que unos pocos más largos porque la caída de presión se reduce en gran medida en el caso anterior.

Diámetro del elemento

Los diámetros de paquete más grandes permiten mejores densidades de empaque, pero aumentan el tamaño del tubo del elemento y disminuyen el costo.

También aumenta el peso del elemento, lo que hace que los elementos sean más difíciles de manejar durante instalación y reemplazo.

➤ **Fibra hueca**

Muy finas fibras huecas se envuelven alrededor de un tubo central en un patrón muy denso. En este patrón de envoltura, ambos extremos abiertos de la fibra terminan en una olla de permeado en un lado del elemento el gas de alimentación fluye capa y entre fibras, y algunos componentes penetran en ellas.

El gas permeado luego viaja dentro de las fibras hasta que llegue a la olla de permeado, donde se mezcla con el permeado de otras fibras. El permeado total sale del elemento a través de una tubería de permeado.

➤ **Vendedores principales**

Espiral enrollada= UOP, Medalla, Kvaerner

Fibra hueca= Cynara (NATCO)

3.4.5.5 Consideraciones principales de diseño de membranas

➤ **Tasa de flujo**

El área requerida del elemento de membrana es directamente proporcional al flujo desde la membrana, los sistemas son modulares. Las pérdidas de hidrocarburos

(perdidas por ventilación) son directamente proporcionales. El porcentaje de pérdidas de hidrocarburos (pérdidas de hidrocarburos /hidrocarburos de alimentación) permanecen igual.

➤ **Temperatura de funcionamiento**

Un aumento en la temperatura aumenta la permeabilidad de la membrana y disminuye la selectividad. Se reduce el requisito de área de membrana, pero las pérdidas de hidrocarburos y la potencia del compresor de reciclo para sistemas de varias etapas aumenta.

➤ **Presión de alimentación**

Un aumento en la presión de alimentación, disminuye la permeabilidad y selectividad. Crea una mayor fuerza impulsora en toda la membrana que da como resultado un incremento neto en la permeación a través de la membrana y decrecimiento en los requerimientos de área de la membrana. Aumento de la presión máxima de funcionamiento da como resultado un sistema más barato y más pequeño. Los factores limitantes son:

- + Límite de presión máxima para el elemento de membrana
- + Costo y peso del equipo en la mayor presión nominal

➤ **Presión de permeado**

Exhibe los efectos opuestos de la presión de alimentación. Baja la presión de permeado e incrementa la fuerza motriz y reduce los requisitos del área requerida. A diferencia de la presión de alimentación, la presión de permeado tiene un fuerte efecto en las pérdidas de hidrocarburos.

➤ **Regulaciones ambientales**

Dicta qué se puede hacer con el gas permeado, venteo (ventilación fría o caliente) a la atmósfera o quemado, ya sea directa o catalíticamente. El 95-99% de CO₂ produce bajo contenido de Btu /scf (la llamarada requiere un mínimo de 250 Btu /scf para ser quemada).

4. CASOS DE ESTUDIO Y SIMULACIONES

4.1 DESHIDRATACIÓN CON GLICOL

4.1.1 Diseño, simulación y comparación cuantitativa y cualitativa de una planta de deshidratación operando con Trietilenglicol vs Tetraetilenglicol. El campo Guajira ubicado en áreas rurales del municipio de Manaure, al norte de Colombia con una producción de aproximadamente 640 MMscfd de gas, con características de composición pesada (Gas rico) es operado por la reconocida empresa Standard Oil Company.

Con la finalidad de tratar toda la producción de gas que arroja el campo y manejar de manera más eficiente las características y propiedades de dicho gas, la empresa contrató a General pipe, reconocida empresa prestadora de servicios para realizar el diseño y simulación de una planta de deshidratación de gas natural con Trietilenglicol (TEG) que cumpla con la regulación nacional en materia de calidad del gas y con reglamentaciones en materia de cuidado del medio ambiente. Sin embargo, el principal objetivo de la empresa operadora es que la General realice un análisis general de factibilidad de remplazar Trietilenglicol por Tetraetilenglicol con el fin de deshidratar de manera más eficiente el gas de composición pesada y llevarlo a condiciones de punto de rocío óptimo, ahorrándose así un proceso aguas abajo de la planta de deshidratación.

La operadora requiere para determinar factibilidad que la General Pipe:

Determine los cambios de la curva de puntos de rocío en la envolvente de fases del gas, al cambiar de solvente (TEG vs TREG). ¿El TREG es efectivo para reducir el HCDP en el gas? Si es el TREG es efectivo en reducir el HCDP, identificar los

equipos de proceso que van a requerir modificación o un esquema especial de mantenimiento. Investigar las nuevas temperaturas en los equipos del regenerador al usar el TREG como solvente y determinar tasa de gas stripping requerida por planta de deshidratación con TEG en caso que la planta con TREG deshidrate de manera más eficiente el gas de entrada, esto con la finalidad de evaluar costos operativos.

Es importante tener en cuenta, para la presentación final ante las directivas de la empresa operadora, se requieren las memorias de diseño, diagramas, gráficas de comportamiento paramétrico, dimensionamiento de equipos, balances de masa y demás datos pertinentes e importantes con el fin de vender el proyecto.

Las condiciones del gas de entrada son las siguientes:

- + Presión de entrada = 1200 psig
- + Temperatura de entrada = 100 °F
- + Flujo de gas = 200 MMSCFD
- + Máximo contenido de agua en el gas de salida = 4 lb H₂O /MMscf
- + Temperatura ambiente = 104 °F
- + Para el diseño y simulación de la planta de deshidratación con TEG, utilizar la cromatografía del gas Guajira
- + Para las simulaciones y comparaciones TEG vs TREG utilizar la cromatografía extendida del gas Guajira
- + El paquete termodinámico utilizado en este caso fue Peng Robinson.

4.1.2 Parámetros operacionales para el diseño de la planta de deshidratación con TEG y TREG.

+ Cromatografía Gas guajira

En la tabla 13, se tiene datos mas especificos de la cromatografia del gas Guajira, sienta esta un cromatografia extendida.

La cromatografía extendida; es una técnica analítica de uso muy extendido, empleada para determinar la composición de una mezcla de productos químicos; un cromatógrafo de gases utiliza diversos gases en su operación en función del analizador y del tipo de detector. El uso del gas especial y los equipos correctos cuando se realiza una cromatografía de gases mejora considerablemente la precisión de resultados.

Tabla 13. Cromatografía Gas guajira - PROMIGAS

Componentes	Fracción molar
Metano	0,9796
Nitrógeno	0,0151
Dióxido de carbono	0,0017
Etano	0,0026
Propano	0,0005
Agua	0
Sulfuro de Hidrógeno	0
Hidrógeno	0
Monóxido de Carbono	0
Oxígeno	0
i-Butano	0,0002
n-Butano	0,0001
i-Pentano	0,0001
n-pentano	0
n-Hexano	0,0001
n-Heptano	0
n-Octano	0
n-Nonano	0
n-Decano	0
Total	1

En la tabla anterior, se puede observar la composición del gas Guajira, suministrada por la pagina PROMIGAS; en esta composición la cantidad de componentes pesados es mínima, por tanto, basados en esto, se considera un gas seco. Con esta cromatografía se realizará el diseño principal de la planta de deshidratación con Trietilenglicol TEG.

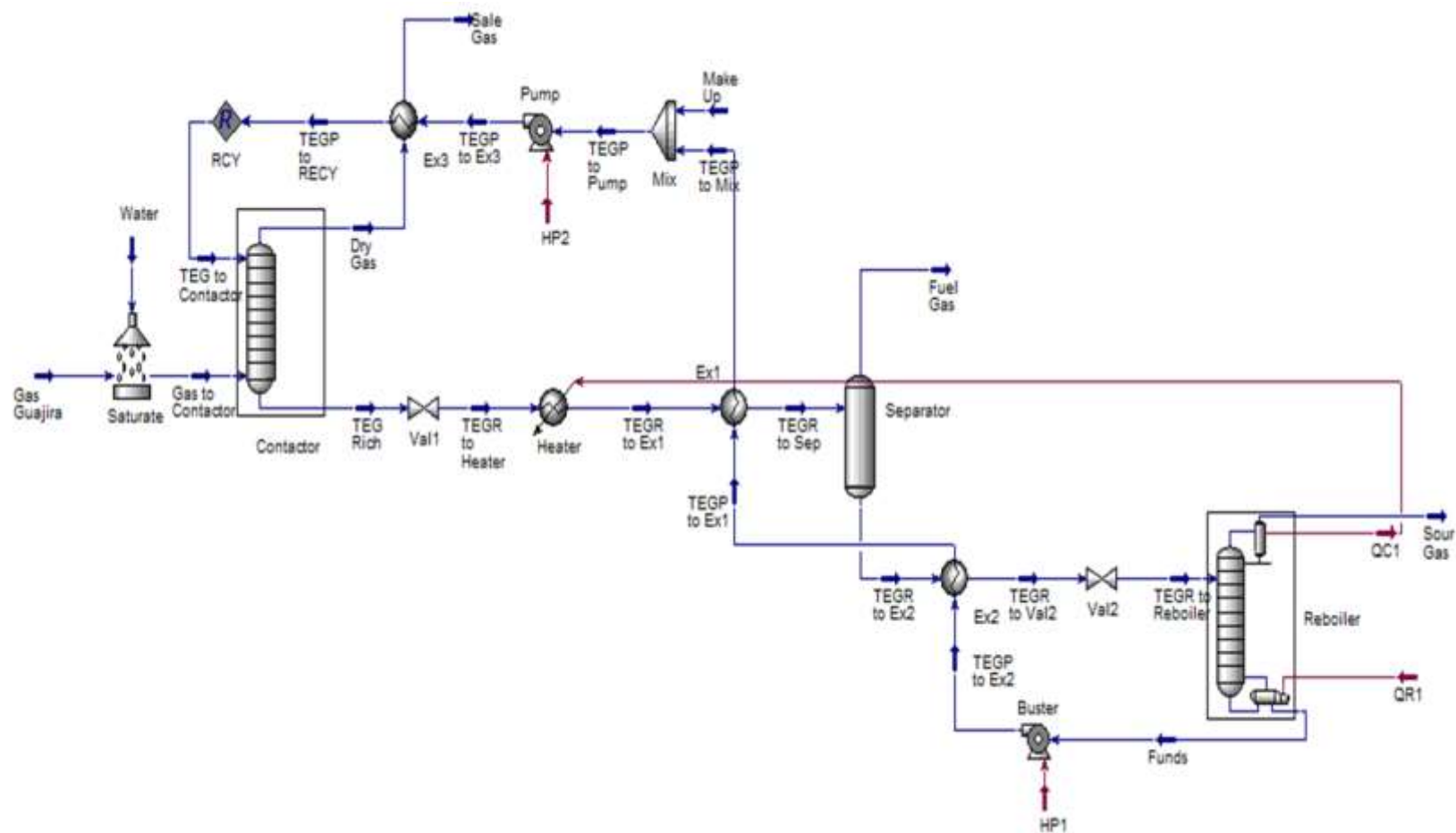
NOTA: Solo para este caso y basado en la composición observada.

Cromatografía extendida Gas guajira

Tabla 14. Cromatografía extendida del Gas guajira

Componentes	Fracción molar
Oxígeno	0,003122
Nitrógeno	0,020402
Dióxido de carbono	0,002311
Metano	0,970587
Etano	0,001795
Propano	0,000534
i-Butano	0,000469
n-Butano	0,000117
i-Pentano	0,000186
n-pentano	0,000046
Ciclopentano	0,000069
3-Metilpentano	0,000016
n-Hexano	0,000030
Benceno	0,000002
3,3-Dimetilhexano	0,000001
Ciclo hexano	0,000055
2,3- Dimetilbutano	0,000003
3,3- Dimetilbutano	0,000007
Trans-1,3-Dimetilciclopentano	0,000006
Trans-1,2-Dimetilciclopentano	0,000007
n-Heptano	0,000017
Metilciclooctano	0,000017
Etilciclopentano	0,000004
Trans,cis-1,2,3-Trimetilciclopentano	0,000005
Tolueno	0,000002
Trans-1,4-Dimetilciclohexano	0,000003
2,3 Dimetilciclohexano	0,000012
o-xileno	0,000005
Etilcicloheptano	0,000002
Trans-trans-1,2,4-Trimetilciclohexano	0,000005
Etilbenceno	0,000003
p-Xileno	0,000002
n-Nonano	0,000013
n-Decano	0,000145
TOTAL	1

Esquema 1. Simulación de planta de deshidratación con glicol



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

4.1.3 Dimensionamiento de los equipos utilizados en el proceso. En cualquier diseño de procesos es necesario emplear equipos eficientes que ayuden al correcto funcionamiento de la planta y controlen cualquier cambio no deseado de las variables operativas, con el fin de tener un proceso, eficiente, seguro y rentable. Por todo esto y según las condiciones de la naturaleza de el fluido a tratar en este caso del gas, los parametros operativos a manejar y las condiciones de entrega; solo se deben utilizar la cantidad de equipos pertinentes e indispensables en el proceso, minimizando así, un diseño mas complicado y por lo tanto más riesgoso, inseguro y económicamente inviable.

NOTA: En el diseño realizado para la Planta de deshidratación con TEG y TREG se utilizaron los mismos equipos con el fin de realizar una comparación con menos incertidumbre entre los dos tipos de glicol. De igual forma, para el diseño de la planta de deshidratación con la composición del Gas guajira Tabla No2, se vincula el Software HYTEG, software de diseño de plantas de deshidratación.

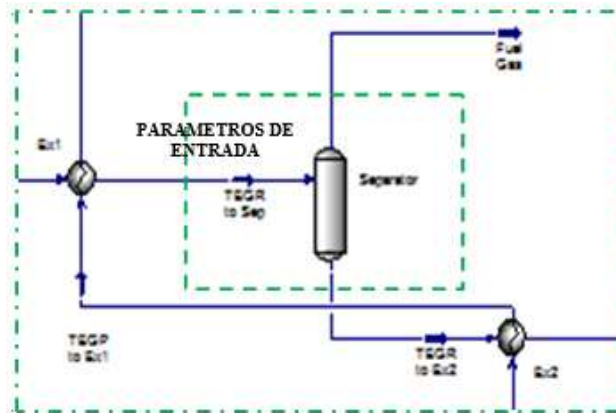
4.1.3.1 Separador. En el diseño de la planta se utilizó un separador vertical aguas abajo del primer intercambiador de calor con el fin de retirar una parte de los gases combustibles que se evaporizaron debido al aumento de la temperatura. En la tabla 15 se pueden observar los parámetros necesarios para realizar el diseño de separadores en OILTREAT.

OILTREAT, es un software que permite realizar diseños óptimos y completos de separadores cumpliendo con los parámetros de las normas API 12J que establece los criterios para el diseño de estos. Este diseño se realizó bajo la teoría del asentamiento de la gota, la cual es la teoría más probada para el diseño de este tipo de equipos.

Tabla 15. Parámetros de diseño del separador

PARAMETROS DE ENTRADA					
DATOS OBTENIDOS DE HYSYS	VALOR	UNIDADES	DATOS EXTRAS	VALOR	UNIDADES
Flujo másico	17390	Lb/ hora	PM Agua	18,01528	Lbm/Lbmol
Peso molecular Corriente de entrada al separador	117,8	Lbm/Lbmol	Densidad de Agua	374,5	Lb/Bbl
Fracción molar de agua a la salida del separador	0,2213		Gravedad específica del agua	1.07	Asumida
Flujo molar Gas	1344000	Ft3/dia	API	15	Asumida
Peso molecular del Gas	17,45	Lbm/Lbmol	Tiempo de retención	5	mn
Presión de entrana al separador	43	psig	Tamaño de la Gota	140	Micras
Temperatura de entrada al separador	200	°F			
Caudal Total a la entrada del separador	1055	Bbl/d			
CALCULOS					
MOLES TOTALES (Lbmole)		DATOS DE ENTRADA			
$Total\ Moles = \frac{Mass\ Flow}{PM}$	147,52309	Variable	Valor	Unidades	
MOLES DE AGUA (Lbmol)		Condiciones de Operación			
$Water\ Moles = Total\ Moles \times Xs\ (Fraction\ Water)$	32,669	Presión	43	psig	
		Temperatura	200	F	
FLUJO MASICO DEL AGUA (Lb/Hora)		Gas			
$Water\ Mass\ Flow = Water\ moles \times PM\ Water$	588,5410	GOR	1321,16	SCF/STB	
		Gravedad Especifica	0,602	-	
CAUDAL DE AGUA (Bbls/d)		Factor de Compresibilidad	1	-	
$Rate\ Water = \left(\frac{Flow\ Mass\ Water}{Density\ Water} \right) \times 24$	37,717	Aceite			
		Caudal	1017,3	BOPD	
CAUDAL DE ACEITE (Bbls/d)		Gravedad API	15	-	
$Rate\ OIL = Total\ Rate - Water\ Rate$	1017,283	Agua			
CORTE DE AGUA		Corte de Agua	3,575	%	
$BSW = \frac{Rate\ Water}{Rate\ Total}$	0,035750629	Gravedad Especifica	1,07	-	
		Sólidos Totales	100891	ppm	
GOR (SCF/STB)		Datos Especificos			
$GOR = \frac{Rate\ GAS}{Rate\ Oil}$	1321,16617	Tr. Liquido	5	min	
		Diámetro Gota Liq.	140	µm	

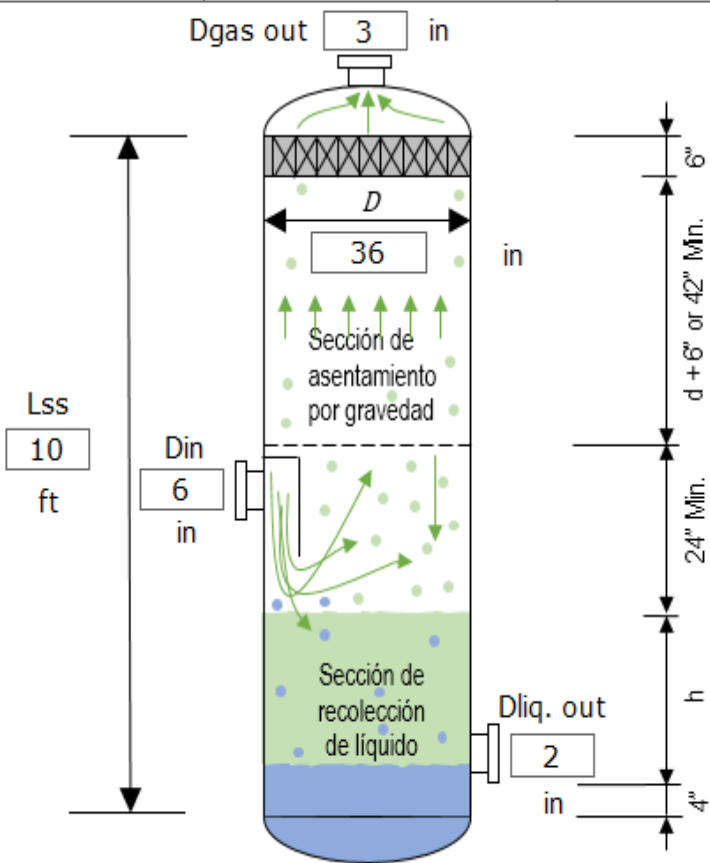
Esquema 2. Sistema de separación en una planta de deshidratación



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modeling)

Esquema 2. . Parámetros obtenidos del software de diseño para el separador

DATOS DE SALIDA		
Variable	Valor	Unidades
Diámetro	36	in
Longitud Costura-Costura	10	ft
Diámetro Boquilla Entrada	6	in
D. Boquilla Salida Gas	3	in
D. Boquilla Salida Líquido	2	in
Espesor	0	in
Peso	0	lb



d (in)	h (in)	Lss (ft)	Lss Comercial (ft)	SR
36	35,88	9,32	10,00	3,11

Fuente: Tomado del software de diseño OILTREAT

Uno de los equipos más importantes en el sistema es el separador, debido a esto su diseño debe ser adecuado y debe cumplir con parámetros de seguridad como se había citado anteriormente. Al integrar todos los datos de entrada al equipo se logró obtener los resultados mostrados en el esquema 3. Donde uno de los valores más importantes es el diámetro (36”) estando este dentro de los diámetros comerciales y cumpliendo con la relación de esbeltez que representa que tan uniforme será el separador se debe tener cuenta que el diámetro depende principalmente de la viscosidad del fluido a tratar que esta intrínsecamente relacionada con el tiempo de retención, para este diseño se asumió API de 15 crudo peso y tiempo de retención de 5mn. De igual forma, el diseño arrojó longitud entre costuras que representa la sección gravitacional del equipo, entre otras secciones.

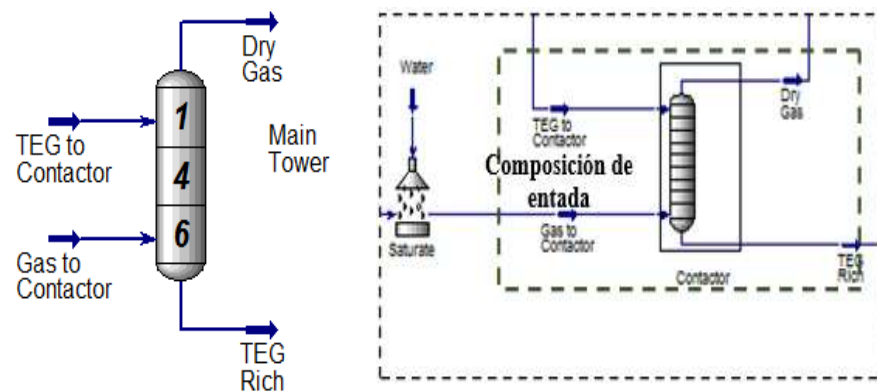
Tabla 16. Tiempos de retención según API

Table 4-2 Retention Time for Two-Phase Separators	
°API Gravity	Retention Time (Minutes)
35+	0.5 to 1
30	2
25	3
20+	4+

Fuente: Ken Arnold & Maurice Stewart, Surface production operation, Vol 1, 3ra Edicion, 204

4.1.3.2 Contactor de glicol

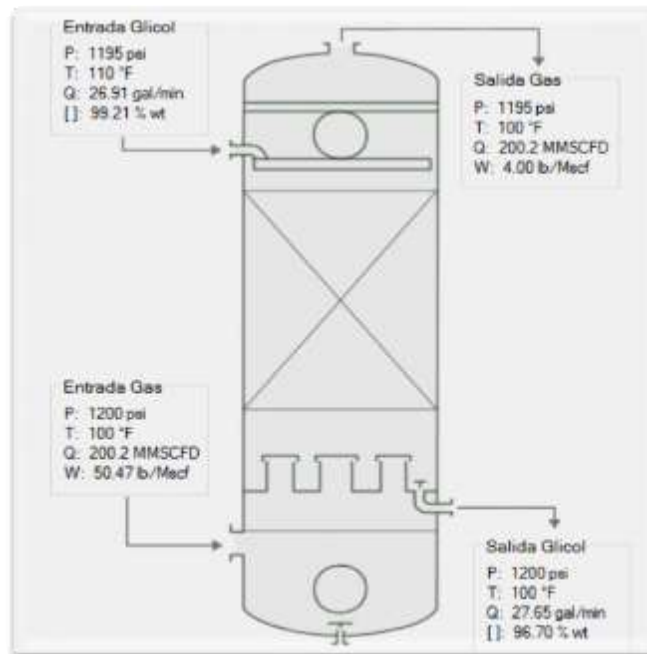
Esquema 3. Sistema del contactor de glicol



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

NOTA: Para este diseño se utilizó la composición inicial del gas saturado con agua, es decir posterior a el saturador.

Esquema 4. Parámetros obtenidos del software de diseño para el contactor



Fuente: Tomado del software de diseño HYTEG

Como se puede observar en el esquema 5 y la figura 36; posterior al ingreso de los datos respectivos para realizar el diseño, el Software de diseño HYTEG entrega datos que son vitales para realizar la planeación de la planta en general. Estos datos se basan en el contenido de agua que trae el gas a tratar, en la temperatura del mismo etc. HYTEG, realiza una serie de correlaciones para calcular la cantidad de agua dando datos muy cercanos a HYSYS V8.8 software en el cual estamos haciendo las simulaciones respectivas. Ej: En el software HYTEG se aborda el gas de entrada al contactor como un Gas Acido según su composición y con contenido de agua de 50.5 Lb/MMSCF; mientras que en HYSYS el contenido de agua está en 50,41 Lb/MMSCF representando así datos cercanos y un grado de incertidumbre bajo a la hora de realizar el diseño.

Como ingenieros de diseño y manejo operativo de la planta debemos tener en cuenta las pérdidas de presión, temperatura, volumen, entre otros parámetros que puedan cambiar a lo largo del proceso, aspectos como la caída de presión en un intervalo de (5-10) psi que se presenta al utilizar Glicol como agente deshidratador, aspectos como las pérdidas de glicol a lo largo del sistema y la cantidad de reposición de glicol, de igual forma es necesario considerar a que temperatura debe entrar el Glicol en la cima del contactor con el fin de no tener arrastre de glicol en el gas de venta, normalmente se utiliza una temperatura 10°F sobre la temperatura del gas de entrada. Un segundo aspecto, pero no menos importante es la composición del Glicol que está entrando a la contactora, este será un tema a tratar posteriormente ya que se requiere un análisis detallado de varias variables representativas para el sistema.

Como se había mencionado anteriormente una serie de parámetros son necesarios para el diseño y funcionamiento de un contactor; en este caso se harán énfasis en dos de ellos, como lo son composición del TEG de entrada al contactor y configuración de diseño del contactor.

- **Composición másica del Trietilenglicol (TEG) a la entrada del contactor.**

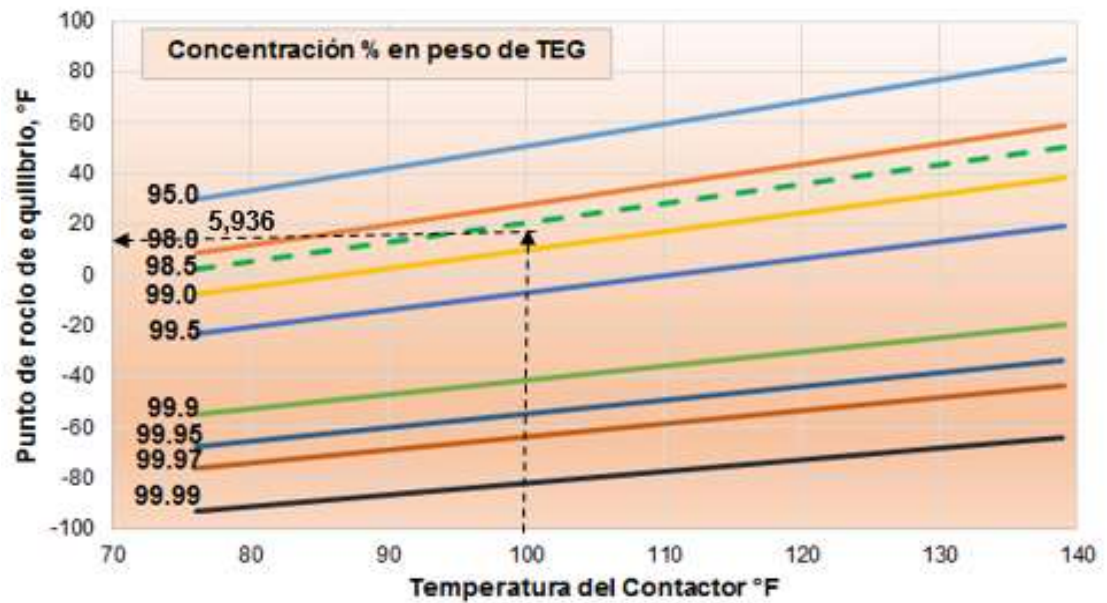
Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes en todo el sistema de la planta, en este caso nos centraremos en la función que cumple esta variable en el rehervidor donde se efectúa la mejora del Trietilenglicol es decir se retira todos los componentes que causan impurezas en el TEG, con el fin de obtener composiciones de más del 90% de pureza en el glicol. Es importante entender que, aunque el aumento de temperatura en el rehervidor ayuda a la mejora del TEG, hay ciertas condiciones de temperatura como ya antes se había mencionado que deben ser cumplidas con la finalidad de no degradar el glicol dentro del rehervidor, por tanto, se debe hacer la planeación de esta variable con valores cercanos a 400°F. De igual forma, es necesario tener en cuenta que a temperaturas máximas de 400°F en el rehervidor, se logran obtener concentraciones de hasta 98,5-98.7% de pureza del TEG sin embargo no es recomendado llegar a este límite de Temperatura. A pesar de esto, es necesario mantener niveles de pureza altos en el TEG de entrada al contactor y es por esto que herramientas como Gas Stripping deben ser utilizadas, como ya se había mencionado.

Tabla 17. Datos de diseño del contactor

T. Rocio de Equilibrio:	5.9 °F
Temp. del Contactor:	100 °F
Concentración TEG pobre:	99.2 %
Gas de Despojo:	Es Necesario

Figura 36. Punto de rocío en equilibrio del agua Vs Temperatura a varias concentraciones de TEG



Fuente: Tomado del software de diseño HYTEG

✚ Gas stripping

Esta herramienta permite suministrar Gas combustible o seco al rehervidor con el fin de mejorar la calidad del TEG, en este caso de estudio, es necesario utilizar gas stripping ya que la calidad del TEG para llevar el gas a 4 Lb/MMSCF de agua según el diseño obtenido en el software HYTEG debe tener una concentración de TEG Pobre del 99.2%. Se debe tener en cuenta que la máxima tasa para que sea viable utilizar gas stripping es de 10 SCF/galón TEG, si la tasa de stripping requerida es mayor a este valor, otros métodos como Coldfinger, drizo, entre otros pueden ser empleados.

➤ Configuración de diseño del contactor

Como ya se había especificado anteriormente el contactor puede estar configurado con platos o con empaque.

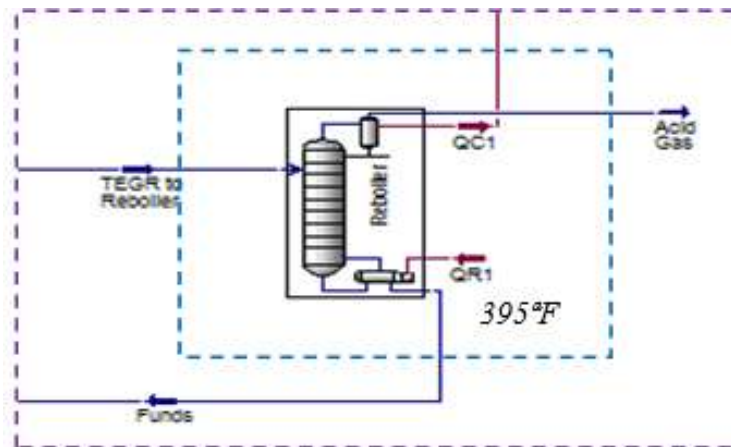
En este caso, el diseño que tuvimos en cuenta fue un contactor de platos, en este caso 6 platos. Ya que el dato teórico dado por el software de diseño fue de 1.5 número de etapas teóricas. Según reglas comerciales de platos para contactor el intervalo va de 3-12 platos y 2-6 metros para empaque. Por tanto, según el valor teórico 6 platos es la máxima cantidad que el contactor puede tener.

Tabla 18. Datos de configuración estructural de un contactor

Eficiencia de Remoción de Agua	92.1%
Concentración de TEG pobre	99.2% en peso
Relación de Recirculación de TEG	4.17 gal TEG/ lb H2O removida
N. de etapas Teóricas del contactor	1.5
Tasa de circulación de TEG	26.91 gal/mn

4.1.3.3B Rehervidor

Esquema 5. Sistema del rehervidor en el proceso de regeneración



Esquema 6. Datos de diseño del rehervidor



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

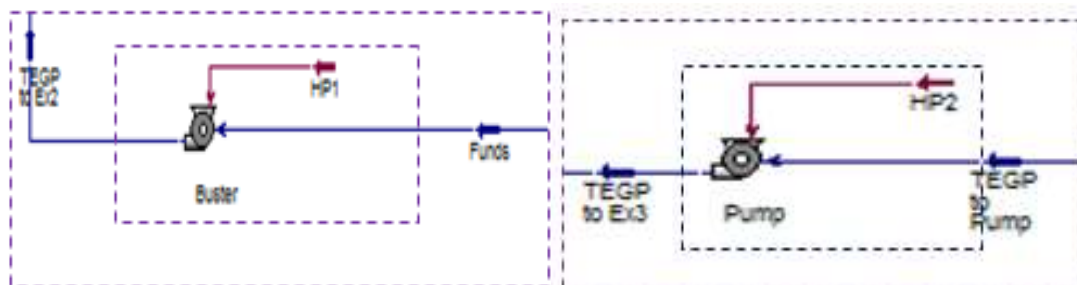
Tabla 19. Diseño del condensador y rehervidor

Equipo	Condensador	Rehervidor
Diámetro (ft)	3,914	3,914
Altura(ft)	5,871	5,871
Volumen(ft³)	70,63	70,63
%Volumen Líquido	50	50
Tipo de configuración	Cilíndrico Horizontal	Cilíndrico Horizontal
ΔP (Psi)	0	1

Fuente: Tomado del software de diseño HYTEG

4.1.3.4 Bomba

Esquema 7. Sistemas de bombas en la planta de deshidratación con glicol



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Dos parámetros se deben tener en cuenta a la hora de diseñar Bombas, estos son la temperatura de salida y la potencia requerida para llevar el fluido a ciertas condiciones de presión, normalmente la temperatura de entrada y salida a la bomba debe estar por debajo de 200°F ya que por encima de este valor la bomba empieza a sufrir daños mecánicos como por ejemplo deterioro en sus sellos, en la Bomba 1, se utilizó una bomba booster con ciertas condiciones de manufactura y esta solo realizara un de delta de presión de 40 psi, por tanto solo se afectará por la temperatura a la que tiene que trabajar y no por el proceso de aumento de presión que debe realizar.

Tabla 20. Parámetros operativos de las bombas del proceso

Parámetros	Bomba 1	Bomba 2
Trabajo requerido(HP)	1052	27,45
Temperatura de salida(°F)	395	161,5

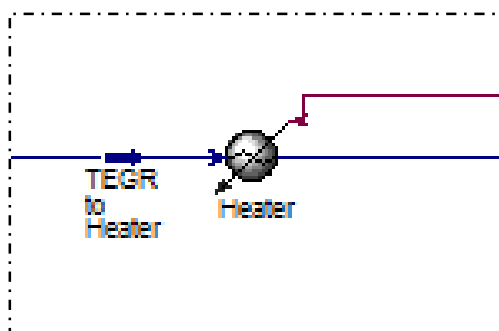
4.1.3.5 Intercambiador de calor. Tres intercambiadores de calor fueron utilizados en el diseño con el fin de llevar los fluidos hasta temperaturas óptimas para el proceso, uno de los intercambiadores de calor más importantes es el intercambiador de calor 2 ya que lleva la temperatura de 200°F hasta 350°F reduciendo así la carga térmica que debe realizar el rehervidor para purificar el Trietilenglicol.

Tabla 21. Parámetros de diseño del intercambiador de calor

Intercambiador de calor			
Parámetros	Ex1	Ex2	Ex3
Capacidad calórica (BTU/h)	754000	1669000	458000
Temperatura de salida (°F)	200	350	
ΔP en los tubos (psi)	5	5	5
ΔP en carcasa (psi)	5	5	5

4.1.3.6 Calentador

Esquema 8. Sistema del equipo de calentamiento



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Es un equipo que permite calentar una corriente, esto lo hace utilizando flujo de calor (BTU/h), en el diseño realizado se utilizó este con el fin de optimizar el proceso de calentamiento antes de entrar al primer intercambiador de calor, optimizando el proceso en aproximadamente 10 °F dados a la corriente de entrada, de igual forma este no representa un gasto de energía de flujo para el sistema ya que se utilizó la energía de flujo que sale de la corriente del rehervidor en la cima, es decir en el condensador.

Tabla 22. Parámetros del diseño del calentador

Calentador	
Parámetros	Calentador
Capacidad calórica utilizada (BTU/h)	82850
Temperatura de entrada (°F)	114,8
Temperatura de salida (°F)	123,6

4.1.4 Balance de masa y energía en planta de deshidratación con TEG composición gas Guajira

4.1.4.1 Balance de masa

Tabla 23. Balance de masa de la planta de deshidratación con glicol

	Unit	Gas guajira	Water	Gas to contactor	Teg to contactor	Dry gas	
Temperature	°F	100	100	100	110	101,792993	
Pressure	psig	1200	1200	1200	1195	1195	
Molar flow	MMSCFD	200	0,213	200,21	-	-	
Mass flow	lb/hr	359053	421,348	359475,25	16306	359012,9	
	TEG Rich	TEGR to Ex1	TEGR to step	TEGP to Ex1	TEGP to mix	Fuel gas	TEGR to Ex2
Temperatura	101,502	123,604	200	243,777	166,11754	200	200
Pressure	1200	48	43	36	31	43	43
Molar flow	-	1,3021	1,3021	1,067	1,067	0,034	1,2679
Mass flow	16768,7	16768	16768	16304	16304	65,395	16703

4.1.4.2 Balance de energía

	Unit	QC1	QR1	HP1	HP2
Heat flow	Btu/hr	82579,1657	905438,393	2676,16892	69842,8108

4.2 ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE LA PLANTA DE DESHIDRATACIÓN OPERANDO CON TEG, COMPOSICIÓN GAS GUAJIRA

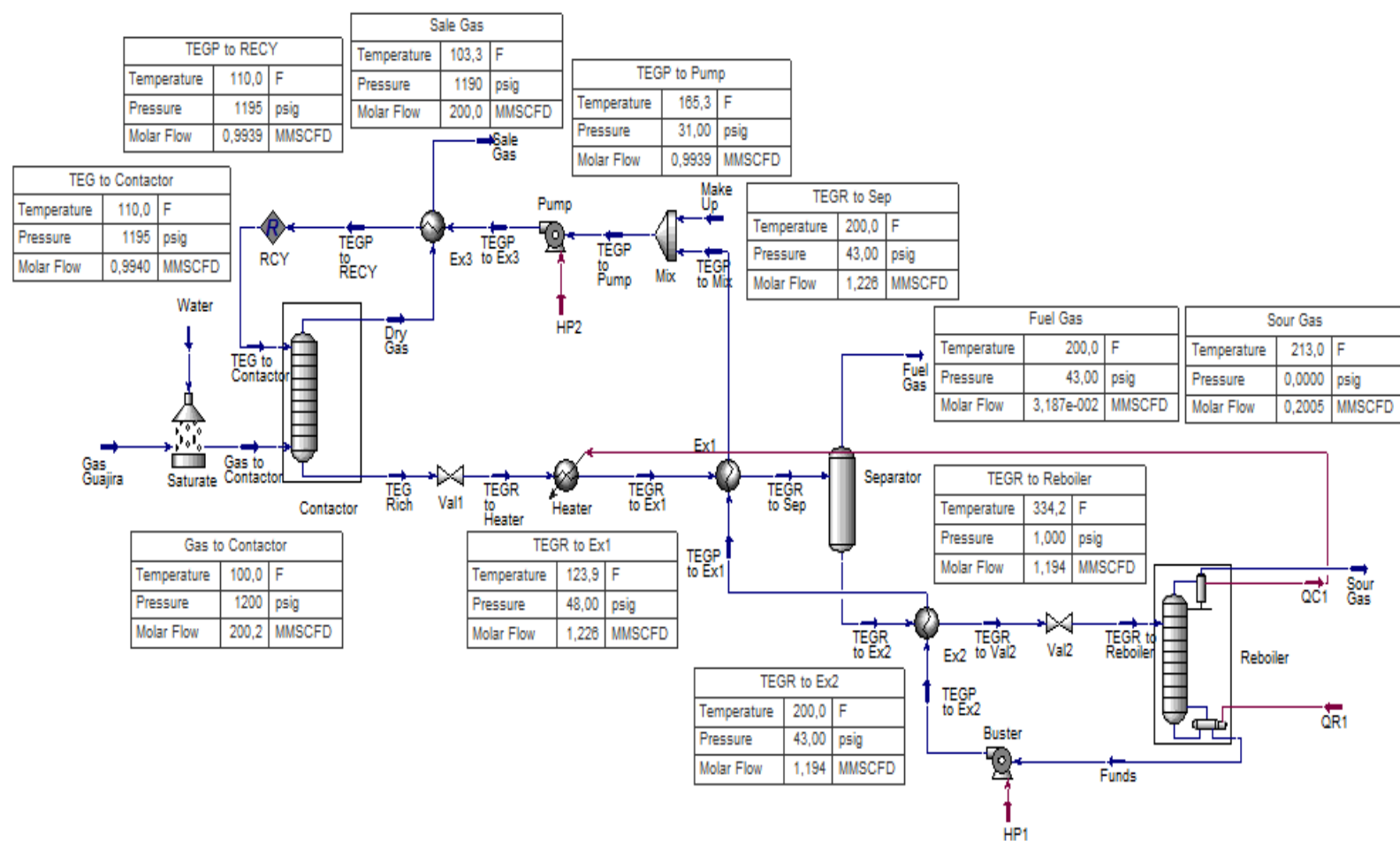
En el punto anterior se realizó el balance de masa y energía de todo el sistema obteniendo que todo el proceso está siendo eficiente y que las pérdidas de energía son mínimas, de igual forma se puede observar en el esquema 10, cada uno de los equipos utilizados por el proceso lo cuales fueron analizados. Posterior a esto, se pasó a analizar los resultados obtenidos en el gas de venta.

➤ Composición obtenida en el gas de venta HYSYS

Tabla 24. Composición del gas de venta

Componentes	Fracción molar
Metano	0,9795
Nitrógeno	0,0151
Dióxido de carbono	0,0017
Etano	0,0026
Propano	0,0005
i-Butano	0,0002
n-Butano	0,0001
i-Pentano	0,0001
n-Pentano	0
n-Hexano	0,0001
H2O	0,0001

Esquema 9. Análisis paramétrico de planta de deshidratación con Trietilenglicol



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Si se realiza una comparación entre la composición de entrada del gas al contactor y la composición de salida del gas, se puede observar la disminución de fracción molar de agua en la composición de salida.

➤ **Contenido de agua en el gas de entrada Vs contenido de agua en el gas de venta**

El parámetro más importante a la hora de evaluar la eficiencia del proceso de deshidratación con glicol es el contenido de agua en el gas de venta o el gas de salida de la contactora.

Tabla 25. Cantidad de agua removida del gas natural

Contenido de agua		Unidades
Gas de entrada	Gas de salida o venta	
50,41	3,472	Lb/MMscf
28,84	1,986	Bbls/d
Diferencia		
26,85		Bbls/d

En los resultados anteriores, obtenidos en la simulación en HYSYS se puede observar que el contenido de agua a la salida del gas de venta es de menos que 4 Lb/MMSCF que era el contenido requerido lo que quiere decir que el proceso fue eficiente y redujo aún más la cantidad de agua del gas, eliminando aproximadamente 27 Barriles de agua por día de la corriente del gas de entrada. Con el fin de realizar un análisis más detallado de esta variable y de los factores que la afectan como ya se había mencionado anteriormente, se analizó una variable que antes no se había mencionado.

➤ Tasa de recirculación de TEG

La tasa de recirculación de TEG, aunque antes no se había mencionado es un parámetro crucial en todo el proceso, ya que esta es el flujo de volumen líquido de TEG que entra al contactor, y se define como galones de TEG por libra de agua removida, variable que normalmente está en un intervalo de (3-5). Sin embargo, como ya se había mencionado hay una correlación de variables y esta no es la excepción, por ejemplo, en el caso de tener algún inconveniente en el rehervidor y por tanto disminuir la temperatura en el fondo del mismo, se comprometerá directamente la composición del TEG pobre; por tanto, una decisión rápida y segura se debe tomar, en primera instancia se determinará si hay gas stripping en el sistema y si la tasa del mismo cumple con las condiciones para satisfacer la calidad del TEG, en el caso en que no haya gas stripping o la tasa no sea la adecuada, la principal variable a tratar es la tasa de recirculación, entonces, el operario debe aumentar la tasa de recirculación hasta donde sea posible según límites permitidos y así contrarrestar el problema hasta que se solucione el inconveniente en el rehervidor de manera rápida y apropiada. Para observar de qué manera la tasa de TEG y el gas stripping afecta el contenido de agua en el gas de salida se realizaron los siguientes casos de estudio.

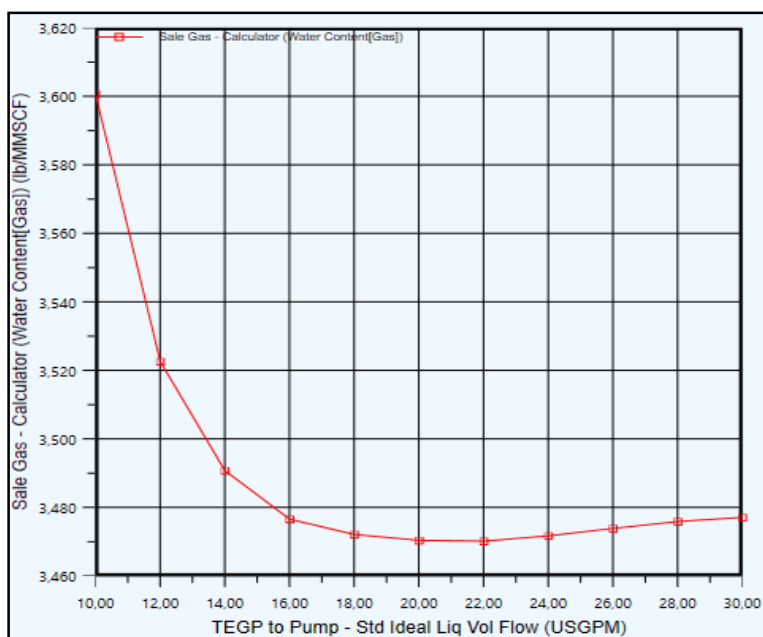
Se puede observar en el esquema 11, el comportamiento del contenido del agua en el gas de salida o venta al variar la tasa de circulación de TEG, obteniéndose disminuciones considerables del contenido de agua cuando las tasas de recirculación aumentan, sin embargo, es importante observar que bajo algunas condiciones el contenido de agua podría aumentar a tasas críticas, sin embargo, el indicador de la gráfica es positivo con respecto a las regulaciones de venta del gas a cumplir.

Tabla 26. Datos de Caso de estudio tasa de circulación de TEG

State	TEGP to Pump - Std Ideal Liq Vol Flow [USGPM]	Sale Gas - Calculator (Water Content[Gas]) [lb/MMSCF]
State 1	10,00	3,601
State 2	12,00	3,523
State 3	14,00	3,491
State 4	16,00	3,477
State 5	18,00	3,472
State 6	20,00	3,470
State 7	22,00	3,470
State 8	24,00	3,472
State 9	26,00	3,474
State 10	28,00	3,476
State 11	30,00	3,477

Fuente: Simulados en Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Esquema 10. Caso de estudio Contenido de agua del gas de venta Vs Tasa de flujo de TEG



Fuente: Datos de caso de estudio obtenidos de la simulación de planta de deshidratación con TEG del gas guajira, mediante el software Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

➤ **Gas stripping**

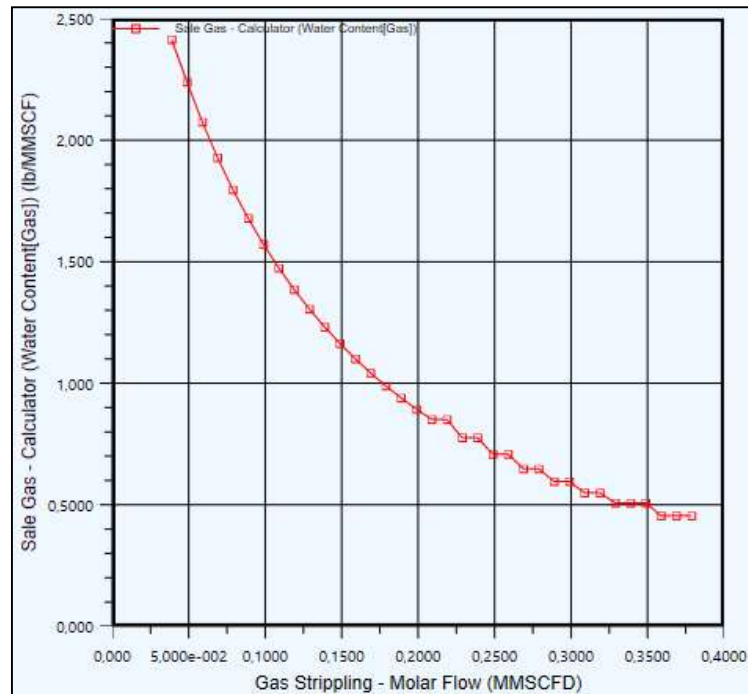
Tabla 26. Datos de caso de estudio gas stripping

State	Gas Stripping - Molar Flow (MMSCFD)	Sale Gas - Calculator (Water Content(Gas)) (lb/MMSCF)
State 4	6,880e-002	1,928
State 5	7,880e-002	1,796
State 6	8,880e-002	1,679
State 7	9,880e-002	1,572
State 8	0,1088	1,475
State 9	0,1188	1,386
State 10	0,1288	1,306
State 11	0,1388	1,232
State 12	0,1488	1,164
State 13	0,1588	1,101
State 14	0,1688	1,043
State 15	0,1788	0,9893
State 16	0,1888	0,9396
State 17	0,1988	0,8939
State 18	0,2088	0,8510
State 19	0,2188	0,8510
State 20	0,2288	0,7757
State 21	0,2388	0,7757
State 22	0,2488	0,7079
State 23	0,2588	0,7079
State 24	0,2688	0,6484

Fuente: Simulados en Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Aunque las condiciones de contenido de agua en el gas son las especificadas por el RUT, se analizó el efecto del gas stripping, observándose en el esquema 12 la disminución drástica del contenido de agua en el gas de venta. Siendo este un método que lograría optimizar el proceso de remoción de agua en una planta de deshidratación con glicol, en este caso TEG.

Esquema 11.Caso de estudio contenido de agua del gas de venta Vs tasa de gas stripping



Fuente: Datos de caso de estudio obtenidos de la simulación de planta de deshidratación con TEG del gas guajira, mediante el software Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

➤ Temperatura del rehervidor

En este caso, se realizó el análisis de la temperatura del rehervidor para determinar cómo afecta esta variable a la concentración de TEG pobre y por lo tanto a la cantidad de agua a la salida del proceso en el flujo de gas. Para esto se realizaron once tarimas de análisis desde temperaturas de 300° F hasta temperaturas de 400°F, temperatura a la cual ya no es rentable trabajar.

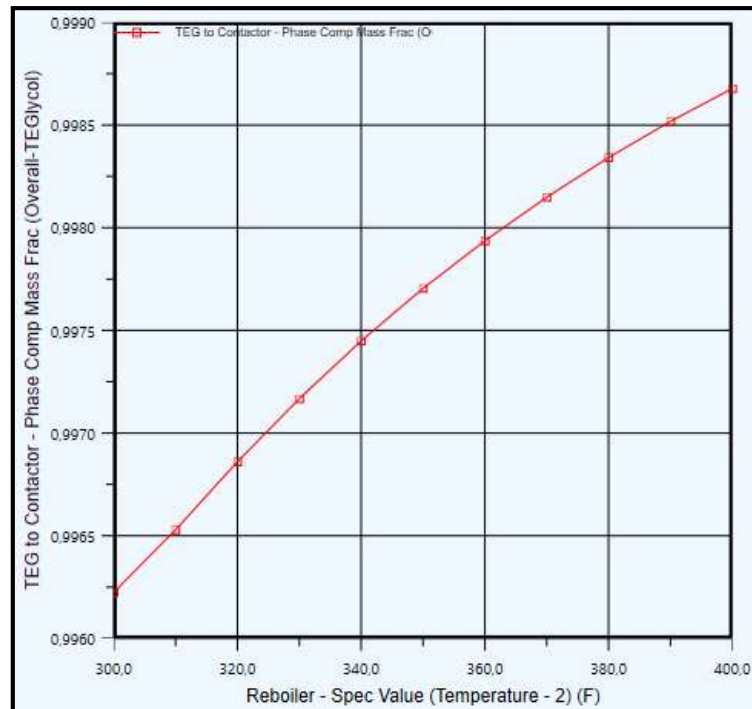
Tabla 27.Datos de caso de estudio de Temperatura del rehervidor

State	Reboiler - Spec Value (Temperature - 2) [F]	TEG to Contactor - Phase Comp Mass Frac (Overall- TEGlycol)
State 1	300,0	0,9962
State 2	310,0	0,9965
State 3	320,0	0,9969
State 4	330,0	0,9972
State 5	340,0	0,9974
State 6	350,0	0,9977
State 7	360,0	0,9979
State 8	370,0	0,9981
State 9	380,0	0,9983
State 10	390,0	0,9985
State 11	400,0	0,9987

Fuente: Simulados en Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

En el esquema (), claramente se puede observar que el aumento de temperatura representa un aumento considerable de la concentración de TEG pobre y por tanto de su pureza. Tres variables importantes en el proceso de deshidratación fueron evaluadas, es importante que la empresa operadora antes de decidir cualquier opción, analice los resultados de optimización de estas tres variables, con el fin de determinar la rentabilidad del proyecto enfocado en el ahorro monetario y la eficiencia del mismo.

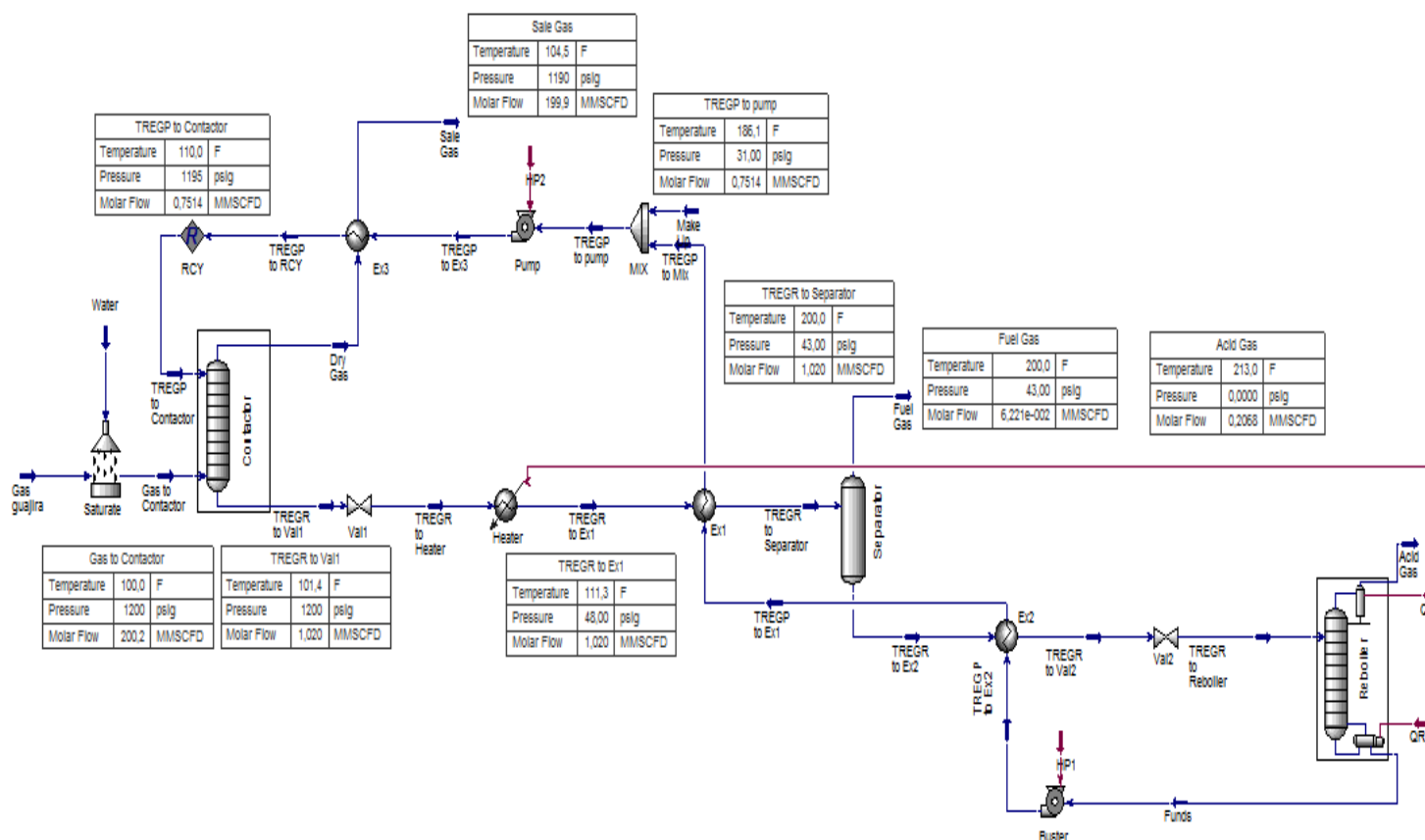
Esquema 12. Caso de estudio pureza (Concentración) de TEG Vs Temperatura del rehervidor



Fuente: Datos de caso de estudio obtenidos de la simulación de planta de deshidratación con TEG del gas guajira, mediante el software Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

4.2.1 Análisis comparativo de usar tetraetilenglicol en plantas de deshidratación de gas vs trietilenglicol con gas de composición pesada (composición extendida gas Guajira)

Esquema 13. Análisis paramétrico de planta de deshidratación con Tetraetilenglicol



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Como se observa en el esquema 14, se realizó una planta de deshidratación de gas con TREG bajo el mismo diseño ya antes mencionado y analizado. De igual forma se realizó la planta de deshidratación con TEG, pero con la **composición del gas extendido**.

➤ **Contenido de agua en el gas de salida con TREG Vs TEG**

Tabla 28. Comparación del proceso de absorción de agua TEG Vs TREG

Planta de deshidratación con TREG		
Contenido de agua		Unidades
Gas de entrada	Gas de salida o venta	
28,84	1,986	Lb/MMscf
29,02	1,455	Bbls/d
Diferencia		
27,56		Bbls/d
Planta de deshidratación con TEG		
Contenido de agua		Unidades
Gas de entrada	Gas de salida o venta	
50,73	3,493	Lb/MMscf
29,02	1,998	Bbls/d
Diferencia		
27,02		Bbls/d

En la tabla 28 se puede observar que el Tetraetilenglicol tiene mayor eficiencia que el trietilenglicol para deshidratar el gas, sin embargo; se debe tener en cuenta si a nivel económico y operativo es realmente más adecuado que trietilenglicol y si el de glicol en la planta de gas de la guajira favorece la operación.

Para realizar el análisis anterior, se deben tener en cuenta una serie de criterios en el tratamiento de gas, una serie de procesos intervienen con el fin de llevar el gas a condiciones específicas de venta, dentro de estas, además de la deshidratación el recobro de líquidos para manejo del punto cricondentérmico se debe tener presente, según el RUT gases con punto de rocío por encima de 45°F no son recibidos, debido

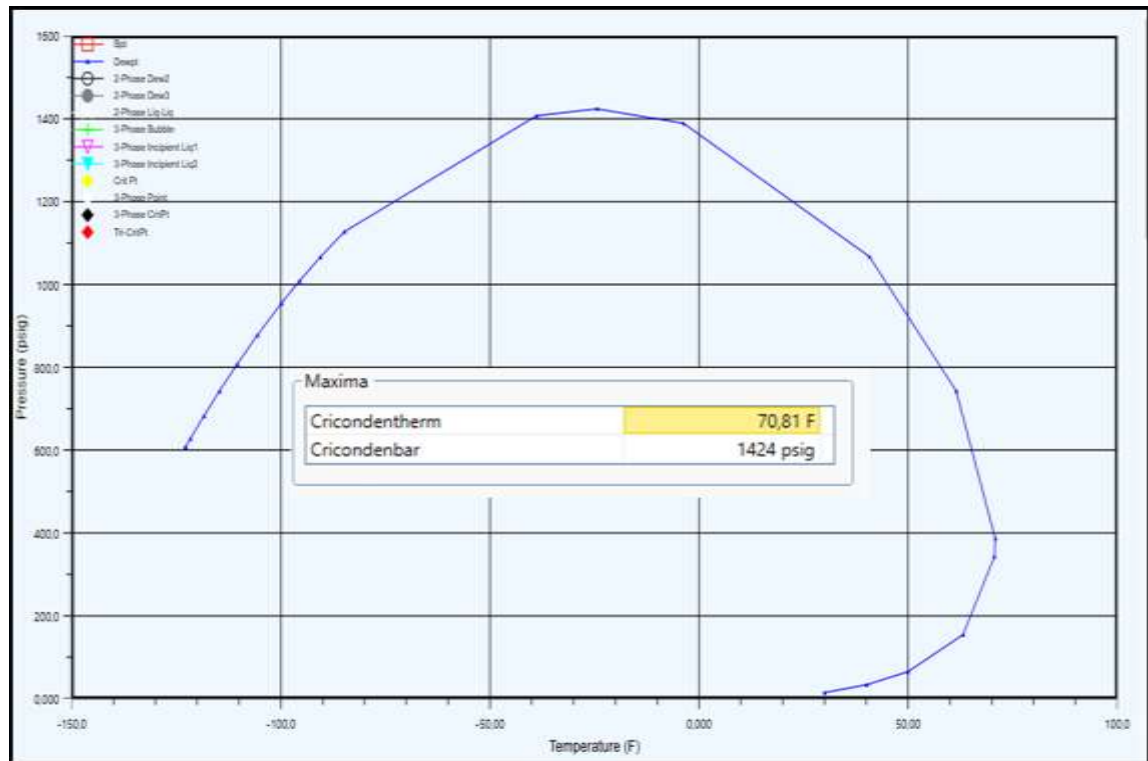
a esto el gas además de pasar por el proceso de deshidratación en el cual solo retiramos agua del gas debe pasar por otros equipos para llevarlo a condiciones de venta, sin embargo, como ya antes lo había mencionado la era de los sistemas pequeños pero eficientes es la moda mundial, entonces, ¿Qué pensaríamos acerca de deshidratar y disminuir el punto cricondentérmico del gas al mismo tiempo solo por el cambio del Glicol en la planta?. Este análisis fue hecho y arrojo los siguientes resultados.

➤ **Punto cricondentérmico a la entrada y salida del proceso utilizando Trietilenglicol Vs Tetraetilenglicol**

Como se puede observar en el esquema 15 en la siguiente página, representado por la utilización de Trietilenglicol y Tetraetilenglicol como solvente de deshidratación y las gráficas 16 y 17 donde se permite observar cada envolvente según las condiciones de salida del gas. Se concluyó que el solvente Tetraetilenglicol ofrece mayor eficiencia de remoción de agua y control del punto de rocío que el trietilenglicol, por lo tanto, utilizando este solvente el proceso de tratamiento de un gas puede ser menos costoso y más eficiente. Sin embargo, es necesario realizar aguas abajo del proceso de deshidratación una separación del Glicol que se pierde por arrastre en la corriente de gas, ya que este en primera instancia perturba la envolvente y hace ver un valor de temperatura cricondentérmico más elevado de lo que realmente es; por tanto, un equipo de mejora para esta problemática es utilizar un Splitter de separación y luego un separador para dividir parte pesada y gas, con el fin de obtener el punto cricondentérmico real que arroja el proceso. Otros procesos aguas abajo se deben tener en cuenta luego de la salida del gas de este tren de separación, procesos como compresión y enfriamiento con el fin de cumplir con reglamentos de presiones entre (500 -1200 psi) y temperaturas (40-120°F) para venta, esto se puede observar en el diagrama de procesos. Debido a lo anterior, el Tetraetilenglicol es efectivo al momento de deshidratar y disminuir el punto cricondentérmico; a pesar de haber

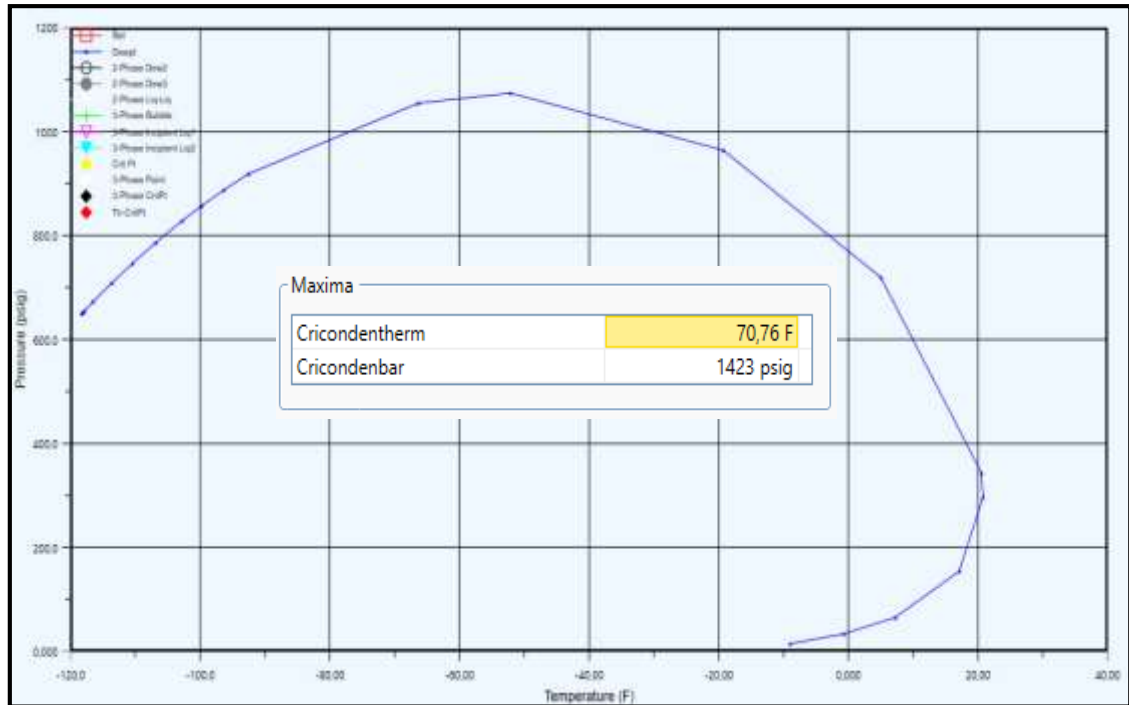
realizado el mismo procedimiento aguas debajo de la planta de deshidratación con Trietilenglicol el punto de rocío alcanzada fue de 5 °F menos que el de entrada.

Esquema 14. Envoltente del gas de entrada a la planta de glicol utilizando solvente TEG y TREG.



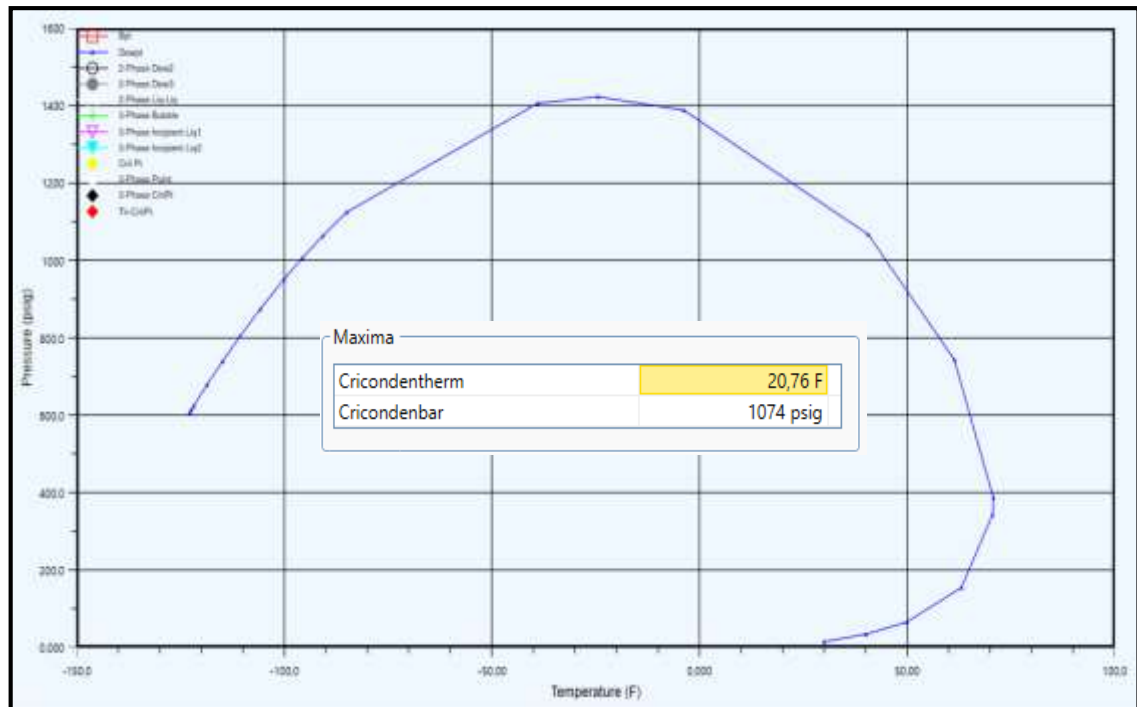
Fuente: Tomado software Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modeling)

Esquema 15.. Envolverte de gas de salida utilizando TEG como solvete de absorción



Fuente: Tomado software Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modeling)

Esquema 16. Envoltente de gas de salida utilizando TREG como solvente de absorción



Fuente: Tomado software Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modeling)

Equipos del proceso que se deben emplear y que requiere modificación al utilizar Tetraetilenglicol como solvente absorbedor

Rehervidor

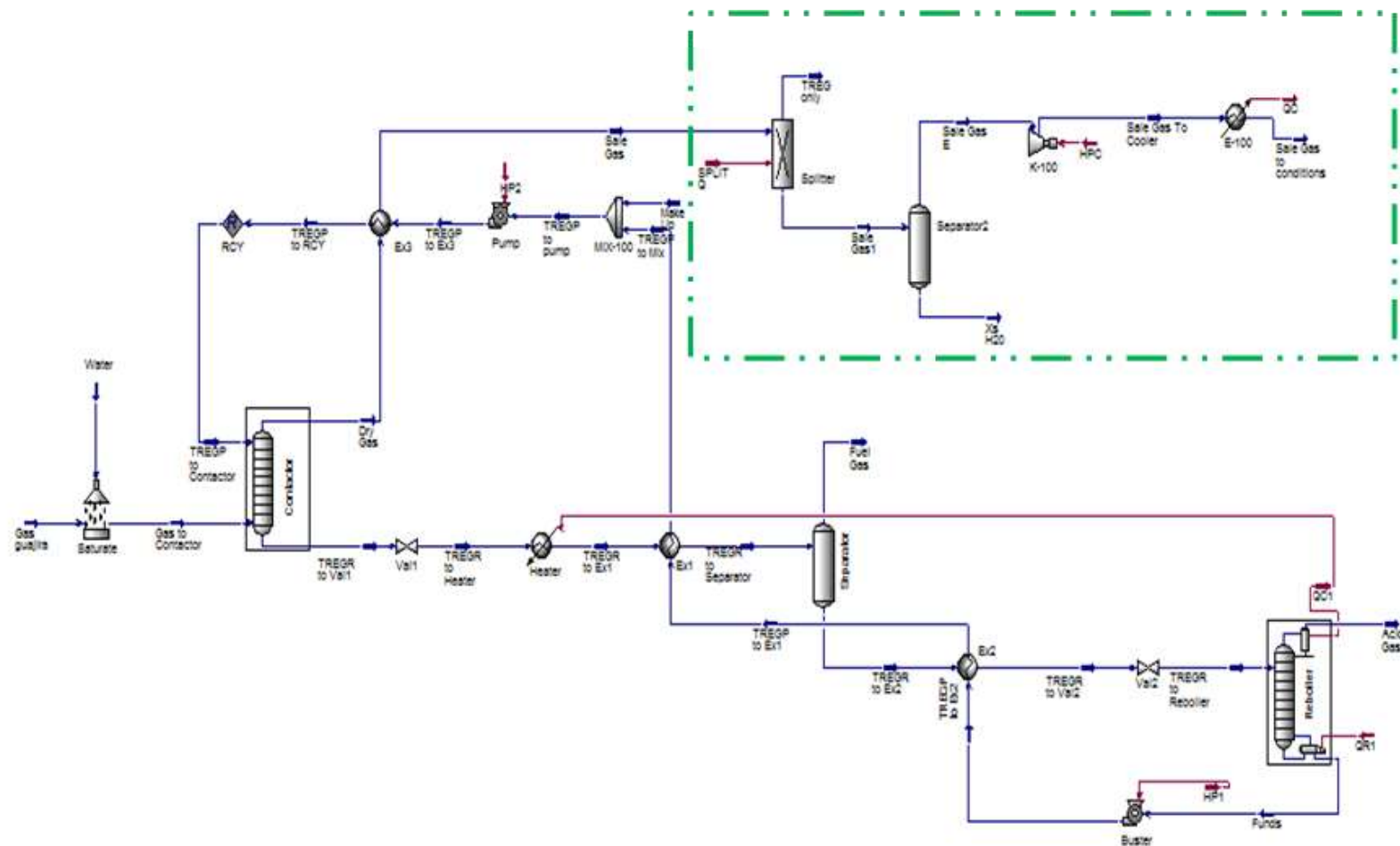
Como ya antes se había mencionado, el rehervidor ahora debe trabajar a condiciones de temperatura más elevadas pero que no pasen de 460°F con el fin de no degradar el Tetraetilenglicol. Temperatura de operación óptima (450-455 °F).

Contactor

Debido a que el TEG es más viscoso se debe analizar el número de platos que debe tener la torre contactora con el fin de evitar pérdidas de Glicol en la corriente del gas de entrada y por tanto evitar una tasa elevada de Glicol de reposición; a lo largo del sistema se presenta mucha contaminación por este solvente por tanto se deben

hacer inspecciones en todo el proceso y en cada equipo en intervalos más cortos y analizar la temperatura de entrada del Glicol al absorbedor, para obtener un punto de mejora en el control de este sobre el proceso.

Esquema 17. Equipos adicionales en planta de deshidratación con TREG



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Splitter y separador

Estos son equipos que se deben tener en cuenta durante el proceso con el fin de llevar el gas a las condiciones óptimas para observar la temperatura cricondentérmica del proceso; estos equipos solo retiran el Glicol que se perdió en la corriente de gas, con el fin de evitar una envolvente de fase contaminada con otros productos.

Intercambiador de calor

Debido al aumento de temperatura en el Rehervidor y con el fin de minimizar la carga de energía del equipo se aumentó la temperatura de salida del segundo intercambiador hasta 370 °F, no se logró aumentar más ya que se comprometían equipos como las bombas que solo soportan 200 °F máximo por tanto se afectaba la temperatura de la corriente de entrada a este equipo, de igual forma el límite de trabajo de los intercambiadores es más o menos hasta 400 °F estar dejado de este valor evita daños en el equipo.

Compresor y enfriador

Aguas abajo del Splitter y separador un tren de Compresor y enfriador es sugerido para llevar el gas a condiciones apropiadas según normatividad.

➤ **Gas stripping requerido en la planta de TEG para alcanzar las condiciones de deshidratación del TREG**

Se realizaron una serie de casos de estudio utilizando el software de simulación HYSYS y se obtuvo la cantidad de gas stripping que una planta operando con trietilenglicol necesita para llegar a las condiciones de deshidratación del

Tetraetilenglicol, una tasa de 0,001165 SCF/Galón de TEG es decir un flujo de 0,0334 MMSCFD es requerida.

Tabla 29. Tasa de gas stripping

Tasa de gas de stripping	
Contenido de agua	50,73
Tasa de recirculación	26,91
Gas stripping (SCF/Gal TEG)	0,001165
Tiempo (Días)	1440
Gas stripping Máximo	10 SCF/Gal TEG
Molar Flow Requerido	0,03344

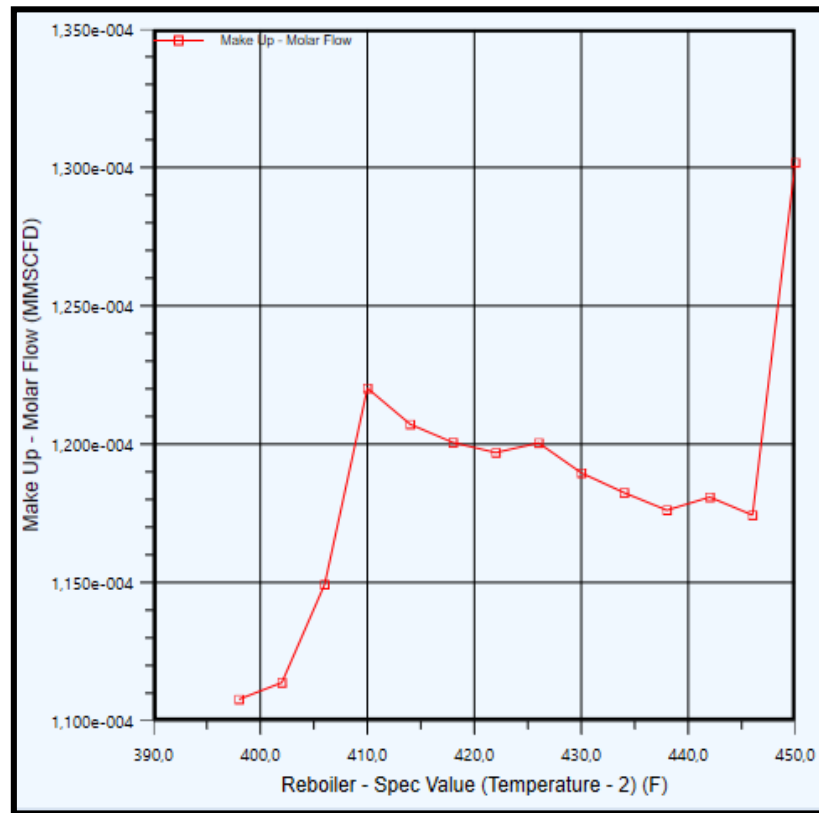
Tabla 30. Tasas de Gas stripping, tarimas de análisis en plantas de deshidratación con TEG

State	Gas Stripping - Molar Flow [MMSCFD]	Sale Gas - Calculator (Water Content[Gas]) [lb/MMSCF]
State 1	3,000e-002	2,610
State 2	3,200e-002	2,610
State 3	3,400e-002	2,534
State 4	3,600e-002	2,490
State 5	3,800e-002	2,490
State 6	4,000e-002	2,411

Fuente: Simulados en Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

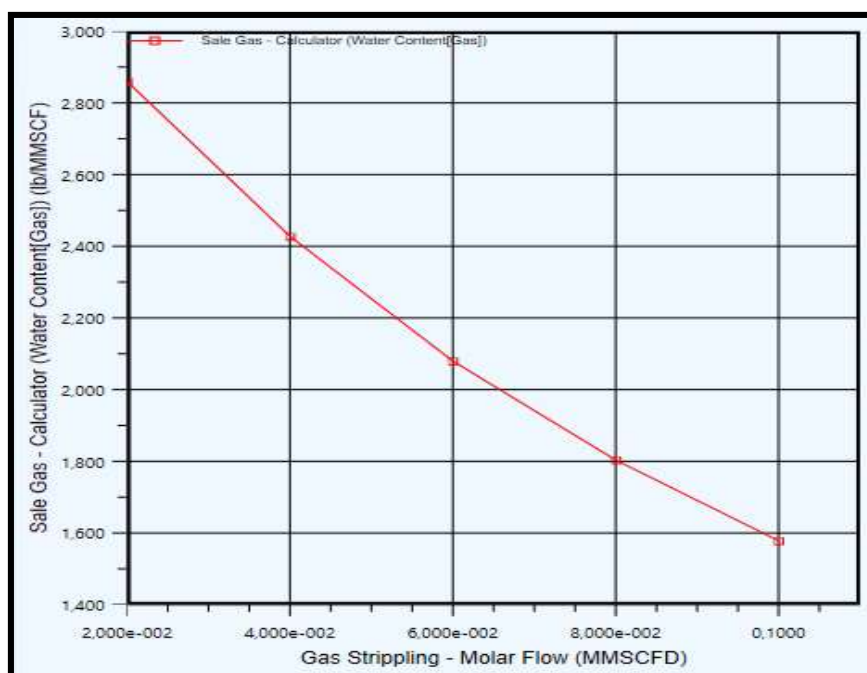
En la tabla se puede observar las diferentes tarimas que se realizaron en el software con el fin de observar la tendencia del gas stripping y como este afecta al contenido de agua en el gas de salida. Claramente estos datos se pueden visualizar en el esquema 19.

Esquema 18. Caso de estudio tasa de gas stripping Vs Contenido de agua en el gas de salida



Fuente: Tomado software Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modeling)

Se realizó una simulación especial, con el fin de reconocer las posibles soluciones de problemas operativos que se puedan presentar en la planta.



En este caso se analizaron dos variables representativas como lo son el flujo de TEG de make Up (Reposición) y la temperatura del rehervidor, observándose que a medida que la temperatura del rehervidor disminuye la cantidad de flujo de reposición aumenta con el fin de contrarrestar el déficit de calidad del Glicol.

El gas de producción debe pasar por una serie de etapas con el fin de cumplir las especificaciones según el RUT y otros entes de regulación, por esto uno de los parámetros cruciales para cumplir la reglamentación es la deshidratación del gas. A nivel mundial, la era de la industria 4.0 se está haciendo notar, lo que conlleva a que los procesos sean más pequeños, pero igual de eficientes que los procesos a gran escala, por tanto, las empresas se están preparando para ser pioneras en esta nueva era industrial, para esto necesitan al mejor equipo de trabajo que recopile ideas innovadoras. El cambio de Trietilenglicol por Tetraetilenglicol ofrece oportunidades de mejora en el campo Guajira, obteniendo así dos procesos de tratamiento en un solo sistema, por lo tanto, utilizar este nuevo solvente conlleva a beneficios tanto económicos como operativos.

4.3 ENDULZAMIENTO CON AMINAS

El campo patio bonito, operado por la empresa Trust well Service produce 700 MMscf de gas por día con características de gas ácido (Composicionalmente 1,72% de H₂S y 4,13% CO₂), la empresa requiere que los ingenieros a cargo realicen una planta de endulzamiento de gas con la finalidad de llevar el gas a especificaciones de transporte (2% CO₂ y 4 ppm H₂S) ya que, debido a las condiciones de este gas no es posible transportarlo o comercializarlo a precios justos de mercado.

Las condiciones del gas de entrada son las siguientes:

- + Presión de entrada = 1000 psia
- + Temperatura de entrada = 75 °F
- + Flujo de gas = 25 MMSCFD
- + Máximo contenido de CO₂ en el gas de salida = 2% molar
- + Máximo contenido de H₂S en el gas de salida = 4ppm

4.3.1 Parámetros operacionales para el diseño de una planta de endulzamiento con dietanolamina.

+ Composición del gas de campo Patio bonito

Los procesos más utilizados para endulzar el gas natural son aquellos que usan alcanolaminas, y de las alcanolaminas las dos más comunes son monoetanolamina (MEA) y Dietanolamina (DEA), los ingenieros realizaron un análisis del tipo de amina a utilizar en el proceso y determinaron a través de bases bibliográficas y ajustes históricos operacionales que la Monoetanolamina es más reactiva y corrosiva que la Dietanolamina y que debido a esto la MEA es restringida en 15-20 % en peso de concentración, mientras que la DEA se utiliza en un rango más alto (20-35% en peso), las cargas de soluciones ricas normalmente están limitadas al rango de 0.25 a 0.45 moles de gas ácido / mol MEA, mientras que en los sistemas DEA las cargas

pueden variar de 0.5 a 0.6 moles de gas ácido / mol DEA. La corrosividad de una solución de amina cargada está fuertemente influenciada por la proporción relativa de CO₂ a H₂S en el gas de alimentación, por tanto, teniendo en cuenta la acidez del gas de entrada y los problemas operativos que se pueden presentar en el proceso, se seleccionó la Dietanolamina como el solvente de absorción.

Tabla 31. Composición de gas ácido

Componentes	Fracción molar
N ₂	0,0016
H ₂ S	0,0172
CO ₂	0,0413
C ₁	0,8692
C ₂	0,0393
C ₃	0,0093
i-C ₄	0,0026
n-C ₄	0,0029
i-C ₅	0,0014
n-C ₅	0,0012
C ₆	0,0018
H ₂ O	0,0122

Tabla 32. Principales propiedades de las aminas

Propiedades de la amina	DEA
Concentración de solvente (% en peso)	28
Rango del temperatura del Rehervidor (°F)	260
Carga ácida (moles Gas ácido/ moles de amina)	0,5

Se debe tener en cuenta que, debido a condiciones del proceso, en el contactor la caída de presión por entrada de la amina es 5 psi y la temperatura de entrada de amina pobre normalmente esta 10°F por encima de la temperatura de entrada del gas, sin embargo, en este caso se establecerá la temperatura de la amina 20°F por encima, con el fin de evitar enfriamiento del gas en el contactor y condensación de hidrocarburos que representan problemas de espuma en el proceso.

Posterior al proceso de selección de solvente, los ingenieros determinaron el paquete termodinámico que mejor modelaría la planta de deshidratación. El paquete Amines contiene los modelos termodinámicos desarrollados por D.B. Robinson & Associates para su simulación de planta de amina patentado, AMSIM. Su solubilidad en gas ácido de equilibrio y parámetros cinéticos para soluciones acuosas de alcanolaminas en contacto con H_2S y CO_2 se han incorporado a este paquete de propiedades. El paquete de propiedades de Amines se ha ajustado a datos experimentales extensos recopilados de una combinación de Robinson.

El paquete Amines incorpora un modelo especializado de eficiencia de etapas para permitir la simulación de columnas en una bandeja real. El modelo de eficiencia de etapa calcula las eficiencias de etapa de los componentes de H_2S y CO_2 en función de las dimensiones de la bandeja y las condiciones de la torre interna calculada tanto para los absorbedores como para los separadores.

[illegible]

196

El diseño de una planta de endulzamiento con aminas muchas veces es comparado con el de una planta de deshidratación con glicol, y si, ambos procesos utilizan equipos con características geométricas y ubicación similar. Sin embargo, algunas plantas pueden tener más o menos accesorios dependiendo de las condiciones del gas a tratar. En este caso, partiendo de un diseño minucioso de equipos hecho en el caso de estudio de deshidratación en el cual se utilizó HYTEG y OILTREAT como simuladores de diseño principales, nos centraremos en el análisis de los equipos más importantes en la planta de endulzamiento y en la comprensión de la simulación estacionaria realizada en HYSYS.

4.3.2 Dimensionamiento de los equipos más importantes durante el proceso

➤ Contactor

Esquema 20. Parámetros de diseño de contactor



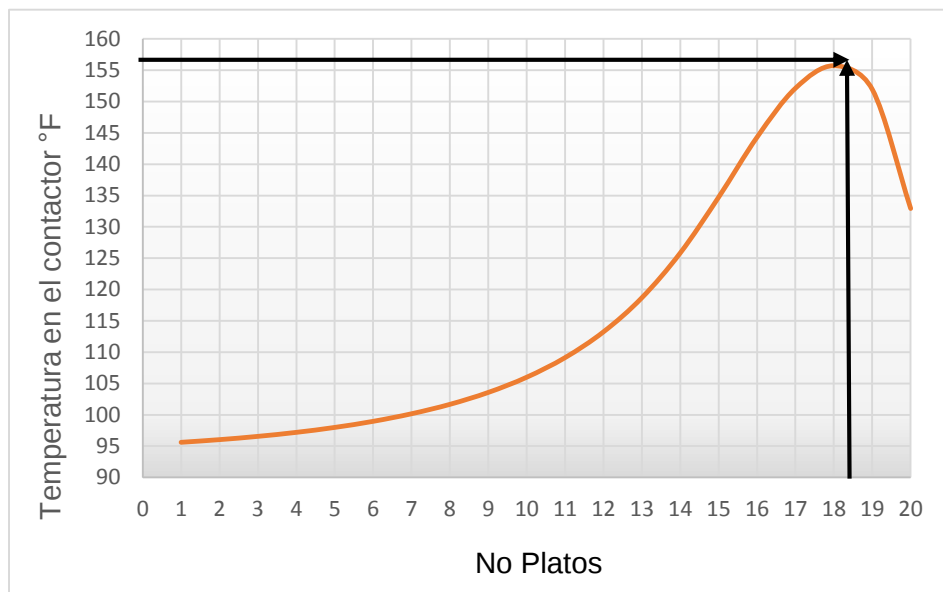
Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Como se había dicho anteriormente este es uno de los equipos más importantes durante el proceso, en este caso la torre absorbadora consta de 20 platos, número de platos comunes en este tipo de procesos, en donde en cada plato se realiza una reacción de equilibrio entre la amina y el gas de entrada, con la finalidad de que la amina absorba los componentes ácidos y el gas salga del contactor con un porcentaje bajo de estos componentes. Una característica muy importante con el fin

de mantener un funcionamiento más estable del equipo es dejar 2-4 platos en el tope de la torre para una sección de lavado con solvente acuoso (Agua), evitando así las pérdidas por evaporización de amina.

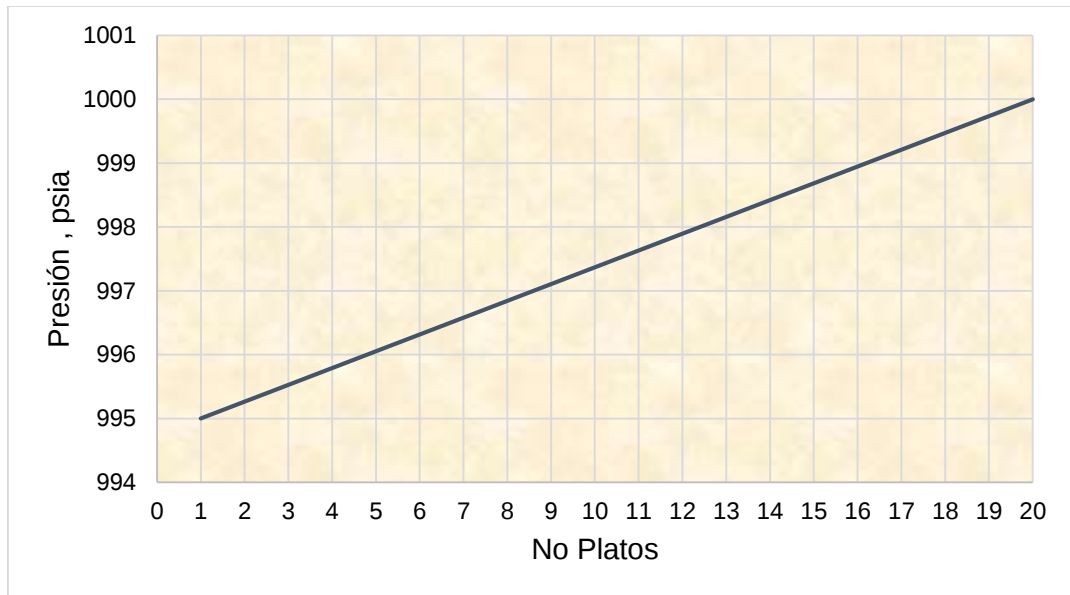
Es posible realizar un análisis paramétrico del funcionamiento del contactor en función de sus parámetros operacionales.

Esquema 21. Perfil de temperatura en el contactor



En el perfil de temperatura del contactor se puede observar que a partir del plato 18 la temperatura en la torre disminuye hasta finalmente llegar al plato No 20 en el cual se obtiene la menor temperatura en el sistema siendo esta 132,91 °, esto es el resultado de la entrada del gas ácido en la parte inferior de la torre el cual entra a una temperatura de 95°F.

Esquema 22. Perfil de presión en el contactor



En el perfil de presión, se puede observar que a medida que se avanza descendentemente en la torre la presión aumenta, esto se presenta, ya que en el tope de la torre contactora la caída de presión es de aproximadamente 5 psi, debido a la entrada de Amina a la torre.

Continuando con el análisis parámetro enfocado en este equipo, es posible visualizar el proceso que este realiza durante la operación. Esto, es logrado determinando la calidad de salida del gas del contactor Vs la calidad de entrada del gas.

Calidad de salida del gas

Las condiciones del gas a nivel composicional, fueron presentadas en la tabla (), donde el porcentaje molar de H_2S es 1,72% y el de CO_2 es 4,13%, lo que representa gas fuera de especificaciones. Por tanto, el objetivo principal de la planta es llevar el gas a la calidad requerida; H_2S 4 ppm y el de CO_2 2%.

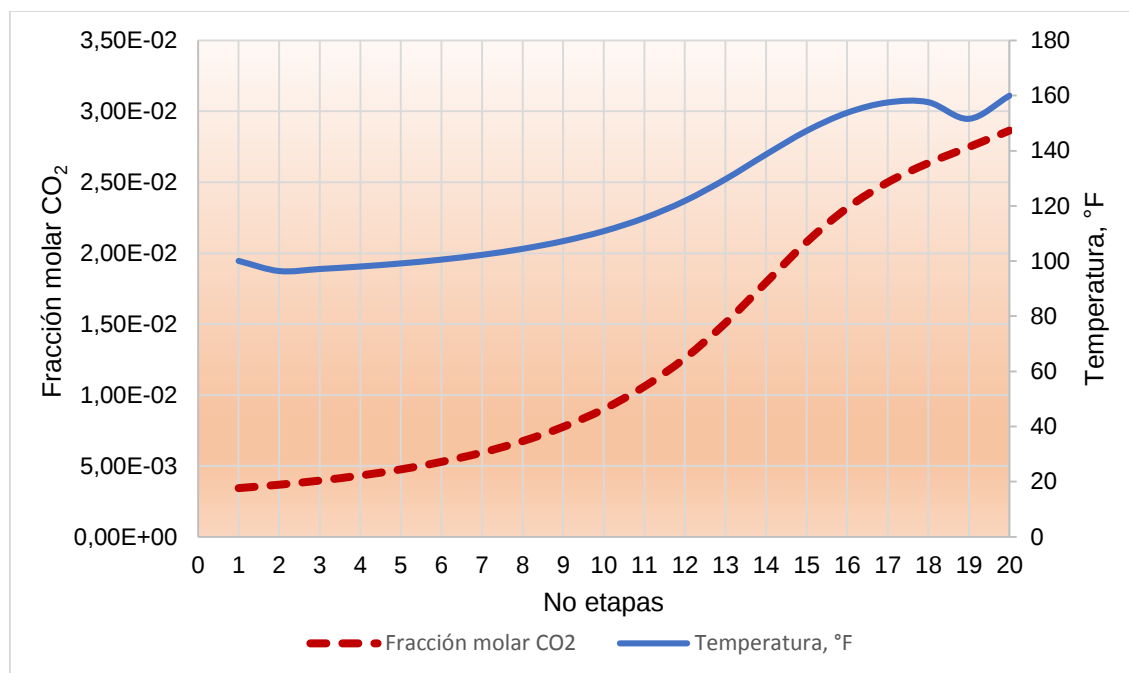
Es importante resaltar, que muchos factores en la planta están vinculados en el cumplimiento de especificaciones del gas, sin embargo, nos centraremos solo en el proceso que realiza la torre absorbedora.

Esquema 23. Composición del gas de salida

Componentes	Fracción molar
N ₂	0,0017
H ₂ S	0
CO ₂	0,0011
C ₁	0,9328
C ₂	0,0422
C ₃	0,0100
i-C ₄	0,0028
n-C ₄	0,0031
i-C ₅	0,0015
n-C ₅	0,0013
C ₆	0,0019
H ₂ O	0,0017

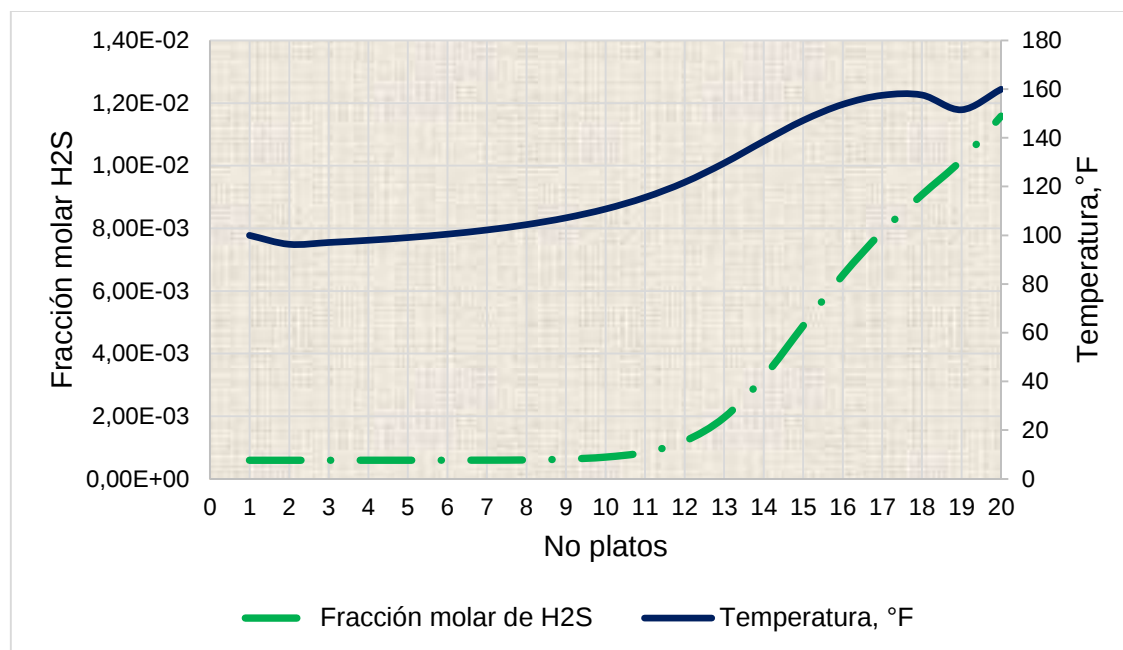
En la tabla anterior, se puede observar la composición del gas de salida, con un aumento de calidad en composición de metano y una disminución significativa de los contenidos ácidos dentro del gas; 0% H₂S y 0.1% CO₂. Claramente se puede observar el perfil de concentración de CO₂ y temperatura en la torre absorbedora.

Esquema 24. Perfil de concentración de CO₂ en el contactor



En la gráfica anterior se muestran el perfil de concentración de CO₂ en el contactor y la temperatura del contactor en función del número de platos. Se puede observar que la remoción de CO₂ de la corriente de gas es incremental hasta eliminar la mayor parte de CO₂ del gas. Por otra parte, se puede visualizar el perfil de temperatura a lo largo de la torre, en la parte inferior el valor de temperatura muestra un aumento importante respecto a las otras zonas de la torre, este comportamiento se debe a que en esta zona se extrae la mayor cantidad de CO₂, y dado que las reacciones son exotérmicas, la temperatura aumenta significativamente.

Esquema 25. Perfil de concentración de H₂S en el contactor



En este caso, al igual que la gráfica anterior se representa la eficiencia de remoción de H₂S hasta llegar al nivel mínimo de contenido de este componente.

Es posible concluir que, el diseño operativo de la torre permite disminuir notablemente la cantidad de composición ácida en el gas de salida de la torre, llevando este a especificaciones aún más bajas que las requeridas, notablemente la amina hace el proceso principal de absorción y por tanto su aporte será explicado más adelante.

Como se ha mencionado, el solvente utilizado para el proceso de endulzamiento es Dietanolamina, la composición en masa de este solvente al entrar al contactor es más del 70% agua, por tanto, aguas debajo de este tipo de plantas es necesario diseñar una planta de deshidratación del gas. Esto se puede observar en los resultados posteriores.

Tabla 33. Cálculos de contenido de agua

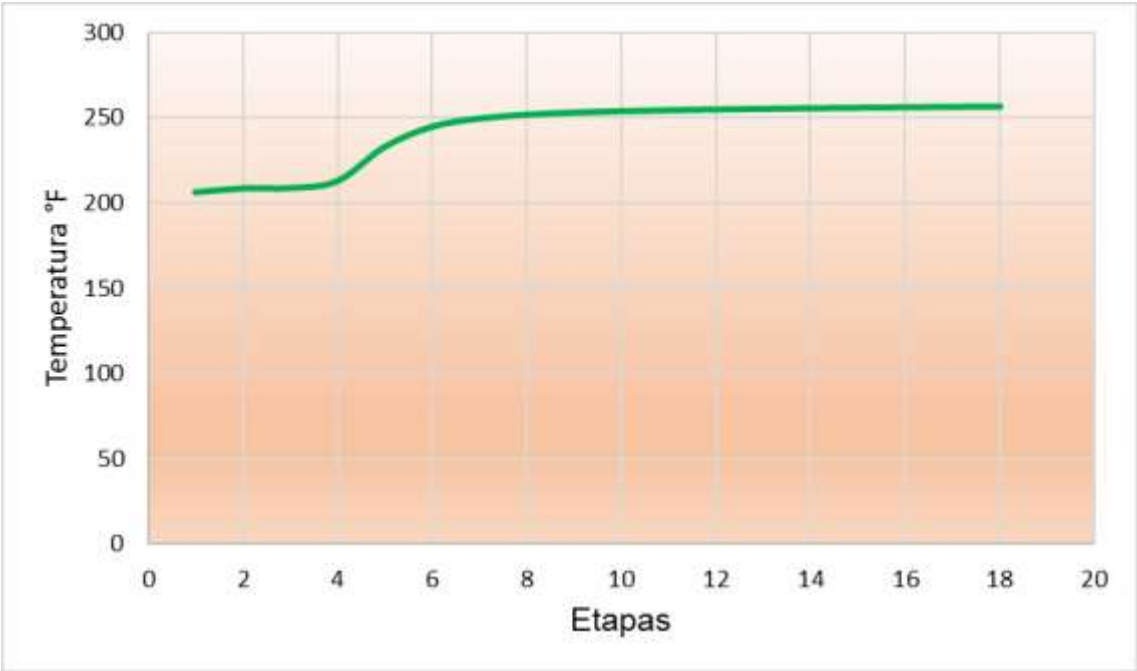
Water content		
Inlet gas	49.20 lb/MMSCF	
Density gas	350.0	
Flow rate	25.00 MMSCFD	
Inlet gas	0.1025	USGPM
Outlet gas	79.86 lb/MMSCF	
	0.1664	USGPM

➤ Rehervidor

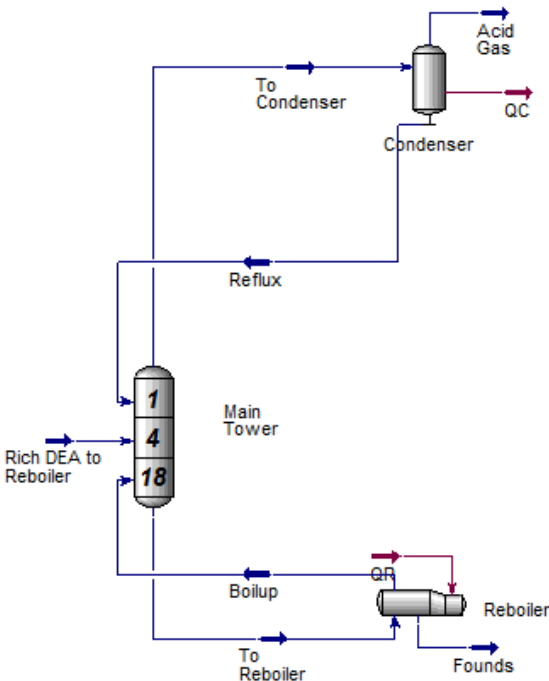
Al igual que el contactor, este equipo cumple una función crucial para el funcionamiento adecuado de la planta de endulzamiento, es aquí donde la amina es regenerada con la finalidad de retirar todos los componentes ácidos e hidrocarburos que puedan ser acarreados con el solvente. En este caso, el rehervidor se diseñó con 18 platos (Diseño utilizado en la mayoría de procesos de endulzamiento). Normalmente la torre de despojo parte fundamental del rehervidor trabaja con presiones entre 10- 15 psig, en este caso se está trabajando con una presión de 12,8 psig. De igual forma la amina rica normalmente entra en el tercer o cuarto plato, en este caso la amina entrara en el cuarto plato de la torre.

Es posible realizar un análisis paramétrico del funcionamiento al rehervidor en función de sus parámetros operacionales.

Esquema 26. Parámetros de diseño del rehervidor



Esquema 27. Perfil de concentración de CO₂ en la solución de amina en la torre regeneradora



Tray/Packed Section	Main Tower
Uniform Section	☒
Internal Type	Valve
Diameter [ft]	4,921
Tray/Packed Space [ft]	2,000
Tray/Packed Volume [ft3]	34,32
Disable Heat Loss Calcs	☐
Heat Model	None
Rating Calculations	☐
Hold Up [ft3]	3,120
Weeping Factor	1,000
Tray Sizing Analysis for Costing	<empty>

Esquema 28. Perfil de temperatura del rehervidor



En el perfil de temperatura del rehervidor se puede observar que a partir del plato 4, plato donde ingresa la amina la temperatura empieza a aumentar hasta finalmente llegar a la temperatura máxima o temperatura en la que se encuentra el rehervidor plato No 18.

En el esquema 29 se representa el perfil de concentración de CO_2 , se observa el aumento brusco de la concentración en el plato 4 ya que es este el plato donde se alimenta la corriente de amina a regenerar.

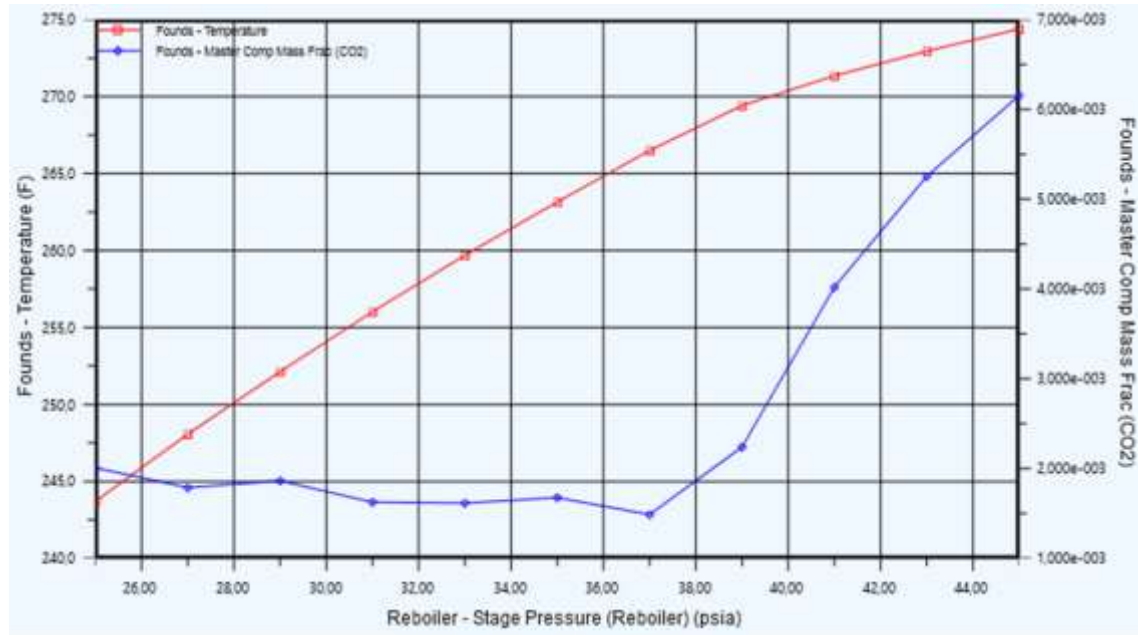
Tabla 34. Tabla regeneración de DEA

CORRIENTE	% CO_2 en peso
Alimentación al regenerador	4.02
DEA regenerada	0.33

En la tabla 34 se muestran los valores de dióxido de carbono en la amina a la entrada y a la salida del rehervidor. En este caso, es notable observar que la

eficiencia de remoción de CO₂ es del 92,41% este porcentaje es respecto al total de dióxido de carbono removido por la DEA en la contactora.

Esquema 29. Análisis de variables operativas



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

El rehervidor es responsable de la compensación energética en el sistema, ya que este equipo produce el calor necesario para vaporizar la solución de amina rica y eliminar así los compuestos ácidos, con el fin de entregar una solución regenerada. Por tanto, en este caso, se realizó una variación de presión del rehervidor desde (26-44 psia), estudiando así el comportamiento de dos variables importantes del proceso

- ✚ Temperatura de la corriente de amina
- ✚ Concentración de CO₂ en la amina regenerada.

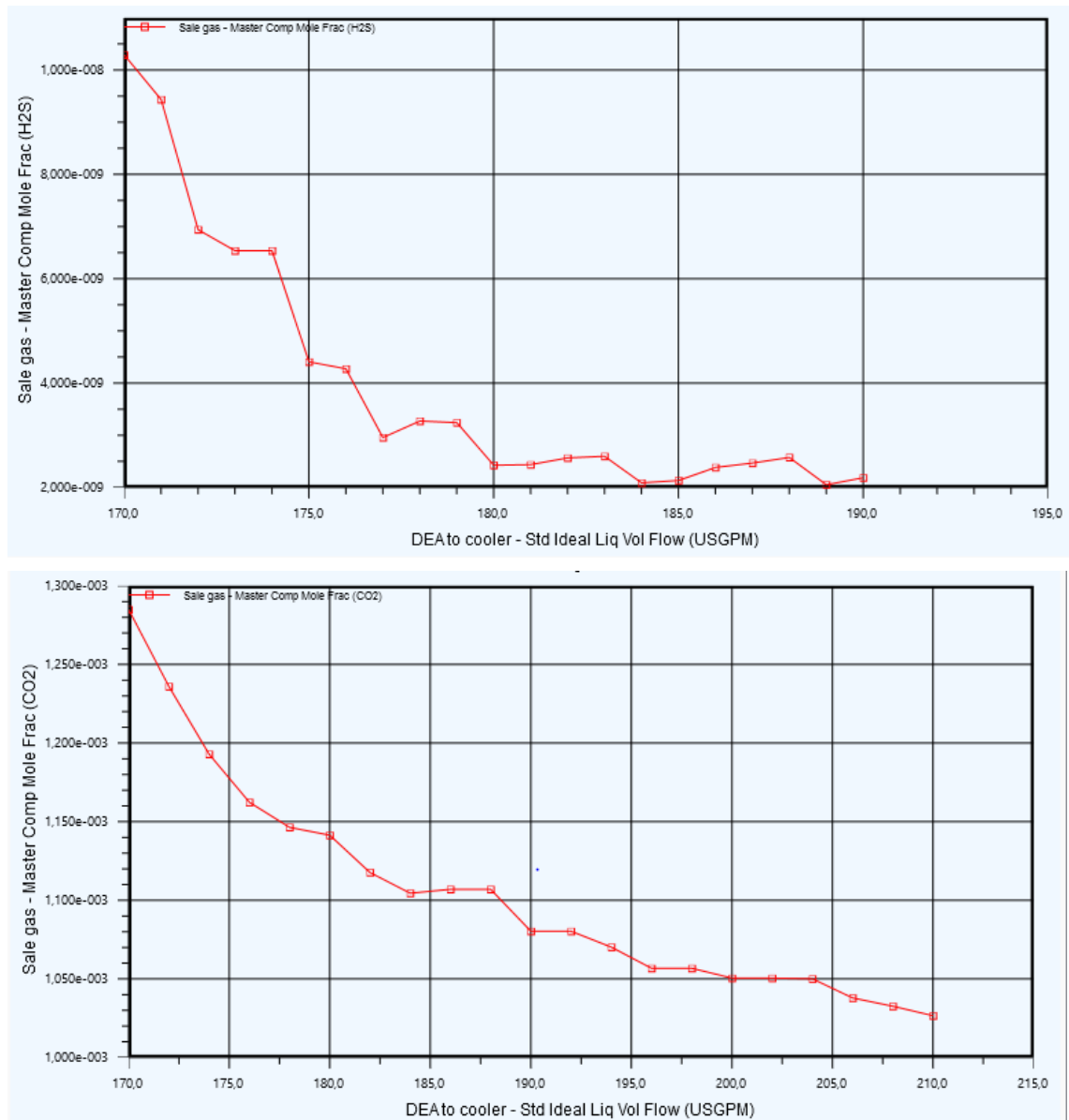
Las regeneraciones más estables y eficientes del proceso se obtienen a altas presiones en el rehervidor ya que permiten alcanzar mayores temperaturas que favorecen el debilitamiento general de la amina. Sin embargo, el incremento de la

temperatura provoca exceso de corrosión y degradación de la amina, esto fue citado por Madox (1982).

Por tanto, con la finalidad de evitar algunos problemas operacionales y ahorrar energía, algunas veces es considerado disminuir la temperatura del rehervidor, sin embargo, la eficiencia de remoción disminuye y se puede presentar problemas de corrosión en el equipo (Martinez,2000). En este caso la temperatura utilizada para el rehervidor es 260°F, siendo esta una temperatura que no supera el rango de trabajo común en estos equipos.

En la gráfica () se representa como afectaba el caudal de DEA a la remoción de componentes ácidos en el sistema, variando la tasa de caudal de amina y manteniendo el flujo de gas en 25 MMSCFD.

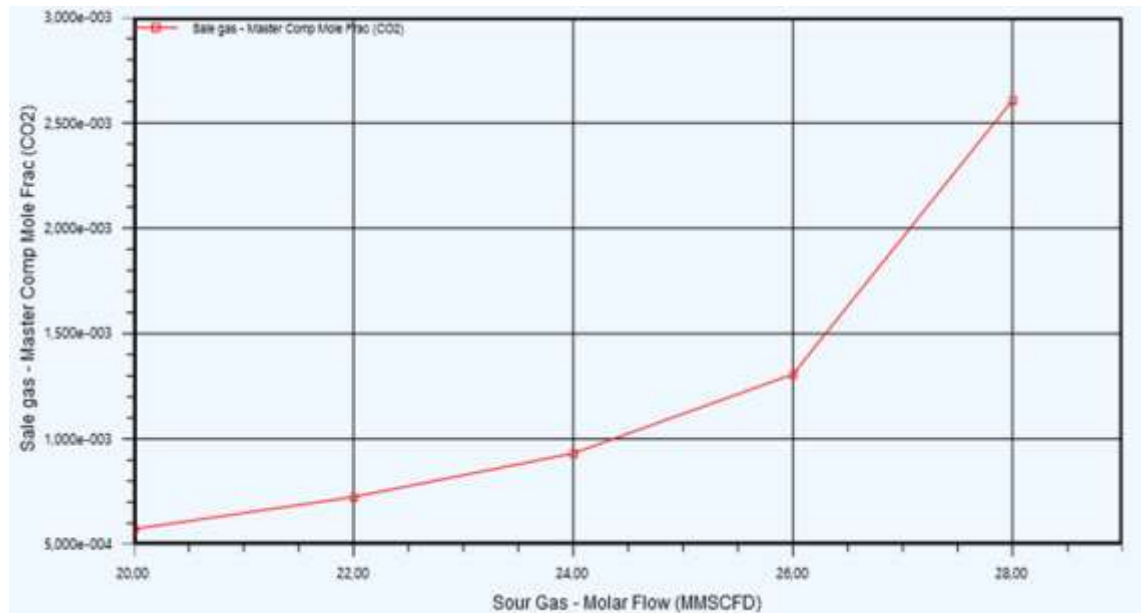
Esquema 30. Tasa de circulación de DEA Vs composición ácida en el gas natural



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Se puede observar que, aunque la curva presenta fluctuaciones la tendencia representativa es la disminución de H2S o CO2 a medida que aumenta la tasa de flujo del solvente DEA. Sin embargo, es importante determinar en qué punto aumentar la tasa de DEA es económicamente inviable, en este caso, desde 180 USGPM no sería rentable, ya que la curva no representa una variación significativa.

Esquema 31. Tasa de flujo de gas de entrada Vs composición ácida del gas de salida



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Finalmente, el caso de estudio representado en el esquema 32 se llevó a cabo en el contactor, donde se realizó variación de caudal de gas a endulzar. El objetivo es determinar el rango de operación para el flujo de gas entrante en el equipo a un caudal de DEA fijo 190 USGPM, de tal forma que el gas endulzado cumpla con los requerimientos de calidad (CO_2 2%, H_2S 4ppm).

Para las condiciones de operación establecidas, el flujo de gas es posible aumentarlo hasta 30% más y obtener valores de CO_2 en el gas dulce bajo especificaciones de transporte.

4.4 CONTENIDO DE AGUA E INHIBICIÓN DE HIDRATOS

Una tubería submarina (TIEBACK) horizontal de 40 km y 12" Schedule 80 conecta un pozo de gas con un Manifold submarino. Las condiciones operativas en cabeza

de pozo son de 130 °F y 1000 psig y la temperatura del gas en el Manifold es de 60,32°F.

La corriente de gas es de 50 MMSCFD y debido a las bajas temperaturas del lecho oceánico se espera la formación de condensados (agua líquida y aceite) en la tubería, el contenido de agua en el gas según simulaciones a arrojado aproximadamente 134 Lbagua /MMscf, debido a esto es necesario, calcular la tasa de inyección de inhibidor termodinámico requerida para prevenir la formación de hidratos teniendo en cuenta la composición de fluido en la corriente de entrada, en este caso dos alternativas de productos químicos se encuentran disponibles para su utilización, tales como, MeOH (metanol) y MEG (mono-etilenglicol), usted como ingeniero debe realizar la simulación y el análisis con el fin de seleccionar la alternativa más viable.

Las condiciones operativas son extremas, la temperatura del lecho marino es de 40°F, la tubería se encuentra sin aislante y enterrada en el suelo húmedo. El análisis termodinámico de los fluidos ha arrojado que la ecuación de estado Peng Robinson es la más favorable para simular el proceso y que las correlaciones de Beggs and Brill (1979) son las apropiadas para el modelamiento del fluido multifásico en la tubería horizontal.

4.4.1 Parámetros operacionales

➤ Composición del gas

Tabla 35. composición del gas húmedo

<i>Componentes</i>	<i>Fracción Molar</i>
N2	0.0152
CO2	0.0255
H2S	0.0076
C1	0.8293

Componentes	Fracción Molar
C2	0.0635
C3	0.0225
i-C4	0.0155
n-C4	0.0075
i-C5	0.0045
n-C5	0.0025
n-C6	0.0019
C7+	0.0045
Total	1

Tabla 36. Propiedades del C7+

<i>Propiedades del C7+</i>	
<i>Peso molecular</i>	135 lbm/Lbmol
<i>Gravedad API</i>	45
<i>Gravedad específica</i>	0.8

En primera instancia, no es un secreto a nivel ingenieril que los lugares potenciales de formación de hidratos son en el pozo, intercambiadores de calor, dispositivos de expansión como válvulas, equipos de separación y gasoductos. En este caso, el estudio se centrará directamente en la tubería horizontal.

Diferentes criterios deben ser tomados en cuenta:

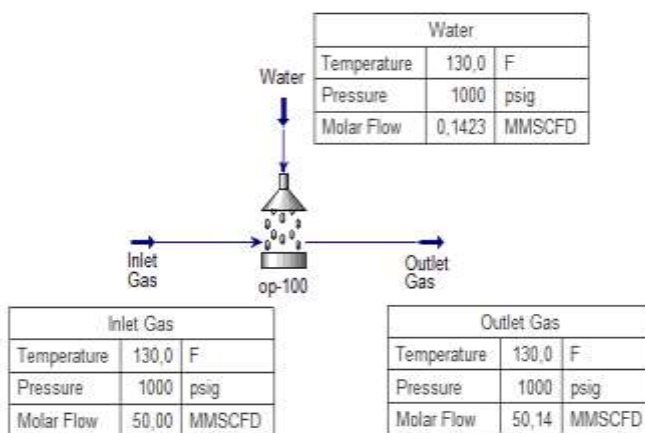
- ✚ Contenido de agua en el gas de entrada
- ✚ Temperatura de formación de hidratos en la corriente de gas
- ✚ Temperatura a la cual estará sometido el proceso
- ✚ Tasa de inhibidor

Estos cuatro criterios, fácilmente pueden ser visualizados realizando el proceso dinámico en la herramienta de simulación HYSYS.

➤ **Contenido de agua en el gas de entrada**

Con la finalidad de determinar el contenido de agua exacto en el gas de entrada, se simuló y se obtuvo el contenido de agua exacto desde el simulador Aspen HYSYS V8.8 fue de 134.5 lb/MMSCF o 0,56 USGPM.

Esquema 32. Características de la corriente de entrada



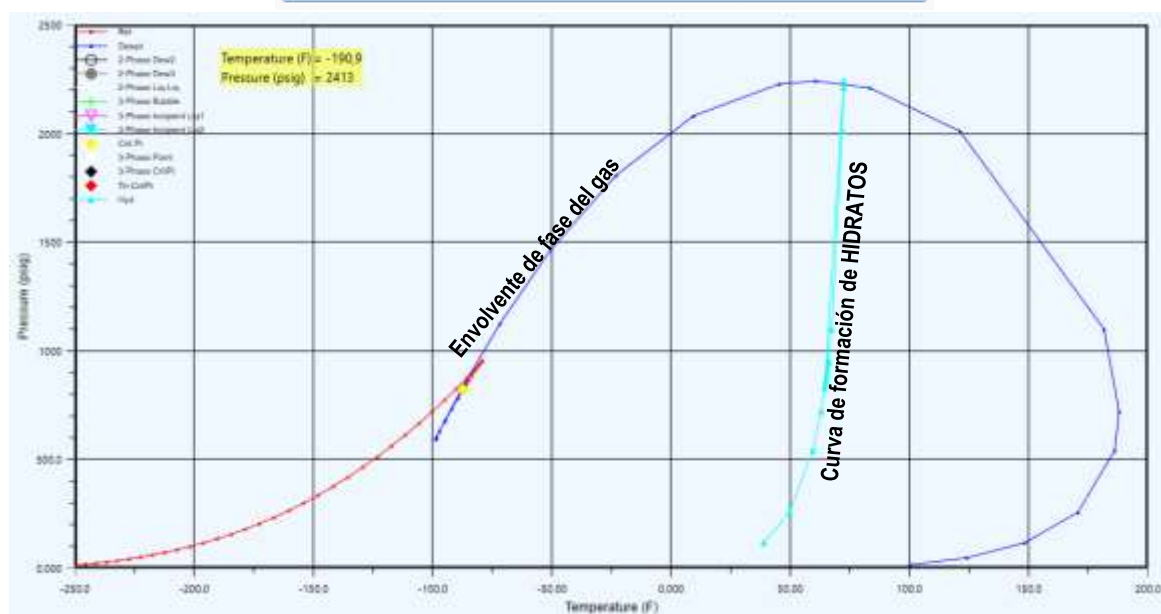
Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

➤ **Temperatura de formación de hidratos**

Tabla 37. Temperatura de formación de hidratos

Formation Temperature at Stream Pressure	
Formation Temperature [F]	65,0874
Hydrate Type Formed	Type II
Calculation Mode	Use 3-Phase Model
Equilibrium Phases	V - Aq - L - H
Inhibitor Calculation	Not Included

Formation Pressure at Stream Temperature	
Formation Pressure [psig]	578,4786
Hydrate Type Formed	Type II
Calculation Mode	Use 3-Phase Model
Equilibrium Phases	V - Aq - L - H
Inhibitor Calculation	Not Included



Maxima	
Cricondentherm	187,9 F
Cricondenbar	2242 psig

Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modeling)

Los resultados obtenidos, son fácilmente visibles, la temperatura de formación de hidratos es 65,0874 °F, por lo tanto, cualquier temperatura operativa por debajo de esta temperatura se encontrará bajo la curva de formación de hidratos, es decir se formarán hidratos dentro del sistema.

De igual forma, como ya se había mencionado en el segundo objetivo del presente libro, a nivel estructural tres tipos principales de hidratos pueden ser formados, en este caso el hidrato tipo II es el predominante.

✚ Análisis de temperaturas del proceso.

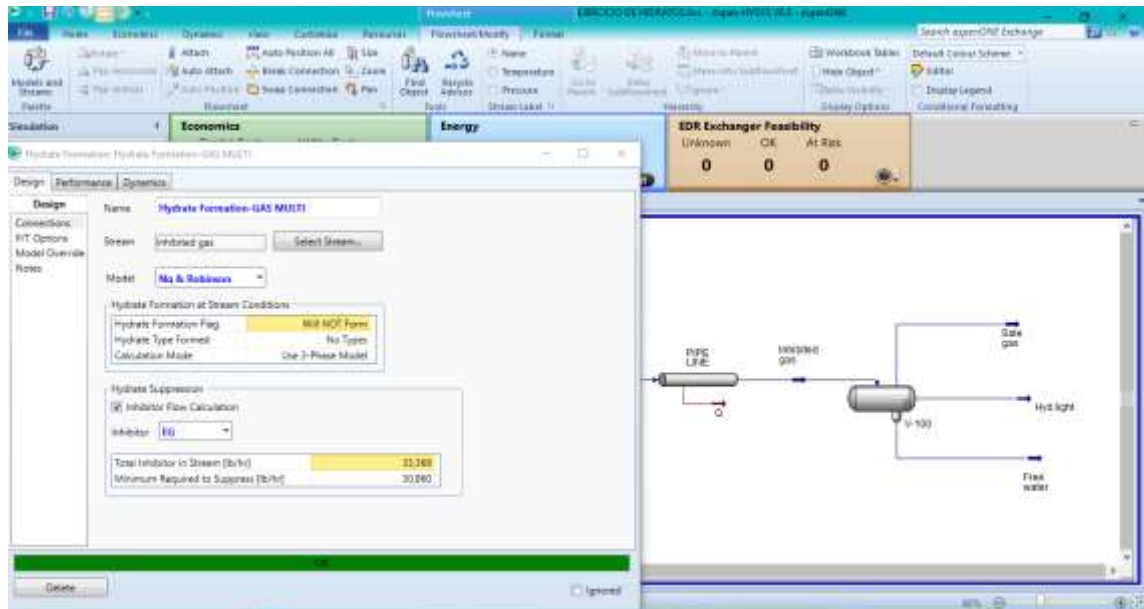
En primera instancia el gas de entrada se encuentra a una temperatura de 130°F, posteriormente, al llegar al Manifold de producción el gas estará sometido a una temperatura de 60,35°F, temperatura que se encuentra por debajo de la temperatura de formación de hidratos, sin embargo, durante todo el proceso la temperatura del lecho marino es de 40°F, siendo esta la más baja durante el proceso.

4.4.2 Planta de inhibición de hidratos con etilenglicol (MEG)

En los siguientes esquemas, se realizó la simulación del proceso de inhibición utilizando el etilenglicol como solvente inhibidor, además de esto se representan dos simulaciones con diferente proceso o herramienta para aplicar el inhibidor, dependerá de la opción que se utilice, ambos procesos cumplen el objetivo de inhibición y, por tanto, eliminan la formación de hidratos en el proceso.

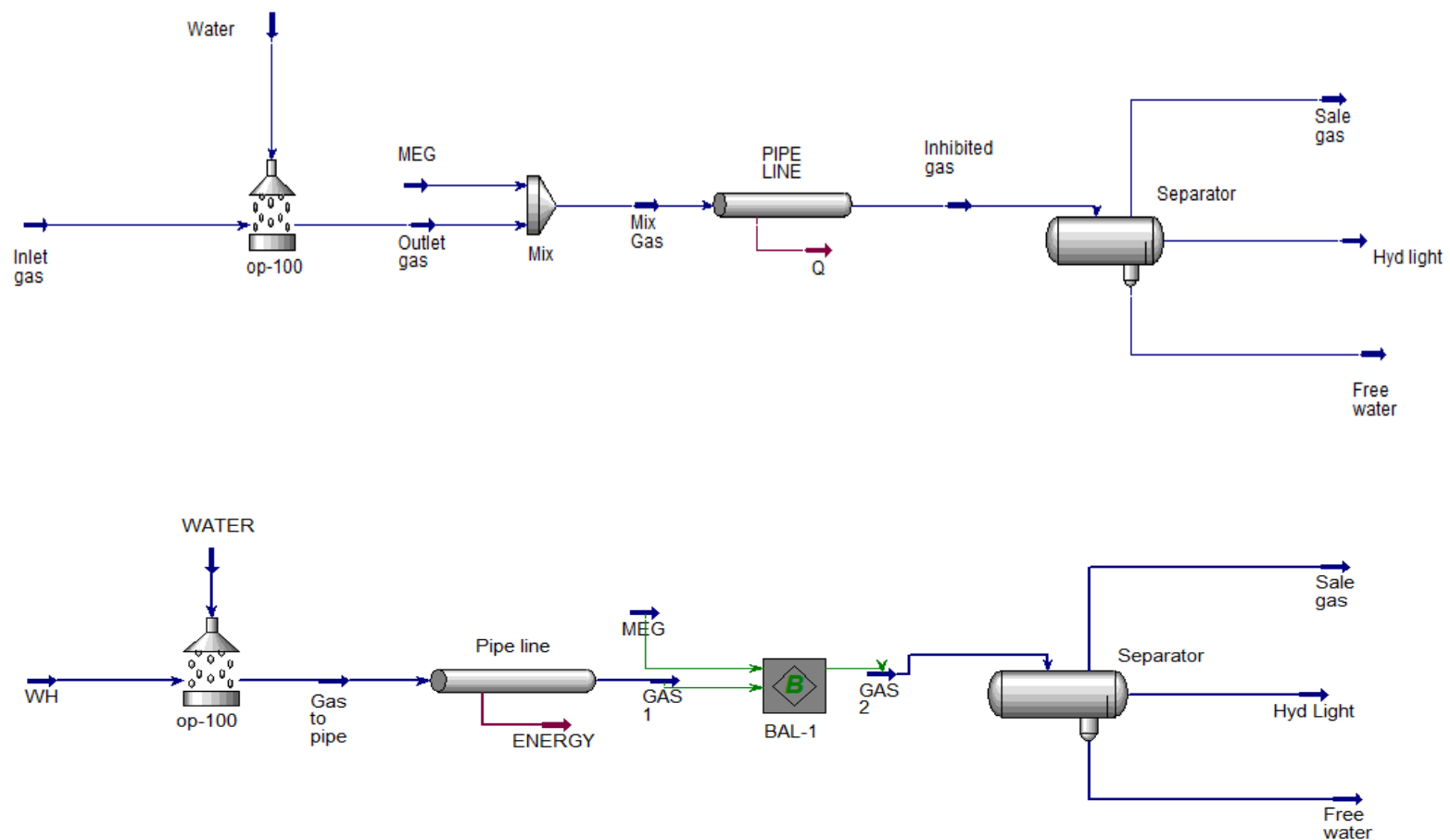
✚ Tasa de inhibidor de Etilenglicol

Esquema 33. Tasa de inhibición con Etilenglicol



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Esquema 34. Planta de inhibición de hidratos con Etilenglicol (MEG)



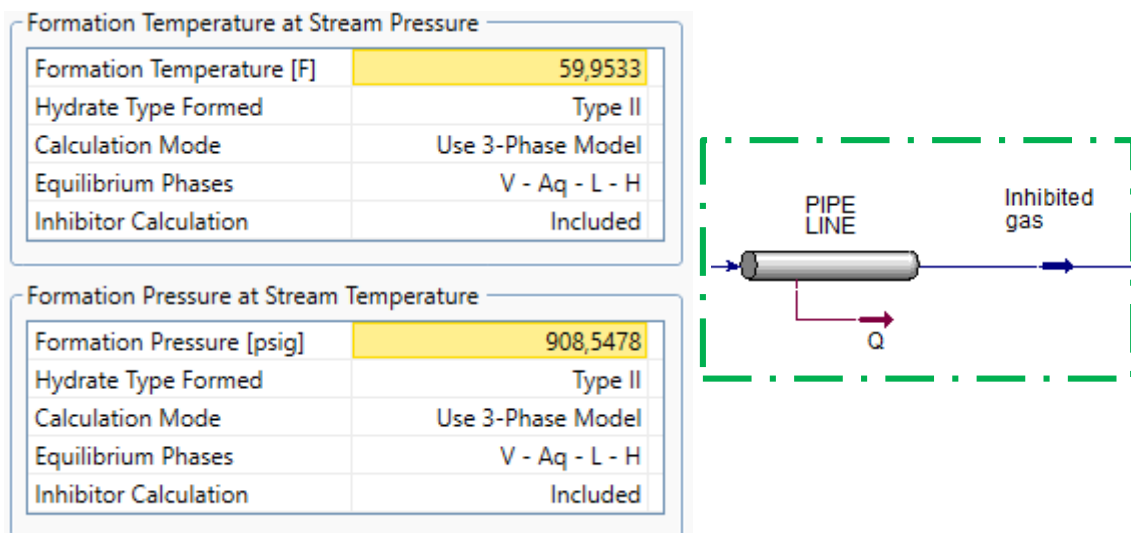
Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

En este caso, es necesario realizar iteraciones con la finalidad de hallar en flujo másico requerido para que el inhibidor disminuya la temperatura de formación de hidratos durante el proceso, con la finalidad de que la curva de formación de hidratos se desplace hacia la derecha, cerrando así la brecha de formación.

Flujo másico total de MET = 33,369 lb/hr

Comportamiento de la temperatura de formación de hidratos con inhibidor inyectado, operando a 60,32 °F. como se puede observar en la tabla inferior la temperatura de formación de hidratos fue de 59,9533°F

Esquema 35. Temperatura de formación de hidratos con Etilenglicol



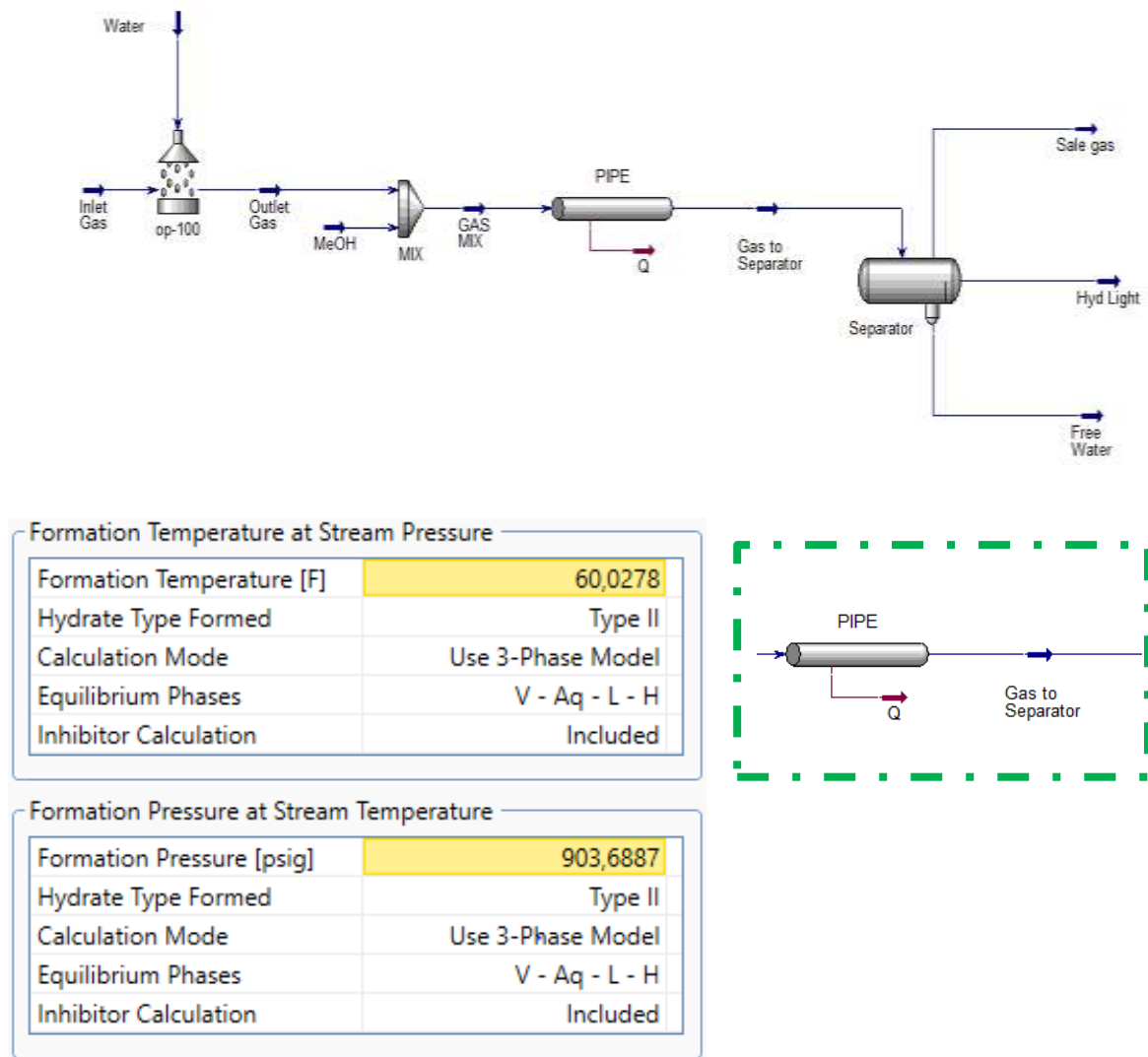
Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

Comportamiento de la temperatura de formación de hidratos sin inhibidor inyectado, operando a 60,32 °F. Como se puede observar en la tabla 37 la temperatura de formación de hidratos fue de 65,0874 °F, por tanto, a la temperatura de operación se presentarían severos problemas de hidratos en el sistema. Es posible inyectar más inhibidor en el sistema, sin embargo, la tasa seleccionada fue la tasa mínima requerida para que no se presenten hidratos, por tanto, esta tasa de inhibidor dependerá de las condiciones operacionales.

✚ Tasa de inhibidor de Metanol

En este caso, se realizó la simulación con el inhibidor Metanol. A partir de la tasa mínima que arroja la simulación se empezó a iterar para determinar la tasa de inhibidor óptima, sin embargo, esto será visualizado posteriormente, ya que el en este caso, el principal objetivo era determinar para estas condiciones que inhibidor era el más óptimo, por tanto, se realizó la simulación con la misma tasa másica hallada para el inhibidor Etilenglicol. Obteniendo lo siguiente,

Esquema 36. Temperatura de formación de hidratos con Metanol



Fuente: Tomado de Aspen HYSYS V8.8 (Basic process modelling)

En el esquema 37, se representa la nueva temperatura de formación de hidratos por presencia del metanol inyectado (60,0278°F), por tanto, al comparar la eficiencia de inhibición bajo estas condiciones operacionales, el etilenglicol es el solvente químico más eficiente para el proceso de inhibición ya que a la misma tasa másica la nueva temperatura de formación de hidratos es 59,9533°F. Se debe tener en

cuenta, que para ambos casos la temperatura de formación de hidratos inicial fue 65,0874°F, como se observó en los parámetros operativos inicialmente.

Esquema 37. Comparación entre Metanol y Etilenglicol

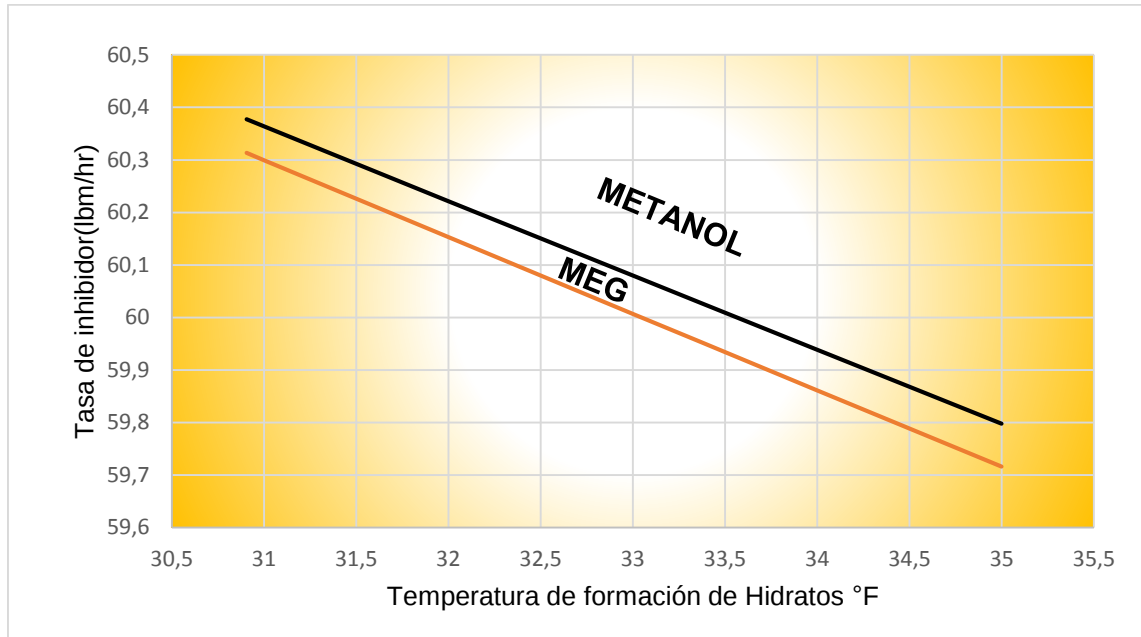


Tabla 38. Comparación entre Metanol y Etilenglicol

Tasa de inhibidor(lbm/hr)	T (°F) Formación Hidratos	
	Metanol	Etilenglicol
30,906	60,3772	60,3135
31	60,3638	60,2997
32	60,2216	60,1532
33	60,0799	60,0071
33,369	60,0278	59,9533
34	59,9387	59,8614
35	59,798	59,7162

5. CONCLUSIONES

A partir de la revisión bibliográfica realizada en los temas de tratamiento de gas natural, se logró obtener una recopilación de información adecuada y concreta para desarrollar una herramienta educativa en forma de libro digital, enfocada en la enseñanza didáctica de los procesos requeridos para el tratamiento eficiente del gas natural.

Al realizar una comparación entre la bibliografía disponible actualmente basada en un método de aprendizaje convencional y la recopilada en los libros digitales desarrollados en este proyecto, se determinó que estos últimos mejoran la curva de aprendizaje al ser más accesibles y didácticos.

Con el fin de demostrar la aplicabilidad del diseño estructural de los libros digitales, se plantearon y desarrollaron una serie de casos de estudio enfocados en los procesos de tratamiento de gas con problemáticas reales a nivel industrial, en donde se logró optimizar parámetros operaciones relevantes para obtener resultados más eficientes durante el proceso.

6. RECOMENDACIONES

Implementar modelamiento 3D en los esquemas de los procesos presentados con el fin de mejorar la visualización por parte de los aprendices.

Incluir herramientas multimedia para mejorar la forma de entendimiento del proceso general de una planta de deshidratación o endulzamiento de gas natural.

Expandir el desarrollo de libros digitales, en todos los ámbitos de aprendizaje con el fin mejorar la distribución del conocimiento en temas específicos de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

ADELL, J.. Conference. Implicacións do dixital no deseño e uso de libros de texto e materiais didácticos. III Seminario sobre avaliación de Materiais Didácticos. O libro de texto dixital: ¿Que hai de novo? 24-25 febreiro 2012.

ADELL, J. AND BERNABÉ, I. Los libros de texto de la escuela en red. Perspectiva CEP, 2006, 11, 21-33.

AOYAGI, ET.AL; RR-45, "I. The water Content and correlation of the water Content of Methane in Equilibrium with Hydrate, II. The Water Content of a High Carbon Dioxide Simulated Prudhoe Bay Gas in Equilibrium with Hydrates", Gas Processors Association (Dec. 1980).

BLANC, C. AND J. TOURNIER- LASSERVE, "Controlling Hydrates in High Pressure Flowline," World Oil, Vol, 211, No 5 (1990), 63.

BYUN, H. S., CHOI, J. I. AND SONG, J. S. The research on the prototype development of digital textbook (Research Report CR 2005-22). Seoul, South Korea: South Korea Education Research Information Service, (2006).

CAMPBELL, J. M, Gas Conditioning and Processing 1984- Vol 2.

GREAVES GROUP. America's digital schools 2006: A five year forecast: Mobilizing the curriculum. Shelton, CT: Market Data Research. [MDR], (2006).

KEN ARNOLD & MAURICE Stewart, Surface production operation, Vol 1, 3ra Edition, 204,207,209.

MADDOX, R. N, AND J.D. ERBAR. Gas Conditioning and Processing, John M. Campbell and company, Norman, Oklahoma (1982), Vol 3.

MARQUÉS, P. Investigación: Uso didáctico de los contenidos digitales EDUCALINE (Memoria junio 2012). Investigación “Didáctica y Multimedia” de la Universidad Autónoma de Barcelona retrieved from (<http://peremarques.net/educaline/>), (2012)

MARTÍNEZ BONAFÉ, J. AND RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, J. El currículum y el libro de texto. Una dialéctica siempre abierta. En Gimeno Sacristán, J. Saberes e incertidumbres sobre el currículum. Madrid: Morata, (2010), 246-268.

MAYTATH, M. NIHALANI, P. AND PERKINS, S. Los textos digitales y el futuro de la educación: porque los libros. EDUCAUSE, (2011), 34 (1)

MINISTERIO DE EDUCACIÓN. Seminario Internacional de Textos Escolares Ministerio de Educación: Santiago de Chile, (2006).

PARRISH, W.B., et al., Proceedings GPA 65th Annual Meeting, San Antonio, Texas (1986).

REYNOLDS, R. Opportunities and Challenges in the E-textbook industry from ([http://blog.xplana.com/2011/08/opportunities-and-challenges-in-the-e-textbook industry](http://blog.xplana.com/2011/08/opportunities-and-challenges-in-the-e-textbook-industry)), (2011).

RODRÍGUEZ RODRÍGUEZ, J. and MONTERO MESA, M^a L. Indefinición terminológica y tecnología educativa. Pixel Bit. Revista de Medios y Educación, 2012, 22, 51-65.

STEWART, M., & ARNOLD, K. Gas Sweetening, In Gas Sweetening and Processing Field Manual (<https://doi.org/10.1016/b978-1-85617-982-9.00002-8>), 2011.

SEED, J. Is Smart history the Art History Textbook of the Future? retrieved from http://www.huffingtonpost.com/john-seed/smart-history_b_1847324.html, (2012).

TOWNSEND, F, M., Ph.D. Thesis, Univ. of Oklahoma, Norman, Oklahoma (1955).

WARLICK, D. Textbooks of the Future: It's Time the Textbook Industry Redefined what they do and how they do it. *Technology & Learning*, 24, 10, 28-29, (2004).

WARREN, J. W. Innovation and Future of e-Books. *The International Journal of the Book*, 6,1, (2009).