

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
ÁREAS ESPECIALES DE GRADO



“DISEÑO DE UNA PLANTA DE CONTROL DE PUNTO DE ROCÍO UBICADA
EN PIRITAL EN EL NORTE DEL ESTADO MONAGAS”

PRESENTADO POR:

GARCÍA RIVERO, JEIXY DEL CARMEN
TINEO GUARACHE, JOARQUIS DEL VALLE

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA UNIVERSIDAD
DE ORIENTE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

BARCELONA, ABRIL DE 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
ÁREAS ESPECIALES DE GRADO



“DISEÑO DE UNA PLANTA DE CONTROL DE PUNTO DE ROCÍO UBICADA
EN PIRITAL EN EL NORTE DEL ESTADO MONAGAS”

ASESOR:

ING. NELSON FERREIRA
ASESOR ACADÉMICO

BARCELONA, ABRIL DE 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
ÁREAS ESPECIALES DE GRADO



“DISEÑO DE UNA PLANTA DE CONTROL DE PUNTO DE ROCÍO UBICADA
EN PIRITAL EN EL NORTE DEL ESTADO MONAGAS”

JURADO:

ING. RAFAEL BARRUETA
JURADO PRINCIPAL

ING. LUIS MORENO
JURADO

ING. NELSON FERREIRA
ASESOR ACADÉMICO

BARCELONA, ABRIL DE 2010

RESOLUCIÓN

De acuerdo al artículo 44 del reglamento de trabajos de grado: " los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la universidad de oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien lo participará al consejo universitario"

DEDICATORIA

A mis padres **Arquímedes Tineo** y **Josefa de Tineo** quienes son el centro de inspiración para mi formación como INGENIERO y que siempre confiaron en mí, los amo y este triunfo en mi vida es un triunfo para ustedes también.

A mis hermanos; **Carbel Tineo** que siguiendo tus pasos, al igual que tu logre tan anhelada meta y **Arquimedes Tineo** que este sueño hecho realidad te sirva de inspiración para que tú también logres alcanzar ser un profesional.

A mis sobrinos **Sebastian Alejandro, Ricardo David, Fabricio Javier** y **Mauricio Manuel**; para que este éxito les sirva como fuente motivadora en un futuro para su formación como profesionales. Se les AMA INMENSAMENTE hijos.

A mis abuelos que yo sé que están conmigo cuidándome en cualquier lugar que me encuentre.

A mis tíos y primos... Una profesional más en la familia!!

A mis padrinos **Persia González, Blas Gómez** y **Miguel Martínez**.

A mis compañeras de carrera **Zora Cermeño, Patricia Guerra, Carolina Hernández** y **Maricellys Rodríguez** por compartir conmigo buenos y malos momentos en la universidad.

A mis amigos de siempre **Norvis Bellorín, Silvana Rondón** y **Gregorio Romero**.

Joarquis Del V Tineo G.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis primeramente a Dios y La virgen por guiarme en todo momento y estar siempre de mi lado.

A mis hijos, **Iraixy de los Ángeles, Víctor Jesus y Viviana Isabel**, por ser mi mas grande inspiración para superarme en esta vida y para estar conmigo siempre juntos. Dios los bendiga mis tesoros este titulo es de ustedes.

A mi Esposo **Yldemar José** que con su constante ayuda me permitieron culminar los estudios gracias a su esfuerzos y dedicación. Tu formaste parte de esto, te lo debo a ti mi vida.

Especialmente a mí ya que a pesar de los momentos tan dificiles que he pasado, no abandoné mi carrera ante tantas adversidades, supere todos los obstáculos y pude demostrarle a mucha gente que no importa el tiempo que se dure estudiando lo importante es lograrlo y yo lo logre gracias a Dios a la Virgen y mi gran voluntad.

Jeixy García

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios y a la virgen por estar conmigo cuidándome e iluminándome hacia el camino del bien.

A la **Universidad De Oriente** por capacitarme para recibir hoy en día el título de Ingeniero Químico.

A mis Padres por su confianza y darme todos los consejos necesarios para lograr esta meta en mi vida.

A mis Hermanos que lucharon siempre al lado mío en las buenas y en las malas.

A mis amigos **Tomás Curupe, Jesús Pinto y Javier Guacuto** porque de alguna manera colaboraron para que cumpliera esta Meta!

A mis compañeros de tesis **Gina, José y Jeixy**... Lo logramos muchachos!!!

Al Ing. **Héctor Rodríguez** por su colaboración en el paso final de este camino.

A los profesores de Áreas de Grado; **Ana Blondell, José Rondón, Isvelia Avendaño** y el asesor académico **Nelson Ferreira**.

A todos los Profesores por enseñarme partes de sus Conocimientos.

Joarquis Del V Tineo G.

AGRADECIMIENTOS

Infinitamente agradecida a **Dios todopoderoso**, a la **Virgen** y mi **divino niño** por este momento tan dichoso y la gloria de alcanzar tan valiosa meta.

Quien siempre me acompañó durante mis estudios, el **Profesor Lino Valles**.

A mis padres por toda la dedicación que le han brindado a mis hijos durante todo este tiempo. Lo importante es que me dieron la vida, educación, profesión y las herramientas necesarias para seguir adelante y defenderme en esta vida.

Un sincero agradecimiento a la **Familia Tineo Gómez** por su gran cariño y por ser tan especiales. Ustedes también fueron parte de este éxito.

A mi **tío Víctor Hernández** por su gran ayuda y colaboración. Mil bendiciones, te quiero.

A mis compañeros de monografía **Joarquis, Gina** y **José** porque juntos vivimos situaciones que a la larga valieron la pena para lograr ser unos amigos e **Ingenieros**.

Al Ingeniero Químico **Héctor Rodríguez** que nos ayudó en todo momento.

A mis profesores por su esmero y empeño al enseñarme parte de sus conocimientos.

A mi gran amigo el **CHINO** porque lo fastidie bastante en la universidad y nunca se quejó.

Y a todos los que creyeron en mi porque también aportaron de una u otra manera su energía positiva para lograr mi triunfo.

Jeixy García

RESUMEN

A fin de reducir la condensación de hidrocarburos y vapores de agua se diseñó una planta de control de punto de rocío, ubicada aguas abajo de la planta PIGAP en la estación de flujo del campo Pirital al norte del estado Monagas. Esta planta tendrá una capacidad de manejar un volumen de Gas de unos 1500 MMPCND, la cual está compuesta por un tren de procesamiento que contiene: un intercambiador de calor Gas/Gas de tubo y coraza, un chiller y un separador de bajas temperaturas (LTS). Esta planta controlará el punto de rocío del Gas Natural enfriando el mismo a temperaturas más bajas que las existentes antes de entrar a los compresores para su respectiva recuperación secundaria. Además, contiene una deetanizadora para recuperar los líquidos del Gas Natural que serán enviados al Complejo de Fraccionamiento Jose para sus diversos usos. En este caso las premisas establecidas para el diseño de control de punto de rocío se ajustaron de manera satisfactoria a la propuesta realizada, disminuyendo el gas tratado a una temperatura de rocío de 50.27 °F a 10.15 °F para el caso base. Las composiciones del Oriente asociado y el Oriente libre no cumplieron con las condiciones de operación planteadas para de control de punto de rocío diseñada. Se utilizó la herramienta Hysys 7.1 para realizar la simulación del proceso.

CONTENIDO

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN.....	x
CONTENIDO	xi
LISTA DE TABLAS	xv
LISTA DE FIGURAS.....	xvi
CAPITULO I.....	17
INTRODUCCIÓN	17
1.1 Introducción	17
1.2 Planteamiento del problema.....	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo general.....	18
1.3.2 Objetivos específicos	19
CAPITULO II	20
MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Antecedentes	20
2.2 El gas natural.....	21
2.2.1. Características del Gas Natural	25
2.2.2. Tipos de Gases	26
2.2.3. Clasificación del Gas Natural de acuerdo a su localización en el subsuelo	27
2.2.4. Purificación de gases.....	28
2.2.4.1. Absorción.....	28
2.2.4.2. Deshidratación del Gas Natural	29
2.3. Variables a estudiar en el proceso de extracción de líquidos del gas natural ..	34

2.3.1 Punto de Rocío.....	34
2.3.1.1. Plantas de control de Punto de Rocío.....	35
2.3.2. Refrigeración.....	37
2.3.2.1. Proceso de refrigeración del Gas Natural.....	39
2.3.2.2. Aplicación de la refrigeración.....	40
2.4 Extracción de líquidos en el procesamiento del gas natural	46
2.4.1. Líquidos del Gas Natural (LGN)	47
2.4.2. Contenido líquido de un Gas (GPM)	47
2.4.3 Recobro	48
2.5. Fraccionamiento.....	49
2.5.1. Tipos de fraccionamiento.....	50
2.5.1.1. Destilación	50
2.5.2. Proceso de fraccionamiento de los líquidos del Gas Natural.....	51
2.6 Compresor.....	52
2.6.1. Tipos de compresores utilizados en la industria	52
2.6.2. Compresores centrífugos.....	53
2.7. Proceso de compresión.....	58
2.7.1. Factores que influyen en el sistema de compresión.....	58
2.7.2. Proceso de compresión del Gas Natural	59
2.7.2.1. Descripción del proceso de compresión del Gas Natural.....	60
CAPÍTULO III.....	62
METODOLOGÍA.....	62
3.1. Recopilación de la información existente para el diseño de una planta de control de punto de rocío.....	62
3.2. Estudio de la composición presente de la corriente del fluido al controlar el punto de rocío.....	63
3.3. Descripción de la variación de los parámetros dentro del sistema de control de punto de rocío	64
3.3.1 Esquema de simulación de la planta de control de Punto de Rocío.....	64

3.4. Simulación de los equipos presentes en la planta de control de punto de rocío.....	66
3.5. Dimensionamiento de los equipos de ajuste de punto de rocío	67
CAPITULO IV.....	68
DESARROLLO DEL PROYECTO	68
4.1. Recopilación de la información existente para el diseño de una planta de control de punto de rocío.....	68
4.2. Análisis de la composición presente en la corriente de flujo al controlar el punto de rocío.....	69
4.2.1. Contenido líquido del Gas (GPM)	69
4.3. Descripción de la variación de los parámetros dentro del sistema de control de punto de rocío	71
4.3.1. Ciclo de refrigeración con propano.....	73
4.3.2. Sistema de recuperación de líquidos condensados	74
4.3.3. Destilación multicomponentes (columna Deetanizadora)	75
4.3.4 Sistema de compresión para inyección de Gas	76
4.4 Bases y premisas generales de la planta propuesta de control de punto de rocío.....	77
4.4.1 Paquete de simulación.....	77
4.4.2 Alimentación a la planta de control de Punto de Rocío.....	77
4.4.3 Principales premisas de Simulación.....	81
4.4.3.1 Sistema de recuperación de líquidos.....	81
4.4.3.2 Sistema de Refrigeración	82
CAPÍTULO V.....	83
DISCUSIÓN DE RESULTADOS	83
5.1. Recopilación de la información existente para el diseño de una planta de control de punto de rocío.....	83
5.2. Estudio de la composición presente de la corriente del fluido al controlar el Punto de Rocío	83

5.3. Descripción de la variación de los parámetros dentro del sistema de control de Punto de Rocío.....	86
5.4. Simulación de los equipos presentes en la planta de control de Punto de Rocío	87
5.5. Dimensionamiento de los equipos de ajuste de Punto de Rocío	88
CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES	90
BIBLIOGRAFÍA	91
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO	93

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 2.1. Clasificación de acuerdo al peso de los componentes del Gas Natural ^[4]	22
Tabla N° 2.2. Composición típica del Gas Natural en diferentes áreas de Venezuela (% Volumen) ^[6]	24
Tabla N° 2.3. Contaminantes del Gas Natural ^[7]	25
Tabla N° 2.4. Aplicabilidad de las tecnologías de Deshidratación ^[4]	32
Tabla N° 4.1. Caracterización del Gas de alimentación, caso base a planta de refrigeración (base seca) (compañía Wilpro Energy Services (Pigap II) Ltd. de fecha 17 de Junio de 2009).....	78
Tabla N° 4.2. Composiciones adicionales de la zona Oriente de Venezuela para la simulación del modelo de planta propuesto (Obtenidas del libro de Marcías Martínez)	79
Tabla N° 4.3. Premisas generales de la simulación, equipos principales de la planta de control de Punto de Rocío (Recuperación de Líquidos).....	80
Tabla N° 4.4. Premisas generales de la simulación, equipos principales de la planta de control de Punto de Rocío (Refrigeración con Propano).....	81
Tabla N° 4.5. Premisas generales de la simulación, equipos principales de la planta de control de Punto de Rocío (Compresión para inyección).....	81
Tabla N° 5.1. Parámetros operacionales de la planta a ser analizados para cada caso de alimentación presentado	84

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1. Diagrama de proceso de deshidratación por absorción con trietilenglicol (TEG) ^[4]	33
Figura N° 2.3. Etapas de un cilindro Compresor Centrífugo ^[10]	55
Figura N° 2.4. Representación gráfica de un Compresor Centrífugo ^[10]	56
Figura N° 2.5. Diagrama simplificado de un Sistema de Compresión ^[10]	60
Fig. N° 4.1. Diagrama del tren de procesamiento de la planta de control de Punto de Rocío.....	72
Figura N° 4.2. Diagrama de flujo de proceso y diagrama p-h para el propano.....	74
Figura N° 5.1. Diagramas de fase presión – temperatura para las corrientes de Gas procesado para los diferentes casos de estudio	86
Figura N° 5.2. Simulación.....	87

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

El gas natural está considerado hoy en día como el combustible con mayor aceptación a nivel mundial, producto del elevado alcance del recurso, buena rentabilidad y daños mínimos en el ambiente por ser el combustible más limpio del yacimiento.

La producción de gas en Venezuela representa un papel muy importante en la matriz energética del país. La zona Oriental posee el mayor porcentaje de reservas probadas de gas natural y un porcentaje menor en las zonas costa afuera, lo que es una cifra considerable que permite inferir el próspero futuro de esta fuente de energía y su actuación en la economía venezolana.

Con el descubrimiento de nuevos yacimientos, Venezuela ha pasado a tener la mayor reserva de gas natural de Sudamérica y la octava del mundo. Pero el país sólo ha percibido recientemente la importancia estratégica de este recurso natural. Según la OPEP, la producción comercial de gas natural de Venezuela asciende a 26.000 millones de metros cúbicos. Según el Ente Nacional de Gas, casi la totalidad de este hidrocarburo se destina al consumo interno.

1.2 Planteamiento del problema

Debido a la declinación de la presión en los yacimientos se hace necesaria la inyección de gas como una de las soluciones para la recuperación de hidrocarburos

existentes en dichos yacimientos. La planta de inyección de gas a alta presión PIGAP II, ubicada en el campo Pirital, municipio Ezequiel Zamora, estado Monagas, operado por PDVSA Distrito Norte; prepara el gas a ser inyectado a alta presión a los pozos cercanos para la obtención de crudo mediante el método de recuperación secundaria. Previo a realizar dicha inyección se propone un diseño de una Planta de Control de Punto de Rocío para recuperar los líquidos del gas natural y a la vez acondicionar el gas para su inyección a pozo. El flujo es previamente deshidratado cuyo proceso se cumple en dos etapas, una primera etapa realizada en la planta PIGAP II la cual se efectúa con trietilenglicol y una segunda deshidratación realizada con tamices moleculares hasta lograr alcanzar un contenido de agua de 5 lbs de agua/PCED, esta corriente es ingresada a un separador Gas/Líquido, donde el gas entra a un intercambiador Gas/Gas en el cual están contenidos líquidos saturados y se requiere controlar el punto de rocío para evitar posibles formación de hidratos; el gas entra a un ciclo de refrigeración mecánica y luego pasa a ser tratado en una deetanizadora, de la cual se obtiene por el tope gas residual que es enviado al separador de entrada para alimentar la corriente del gas que va a ser tratada con el fin de mejorar la calidad del gas a comprimir y obteniéndose por el fondo de la torre los líquidos del gas natural que son enviados a la Planta de Fraccionamiento de Jose.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar una planta de control de punto de rocío ubicada en Pirital en el norte del estado Monagas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Recopilar la información necesaria para el diseño de una planta de control de punto de rocío.
- Estudiar la composición presente de la corriente del fluido al controlar el punto de rocío.
- Describir la variación de los parámetros dentro del sistema de control de punto de rocío.
- Simular los equipos presentes en la planta de control de punto de rocío.
- Realizar el dimensionamiento de los equipos de la planta de ajuste de punto de rocío.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Sánchez C. y Barrios M. (2009), “Evaluaron el punto de rocío y la humedad durante el transporte y almacenamiento del gas natural libre y asociado en Venezuela. Para realizar esta evaluación se utilizó la herramienta HYSYS versión 3.2, para simular tres composiciones típicas correspondientes a un gas seco, gas medianamente rico y gas rico, para así comparar de acuerdo a su composición el recorrido y el acondicionamiento de éstos gases en el negocio del gas natural”.^[1]

Martínez, M (1994), afirma que cuando el hombre de la industria del gas natural conoce el diagrama correspondiente al fluido que maneja, estará en condiciones de predecir el estado de la mezcla en cualquier momento, dependiendo de la presión y temperatura a la que esté trabajando. Eso le permitirá tomar las acciones que correspondan en cada momento. Obviamente la forma del diagrama y el comportamiento de la mezcla estarán en función de la composición del fluido; al cambiar dicha composición también cambiará la forma del diagrama y el comportamiento del fluido remanente.^[2]

GPSA, plantea que cuando el gas se transporta en gasoductos, debe tomarse en cuenta el control de la formación de hidrocarburos líquidos en el sistema de tuberías. La condensación de líquidos es un problema de medición y de caída presión a condiciones de operación. Para prevenir la formación de líquidos en el sistema, es necesario controlar el punto de rocío del hidrocarburo por debajo de las condiciones de funcionamiento del gasoducto.^[3]

2.2 El gas natural

El Gas Natural es una mezcla de varios gases llamados hidrocarburos ya que están formados por átomos de hidrógeno y carbono (C-H), por lo regular están asociados con otras sustancias como el dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y nitrógeno los cuales disminuyen su potencial energético. ^[4]

Los compuestos orgánicos o hidrocarburos forman largas cadenas de combinación por lo general desde C-1 hasta C-60, pero solo los primeros cuatro componentes son gaseosos y son los que componen el Gas Natural.

Estos gases son:

- Metano (CH_4), Etano ($\text{CH}_3\text{-CH}_3$)
- Propano ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_3$)
- Butano ($\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_3$)

Caracterizados por su bajo peso molecular y ser excelentes combustibles.

La composición aproximada en los yacimientos es de 83 a 87% de carbono y de 11 a 15% de hidrógeno y un 5% de otros elementos como el azufre, nitrógeno y oxígeno.

En concentraciones de magnitud decreciente comenzando con el metano, esto constituye el 70-90% en volumen de la mezcla hasta llegar al heptano, aunque raras veces excede el 1% de concentración. ^[4]

Los componentes enumerados anteriormente pueden ser agrupados bajo tres categorías de acuerdo a su grado de volatilidad y peso molecular como sigue:

Tabla N° 2.1. Clasificación de acuerdo al peso de los componentes del Gas Natural ^[4]

<p>. Componentes Livianos</p>	<p>Metano Etano Propano</p>
<p>. Componentes Intermedios</p>	<p>Iso-Butano Normal-Butano Iso-Pentano</p>
<p>. Componentes Pesados</p>	<p>Normal-Pentano Hexano Heptano y más pesados</p>

Para dar ideas de magnitudes diremos que el grupo de los livianos constituyen entre el 80-90% de la mezcla, el segundo grupo de componentes forman del 5-10%, mientras que los componentes pesados pueden oscilar entre menos de 1 % hasta un 5%.

El grupo de componentes livianos una vez licuados y separados selectivamente del resto de la mezcla constituyen el Gas Natural Licuado (GNL) mejor conocido por sus iniciales Inglesas LNG (Liquid Natural Gas), producto éste empleado fundamentalmente como elemento combustible.

Los componentes intermedios en forma de líquido y separado selectivamente de los restantes grupos, forman el Gas Licuado de Petróleo GLP, el cual se identifica comúnmente por sus iniciales en inglés como LPG (Liquid Petroleum Gas), el cual además de ser un excelente combustible es también utilizado en la industria petroquímica como fuente de materia prima en la elaboración de numerosos productos petroquímicos finales e intermedios en el campo de los plásticos, resinas y demás productos sintéticos.

Finalmente el grupo de los componentes pesados forman la gasolina natural, el cual es un líquido a temperatura ambiente con fuerte tendencia a evaporarse a dichas condiciones. La gasolina natural es también un producto combustible es cual es utilizado con preferencia en motores de dos tiempos, es también fuente de materia prima en la industria petroquímica aunque en nuestro medio es utilizada con frecuencia como medio solvente y como tal resulta el elemento de mezcla ideal para incrementar la gravedad API de crudos medianos y pesados. En la descripción de los tres productos mencionados: GNL, GLP y Gasolina Natural, haciendo hincapié que la obtención de cualquiera de ellos involucra la realización de dos operaciones: licuefacción y separación selectiva. Estas dos operaciones constituyen el problema de los distintos métodos que en grado mayor o menor de sofisticación emplea la industria en el procesamiento del gas natural para la obtención de los tres productos básicos ya mencionados. La razón por la cual se realiza la separación selectiva, estriba en el hecho de que es deseable conservar las características de cada grupo a causa de la similitud que existe entre los componentes que lo constituyen, así el grupo de los componentes intermedios presenta una presión de vapor menor que la del grupo componentes livianos, lo que hace más fácil su almacenamiento y transporte. La segunda operación, licuefacción, es necesaria a fin de reducir el volumen del producto, lo que resulta de suma importancia en el manejo y almacenaje de los mismos, a manera de ejemplo diremos que el GNL, experimenta una reducción de volumen en el orden de las 600 veces cuando pasa de gas a líquido.

Para llevar a la práctica la licuefacción y la separación selectiva en la industria se emplea comúnmente una o alguna combinación de las siguientes operaciones básicas: refrigeración, absorción y destilación fraccionada, además de las operaciones complementarias de transferencia de calor, bombeo y compresión de fluidos. Estas operaciones básicas combinadas de forma que conduzcan a un mínimo de requerimientos energéticos y un mínimo en número y dimensión de equipos, constituyen las etapas básicas de los diversos procesos empleados en la industria del gas natural, para la obtención de los productos mencionados. ^[5]

Tabla N° 2.2. Composición típica del Gas Natural en diferentes áreas de Venezuela (% Volumen) ^[6]

Componente	Composición Base	Oriente (Libre)	Oriente (Asociado)
Metano	80.98	76.9	75.1
Etano	7.35	5.8	8.0
Propano	2.69	2.5	4.6
i-Butano	0.58	0.5	0.9
n-Butano	0.76	0.6	1.1
i-Pentano	0.32	0.3	0.3
n-Pentano	0.24	0.2	0.3
Hexano	0.47	0.2	0.2
Heptanos	0.0	0.4	0.2
CO₂	6.48	12.5	9.2
Nitrógeno	0.080	0.1	0.1
Total	100.0	100.0	100.0
BTU/pie3	1.273	1.033	1.126
Kcal/m3	11.328	9.192	10.020

Tabla N° 2.3. Contaminantes del Gas Natural ^[7]

Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S
Monóxido de Carbono	CO
Dióxido de Carbono	CO ₂
Sulfuro de Carbonilo	COS
Disulfuro de Carbono	CS ₂
Mercaptanos	RSH
Nitrógeno	N ₂
Agua	H ₂ O
Oxígeno	O ₂

2.2.1. Características del Gas Natural

El gas natural se encuentra acumulado en el subsuelo en estructuras denominadas trampas. En la actualidad se presume que el gas natural es el resultado de una serie de procesos químicos y variaciones sufridas por la materia orgánica proveniente de animales y vegetales, la cual ha sufrido la acción de bacterias, elevadas temperaturas y presiones, que han dado origen a la formación de hidrocarburos, tanto en estado líquido como en estado de vapor y/o gaseoso, y que permiten el establecimiento de una serie de yacimientos. ^[7]

El gas natural es incoloro, inodoro, insípido, sin forma particular y más ligero que el aire. Está compuesto principalmente por metano, etano, propano, butanos, pentanos y otros componentes tales como el CO₂, He, H₂S y el N₂, denominados contaminantes del gas natural. La composición del gas natural nunca es constante, sin embargo, se puede decir que su componente principal es el metano (como mínimo 90%). Posee una estructura de hidrocarburo simple, compuesto por un átomo de

carbono y cuatro átomos de hidrógeno (CH_4). El metano es altamente inflamable, se quema fácil y emite muy poca contaminación.

El gas natural no es corrosivo, ni tóxico, su temperatura de combustión es elevada y posee un estrecho intervalo de inflamabilidad. A presión atmosférica normal, si el gas natural se enfría a una temperatura de -161°C aproximadamente, se condensa bajo la forma de un líquido llamado gas natural licuado (GNL) ^[3]. Un volumen de este líquido ocupa casi 600 veces menos espacio que el gas natural y es dos veces menos pesado que el agua (45% aproximadamente). El gas natural es considerado como un combustible limpio. Bajo su forma comercializada, casi no contiene azufre y virtualmente no genera dióxidos de azufre (SO_2). Sus emisiones de óxidos de nitrógeno (NO) son menores a las generadas por el petróleo y el carbón. Las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) son inferiores a la de otros combustibles fósiles. En la tabla 2.1 muestra la composición en porcentaje volumen que puede tener una muestra de una composición típica de gas natural en Venezuela.

2.2.2. Tipos de Gases

El gas natural sometido a variaciones controladas de presión, volumen y temperatura se puede licuar, ya que sus moléculas se aproximan aumentando la fuerza de adhesión convirtiéndose en líquidos. ^[7]

Dependiendo de este porcentaje de licuefacción y de las partículas líquidas en suspensión (GLP) se dice que el gas puede ser:

- Rico o Húmedo
- Seco o Pobre
- Gas Dulce
- Agrio o Acido

Gas Rico o Húmedo

Son aquellos que tienen disueltos en su formación altos porcentajes de compuestos líquidos como el propano, butano, gasolina, agua. etc.

Gas Seco o Pobre

Se les extrae o tienen bajos porcentajes de líquido condensado.

Gas Dulce

Es un gas que contiene cantidades muy pequeñas de compuestos azufrados que pueden ser utilizados sin purificación y no ocasiona daños en equipos y tuberías, su contenido de H₂S es menor a 10 ppm.

Gas Agrio o Ácido

Se consigue en estado natural, el cual tiene alto contenido de compuestos de azufre, es muy corrosivo y tóxico.

2.2.3. Clasificación del Gas Natural de acuerdo a su localización en el subsuelo**➤ Asociado**

Es aquel que se encuentra en contacto o disuelto en un yacimiento donde predominan los hidrocarburos líquidos en forma de petróleo o condensado.

➤ No Asociado

Es aquel que se encuentra en yacimientos que no contienen crudo, a las condiciones de presión y temperatura originales. El gas no asociado puede hallarse como húmedo ácido, húmedo dulce o seco. ^[7]

➤ **Gas condensado**

Es un yacimiento de gas con líquido disuelto. La temperatura del yacimiento se encuentra entre la temperatura crítica y la temperatura cricondentérmica. ^[7]

2.2.4. Purificación de gases

2.2.4.1. Absorción

La absorción es probablemente la técnica más importante de purificación de gas y es común en un gran número de procesos. Esta consiste en la transferencia de una sustancia de la fase gaseosa a la fase líquida a través de los límites de fase.

El material absorbido puede disolverse físicamente en el líquido o reaccionar químicamente con él. El despojamiento (stripping) representa un caso especial de la misma operación con la particularidad que el material se mueve desde la fase líquida a la fase gaseosa. ^[7]

A) Equipos para absorción

El equipo donde se realiza el contacto entre el gas con impurezas con el líquido absorbente es denominado absorbedor.

La gran mayoría de los absorbedores utilizados en operaciones para la purificación de gas son:

- Torres empacadas.
- Torres de platos.
- Contactores tipo spray.

Estos absorbedores son intercambiables en un rango amplio, aunque ciertas condiciones específicas pueden favorecer uno con respecto a otro. ^[4]

2.2.4.2. Deshidratación del Gas Natural

Todo el gas natural que se produce contiene agua. Alguna de esta agua está en estado líquido y puede ser fácilmente removida con el uso de separadores, pero siempre permanecerá algo de agua mezclada con el gas en forma de vapor.

El vapor de agua es probablemente la impureza indeseable más común en un flujo de gas. Cuando el gas es comprimido o enfriado, el vapor de agua pasa a la fase líquida o sólida, y es entonces cuando se vuelve peligroso ya que por una parte acelera la corrosión de las tuberías y equipos, y por la otra en las plantas de recuperación de líquidos presenta el gran inconveniente de formar Hidratos (compuestos de hidrocarburos y agua), los cuales se solidifican en forma de hielo y taponan válvulas, conexiones y líneas.

Para prevenir esas dificultades, se debe remover parcialmente del gas el vapor de agua contenida en él, antes de introducirlo a las líneas de transmisión o plantas de proceso. ^[4]

A) Principios de deshidratación

El gas se considera saturado de vapor de agua, cuando sale de las estaciones de flujo. La cantidad de agua contenida en el gas a las diferentes presiones y temperaturas ha sido objeto de muchas investigaciones y ha sido cuidadosamente determinado.

Una de las medidas usadas para indicar el contenido de agua en cualquier gas, es mediante el procedimiento llamado Punto de Rocío; el cual se define como la temperatura a la cual el vapor comienza a condensarse. ^[4]

B) Agentes deshidratantes

La deshidratación se puede efectuar por diferentes agentes entre los que podemos mencionar los siguientes: Ácido sulfúrico concentrado, Alumina activada, Silica gel, Tamices moleculares, Glicol.

De todos los mencionados anteriormente uno de los más usados en una planta de extracción es el Glicol. ^[4]

C) Tipos de glicol

Los glicoles son compuestos químicos líquidos del grupo de los alcoholes múltiples, que tienen solubilidad en el agua prácticamente infinita, por lo que han sido aplicados en la deshidratación del gas natural. Los tipos de glicol utilizados son: monoetilenglicol o etilenglicol, el dietilenglicol y el trietilenglicol. En las plantas de extracción de líquidos se prefiere el etilenglicol, debido a los siguientes factores:

- Se requiere menos cantidad en circulación para alcanzar el mismo grado de deshidratación debido a su bajo peso molecular.
- Su baja viscosidad evita la formación de emulsiones con los hidrocarburos.
- Es menos soluble en los hidrocarburos evitando las pérdidas por disolución. ^[4]

D) Factores que influyen en la selección del glicol

- Costos
- Viscosidad, por debajo de 100 – 150 cp.
- Reducción del punto de rocío.
- Solubilidad del glicol en la fase de hidrocarburos.
- Punto de congelación de la solución de agua.
- Presión de vapor.

- Temperatura de la fase líquida y gaseosa en el separador de baja temperatura.
- Relación gas/hidrocarburos líquidos. ^[4]

E) Factores que influyen en el deterioro del glicol

➤ Acidez:

Resulta de la absorción de compuestos ácidos del gas o por descomposición del glicol en presencia de O₂ y altas temperaturas, por lo cual se recomienda utilizar gas de manto en el tanque de glicol.

➤ Bajo pH:

El glicol se auto-oxida a niveles de pH por debajo de 5.5, formando peróxidos, aldehídos y ácidos orgánicos. Por esto se recomienda mantener el pH entre 7 y 8.5 usando alcanolaminas

➤ Contaminación:

Con sales, hidrocarburos o parafinas arrastradas con el gas las cuales se depositan en las paredes de los calentadores hasta producir rompimiento del metal. Las parafinas además reducen la eficiencia de contacto entre el gas y el glicol. ^[4]

Tabla N° 2.4. Aplicabilidad de las tecnologías de Deshidratación ^[4]

PROCESO	USO/APLICABILIDAD
➤ Absorción	Es un método de deshidratación comúnmente utilizado. Como medio de absorción es utilizado un líquido higroscópico como el glicol. Se aplica para alcanzar las especificaciones de venta de gas en tubería y requerimientos de campo (Gas Lift, combustible, etc.).
➤ Adsorción	En este proceso de deshidratación más común donde el medio de adsorción es un sólido como el Tamiz Molecular. Es utilizado para la obtención de bajo contenido de agua, requerido en procesos a bajas temperaturas.
➤ Condensación	Es un proceso de deshidratación por refrigeración o inyección de metanol, el cual es utilizado para Prevención de formación de hidratos.

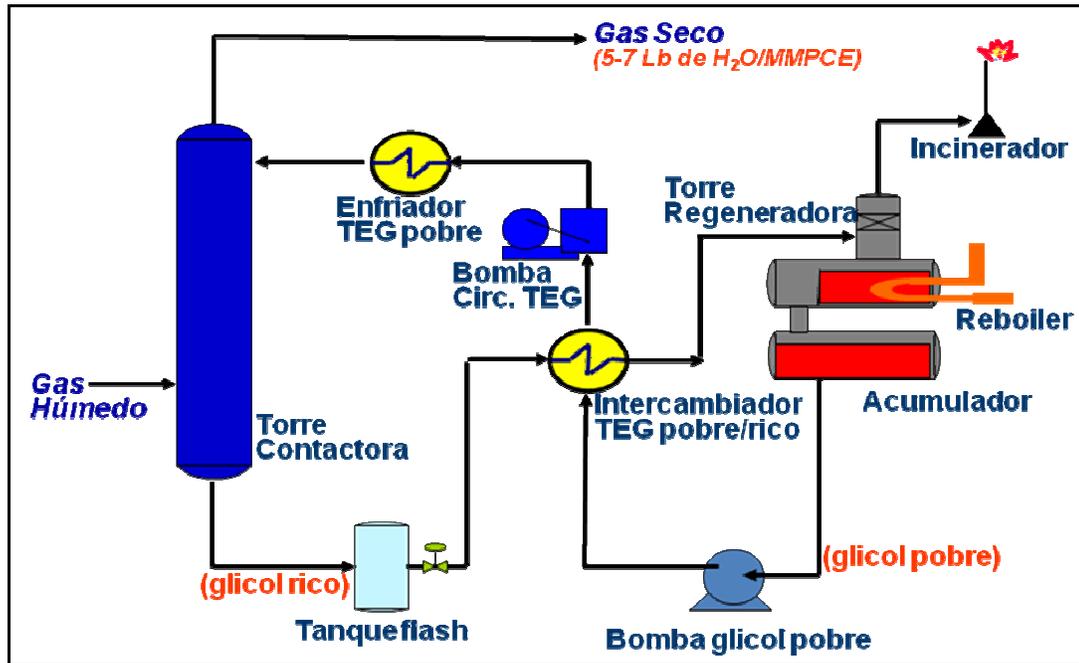


Figura N° 2.1. Diagrama de proceso de deshidratación por absorción con trietilenglicol (TEG)^[4]

F) Tamices moleculares

Un tamiz molecular es un material que contiene poros pequeños de un tamaño preciso y uniforme que se usa como agente absorbente para gases y líquidos. La moléculas que son lo suficientemente pequeñas para pasar a través de los poros son absorbidas, mientras que las moléculas mayores no. A diferencia de un filtro, el proceso opera a nivel molecular. Por ejemplo, una molécula de agua puede ser lo suficientemente pequeña para pasar, mientras que otras moléculas más grandes no pueden hacerlo. Aprovechando esta propiedad, a menudo se emplean como agentes desecantes. Un tamiz molecular puede absorber hasta un 22% de su propio peso en agua.^[4]

A menudo consisten de minerales de aluminosilicatos, arcillas, vidrios porosos, carbones micro-porosos, zeolitas, carbón activado o compuestos sintetizados que tienen estructuras abiertas a través de las cuales pueden difundir moléculas pequeñas como las del agua o el nitrógeno.

Los tamices moleculares se usan ampliamente en la industria del petróleo, especialmente para la purificación de corrientes de gas, y en los laboratorios de química para separar compuestos y para el desecado de los reactivos. El mercurio que contiene el gas natural es extremadamente perjudicial para las tuberías de aluminio y otras partes de los equipos de licuefacción, por lo que se emplea gel de sílice en este caso.

Los métodos para regenerar los tamices moleculares incluyen los cambios de presión (como en los concentradores de oxígeno), calentamiento y purga con un gas portador (como cuando se usa en la deshidratación de etanol), o calentar al vacío extremo. ^[4]

2.3. Variables a estudiar en el proceso de extracción de líquidos del gas natural

2.3.1 Punto de Rocío

Cuando el gas es transportado en gasoductos, se debe considerar el control de la formación de hidrocarburos líquidos en el sistema. La condensación de líquidos representa un problema en la medición, la caída de presión y la operación segura.

Para prevenir la formación de líquidos en el sistema, se requiere controlar el punto de rocío de los hidrocarburos por debajo de las condiciones de operación del gasoducto. En vista de que las condiciones de operación son fijadas por las

condiciones ambientales, el flujo en una sola fase solo puede asegurarse mediante la remoción de los hidrocarburos pesados contenidos en el gas. ^[8]

2.3.1.1. Plantas de control de Punto de Rocío

El ajuste de punto de rocío permite acondicionar el gas de pozo para alcanzar su condición de transporte en gasoducto. A su vez, permite retirar del mismo los componentes más pesados (gasolinas y LPG, básicamente) aumentando el valor de venta por comercializar dichos líquidos. Dicho ajuste puede lograrse mediante refrigeración mecánica (con propano, por lo general) o mediante efecto Joule-Thompson.

Cuando el Gas se transporta en gasoductos, debe tomarse en cuenta el control de la formación de hidrocarburos líquidos en el sistema de tuberías. La condensación de líquidos es un problema de medición y de caída presión a condiciones de operación. Para prevenir la formación de líquidos en el sistema, es necesario controlar el punto de rocío del hidrocarburo por debajo de las condiciones de funcionamiento del gasoducto. Puesto que las condiciones de funcionamiento del gasoducto son fijadas generalmente por diseño y consideraciones ambientales, el flujo monofásico se puede asegurar solamente por el retiro de los hidrocarburos más pesados del Gas.

Existen dos métodos de separación para disminuir la temperatura y reducir el punto de condensación del hidrocarburo. Si existe en el gasoducto una suficiente presión, la remoción se puede lograr mediante la expansión y refrigeración en una unidad LTS (separación de baja temperatura). El sistema de expansión y refrigeración utiliza el efecto Joule-Thompson para reducir la temperatura del gas por expansión. Esta reducción de temperatura da lugar no sólo a la condensación líquida del hidrocarburo, sino también produce la condensación de agua. El agua

generalmente es removida en forma de hidratos, se derrite y se remueve del proceso. Así, el proceso puede lograr el control del punto de rocío de agua y de hidrocarburos en una sola unidad. ^[8]

El ejemplo de un sistema de LTS. El Gas a alta presión puede primero pasar a través de un calentador. Este calentador no es a menudo necesario, depende de las condiciones del Gas. El Gas entonces entra en el intercambiador de calor por la parte inferior del separador donde el Gas es enfriado por el intercambio de calor entre el líquido y los hidratos condensados. Toda el agua o condensado producido en este punto se elimina en separador de alta presión (HPKO).

El Gas del separador entonces es enfriado debido al intercambio de calor con las corrientes de líquido. La temperatura en este punto se debe controlar para prevenir la formación de hidratos en el intercambiador. El Gas en este punto pasa a través de la válvula de expansión Joule-Thompson. El hidrato y los líquidos de hidrocarburo que se produjeron a partir de esta caída de presión pasan a la parte inferior del separador de baja temperatura. Los hidratos se funden y tanto el agua y el condensado se elimina por control de nivel. El Gas que sale del separador tiene un punto de rocío de hidrocarburo igual a la temperatura y a la presión del separador.

Sólo se utilizará donde se disponga de suficiente presión para llevar a cabo la transformación deseada y la separación. Se trata de un proceso atractivo si suficiente líquido puede ser retirado a condiciones de operación. Una modificación a este proceso consiste en la inyección de glicol al Gas de alta presión para que permita el logro de puntos de rocío de agua inferior, cuando la presión disponible es limitada. ^[9]

Tabla N° 2.5. Plantas de control de Punto de Rocío

PLANTA	LUGAR	CAUDAL	AÑO
<i>Efecto Joule - Thompson</i>	El Trapial - Argentina	50.000 SCMD	2005
<i>Efecto Joule - Thompson</i>	Lunlunta Carrizal - Argentina	1.000.000 SCMD	2004
<i>Efecto Joule - Thompson</i>	El Trapial - Argentina	70.000 SCMD	2004
<i>Efecto Joule - Thompson</i>	Surubí - Bolivia	50.000 SCMD	2003
<i>Refrigeración Mecánica</i>	Sirari - Bolivia	850.000 SCMD	2001

2.3.2. Refrigeración

Se entiende por refrigeración al proceso, por el cual se obtiene una pérdida neta de energía calorífica. Esta pérdida puede mantener el elemento que se enfría en su fase original o puede producir un cambio de fase. Generalmente, no se dispone de suficiente presión para operar un sistema LTS. Una alternativa al proceso de refrigeración por expansión, es usar un sistema de refrigeración mecánica para remover los compuestos pesados y reducir el punto de rocío. ^[5]

La presión del gas a través del proceso se mantiene casi constante. El gas es pre-enfriado y luego enfriado con el Chiller hasta una temperatura determinada. El líquido se separa en el separador de baja temperatura. La temperatura del separador es fijada para proporcionar el punto de rocío deseado. Esta especificación de temperatura debe considerar el Gas recombinado que proviene de la estabilización, además de las variaciones de presión del Gas de alimentación. Se recomienda tomar previsiones para evitar la formación de hidratos, bien por medio de deshidratación o

por inyección de glicol. Los sistemas de refrigeración son de uso común en la industria de procesamiento del Gas Natural y los procesos relacionados con el petróleo, petroquímica e industrias químicas. Algunas aplicaciones incluyen el recobro de líquidos del Gas Natural, recobro de Gas licuado de petróleo, control de punto de rocío de hidrocarburos, condensación de reflujo para fraccionadores de hidrocarburos livianos y plantas de LGN.

La selección del refrigerante está basada en los requerimientos de temperatura, disponibilidad, economía y experiencia previa, por ejemplo, en una planta de procesamiento de Gas se dispone de etano y propano, mientras que en una planta de olefinas se dispone de etileno y propileno. El propano o propileno no son recomendables en una planta de amoníaco, por la posibilidad de contaminación, pero puede usarse amoníaco para este propósito. Los halocarbonados han sido usados ampliamente debido a sus características de no inflamabilidad.^[5]

En el sentido técnico, refrigeración significa mantener un sistema a temperatura menor que la de sus alrededores. Esto no puede suceder de forma natural, de modo que debe emplearse un dispositivo que permita lograr lo anterior. Refrigeración es el proceso por el que se reduce la temperatura de un espacio determinado y se mantiene esta temperatura baja. La refrigeración evita el crecimiento de bacterias e impide algunas reacciones químicas no deseadas que pueden tener lugar a temperatura ambiente. La eficacia del hielo como refrigerante es debida a que tiene una temperatura de fusión de 0 °C y para fundirse tiene que absorber una cantidad de calor equivalente a 333,1 (KJ/kg). El dióxido de carbono sólido, conocido como hielo seco o nieve carbónica, también se usa como refrigerante. A la presión atmosférica normal no tiene fase líquida, y sublima directamente de la fase sólida a la gaseosa a una temperatura de -78,5 °C. La nieve carbónica es eficaz para conservar productos a bajas temperaturas mientras dura su sublimación.^[5]

2.3.2.1. Proceso de refrigeración del Gas Natural

En este caso la mezcla gaseosa se enfría a una temperatura tal que se puedan condensar las fracciones de Gas Licuado de Petróleo (GLP) y los Líquidos del Gas Natural (LGN). Los refrigerantes más usados en este caso son freón o propano. El Gas inicialmente se hace pasar por un separador para removerle el agua y los hidrocarburos líquidos. Al salir el Gas del separador se le agrega glicol o algún inhibidor de hidratos para evitar que estos se formen durante el enfriamiento. Luego el Gas pasa por un intercambiador donde se somete a un preenfriamiento antes de entrar al sistema de enfriamiento definitivo para llevarlo hasta aproximadamente $-15\text{ }^{\circ}\text{F}$. De este sistema el Gas pasa a un separador de baja temperatura donde habrá remoción del glicol y el agua, y los hidrocarburos, como mezcla bifásica, pasan a una torre de fraccionamiento en la cual se le remueven los hidrocarburos livianos, donde es básicamente metano, en forma gaseosa como Gas residual que sale por la parte superior; los hidrocarburos intermedios, tales como Etano, Propano, Butano y más pesados salen por la parte inferior hacia almacenamiento si no se va hacer separación de, al menos del (GLP y LGN), o hacia fraccionamiento si es lo contrario. Parte de los gases que tratan de salir de la torre de fraccionamiento son condensados y reciclados para reducir el arrastre de hidrocarburos intermedios en el Gas. El calentamiento en el fondo de la torre se hace para evaporar el metano y el etano; reduciendo la presión y aumentando la temperatura, se puede conseguir una mejor separación del metano y el etano de la fase líquida. ^[5]

Los niveles típicos de remoción de Propano, Butano, Pentano y más pesados por este proceso son Propano = 98%. Es posible recuperar pequeños porcentajes de Etano, en este tipo de plantas, pero está limitado por el hecho de que no es posible, con las refrigerantes actuales, bajar la temperatura del Gas antes de entrar a la torre absorbidora a valores por debajo de $-40\text{ }^{\circ}\text{F}$ aproximadamente. La mayoría de las plantas usan freón como refrigerante y limitan la temperatura del Gas de entrada a

(-20 °F), porque a temperaturas por debajo de este límite las propiedades mecánicas del acero de las tuberías se ven afectadas. ^[5]

2.3.2.2. Aplicación de la refrigeración

Entre las principales aplicaciones de la refrigeración y/o licuefacción en la industria petrolera se incluye: purificación de aceites lubricantes; reacciones a bajas temperatura; separación de hidrocarburos volátiles; deshidratación del Gas Natural, licuefacción del Gas Natural o de sus componentes, y procesos criogénicos: ^[5]

➤ **Refrigeración por expansión:**

El expansor - compresor es un dispositivo para enfriar el gas de entrada y volver a comprimir el Gas de salida, se sabe que el expansor es simplemente una turbina de Gas. Su construcción es opuesta a aquella de un compresor centrífugo. El Gas a alta presión ingresa a lo que normalmente sería el extremo de descarga de un compresor y fluye en sentido contrario a través del expansor, luego sale de lo que normalmente sería la línea de succión de un compresor. La presión y temperatura del Gas que sale del expansor son mucho menores que aquellas a la entrada del expansor. Las temperaturas de un expansor pueden alcanzar valores tan bajos como (-150 °F), por ello el expansor debe de ser fabricado con materiales que soporten temperaturas muy bajas. El compresor, es un compresor centrífugo convencional que esta acoplado al mismo eje del expansor. La energía requerida para accionar el gas el compresor es la misma que la energía entregada por el gas al pasar a través del expansor. Los procesos que se realizan en la refrigeración por compresión. Expansión:

1.- En el evaporador el refrigerante se evapora completamente, este proceso se realiza en forma isobárica, que indica que el proceso de expansión del Gas se lleva a cabo a presión constante.

2.- El compresor aumenta la presión del refrigerante gaseoso desde la presión a la salida del evaporador hasta la presión a la entrada del condensador, este proceso se realiza en forma isentrópica, aunque siempre hay que tener en cuenta que en la compresión de dos o tres etapas existen variaciones notorias en la entropía. En la válvula de expansión también se producen cambios en la entalpía, por lo que difícilmente pueden existir los procesos isentrópico e isentálpicos.

3.- En el condensador el refrigerante pasa de un estado de vapor sobrecalentado a un estado líquido saturado, proceso que se realiza en forma isobárica.

4.- En la válvula de expansión se produce un estrangulamiento que permite obtener una mezcla líquido-vapor a baja presión y que corresponde a la presión de entrada del evaporador, este proceso se realiza en forma isentálpica. El coeficiente de funcionamiento de un ciclo (CDF) se define como el coeficiente que resulta de dividir la cantidad de enfriamiento producido (Q_1) entre el trabajo suministrado por el compresor, y se representa por la siguiente ecuación:

$$CDF = \frac{Q_1}{W_{neto}} = \frac{h_2 - h_1}{h_3 - h_1} \quad \text{Ec 2.1}$$

Donde (CDF) es el coeficiente de funcionamiento que es adimensional; (Q_1) es el enfriamiento producido por el evaporador en (BTU/lb_M); (W_{neto}) es el trabajo realizado por el compresor en (BTU); ($h_1; h_2$ y h_3) son las entalpías correspondientes a los ciclos, respectivos en (BTU/lb_M). En el ciclo de refrigeración por compresión y expansión puede ser clasificado en cuatro diferentes fases, las cuales son: Expansión, evaporación, compresión y condensación. ^[5]

➤ **Refrigeración Mecánica:**

En la refrigeración mecánica se obtiene un enfriamiento constante mediante la circulación de un refrigerante en un circuito cerrado, donde se evapora y se vuelve a condensar en un ciclo continuo. Si no existen pérdidas, el refrigerante sirve para toda la vida útil del sistema. Todo lo que se necesita para mantener el enfriamiento es un suministro continuo de energía y un método para disipar el calor. Los dos tipos principales de sistemas mecánicos de refrigeración son el sistema de compresión, empleado en los refrigeradores domésticos grandes y en la mayoría de los aparatos de aire acondicionado, y el sistema de absorción, que en la actualidad se usa sobre todo en los acondicionadores de aire por calor, aunque en el pasado también se empleaba en refrigeradores domésticos por calor. La refrigeración mecánica, como cualquier otro ciclo de refrigeración ocurre, en etapas, las cuales son: ^[5]

1.- Etapa de Evaporación:

En esta etapa la carga de refrigeración está relacionado con la cantidad total de calor absorbido en el evaporador, este proceso, por lo general se denomina “Toneladas de refrigeración” y se expresa en (BTU/unidad de tiempo), y la tasa de flujo está dada, la siguiente ecuación:

$$m = \frac{Q_{ref}}{(h_{v2} - h_{L1})} \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde; (Q_{ref}) es el calor total en (BTU/hora); (h_{v2}) es la entalpía del vapor en el punto 2 Y, (h_{L1}) es la entalpía del líquido en el punto 2 del líquido

2.- Etapa de Expansión:

Aquí los vapores del refrigerante salen del evaporador a la presión de saturación. La temperatura de refrigeración correspondiente es igual a la temperatura de saturación a una entalpía (h_{v_2}). La entropía en este punto es la entropía de saturación. Luego, estos vapores son comprimidos isentrópicamente hasta una presión en el punto (1) a lo largo de una línea.

3.- Etapa de Condensación:

En esta etapa el refrigerante sobrecalentado que sale del compresor a una presión de los punto (A y D) es enfriado a una presión aproximadamente constante hasta la temperatura del punto de rocío. Luego los vapores refrigerantes comienzan a condensarse a una temperatura constante. La presión de condensación del refrigerante es una función de la fuente de enfriamiento disponible. La fuente de enfriamiento recibe el calor que el refrigerante le transfiere.

La refrigeración mecánica, puede ocurrir en una sola etapa, como también en dos etapas, las cuales se utilizan con el objetivo de obtener ahorros de energía de hasta un 20%, esto en comparación con la refrigeración mecánica realizada en una sola etapa. La refrigeración puede ocurrir también en tres etapas, en este caso el ahorro de energía es mayor.

➤ Sistema de Refrigeración por Absorción:

La máquina de refrigeración por absorción es un conjunto de equipos utilizados para enfriar agua mediante el empleo de calor y sin utilizar un elemento motriz primario. En la refrigeración por absorción se sustenta en la utilización de instalaciones de calentamiento a tiempo completo, durante todo el año. En este caso el método de refrigerante es el agua, luego el calor que suministra el vapor de agua

caliente es generalmente la fuerza de trabajo que se utiliza en la máquina de absorción, es por ello, que la refrigeración por absorción, tiene una serie de ventajas.

En la refrigeración por absorción se consigue el enfriamiento mediante la energía térmica de una llama de gas, de resistencias eléctricas, o de la condensación del vapor de agua a baja presión. La instalación tiene una serie de tubos de diversos diámetros, dispuestos en circuito cerrado, los cuales están llenos de amoníaco y agua. El amoníaco gaseoso que hay en la instalación se disuelve fácilmente en el agua, formando una fuerte solución de amoníaco. Al calentarse ésta en la llama de gas, o por otro medio, se consigue que el amoníaco se desprenda en forma de gas caliente, lo cual aumenta la presión cuando este gas se enfría en el condensador, bajo la acción de agua o aire frío, se produce la condensación y se convierte en amoníaco líquido. Fluye así por una válvula dentro del evaporador, donde enfría el aire circundante absorbiendo el calor de éste, lo cual produce nuevamente su evaporación. ^[5]

Las plantas de refrigeración por absorción también pueden ser utilizadas para recuperar etano y otros componentes más pesados del gas. Las plantas de absorción con una alta eficiencia pueden recuperar 40% de etano y 90% de propano y todos los hidrocarburos más pesados del gas. Como conclusión para los productos refrigerados se puede indicar lo siguiente:

1.- El manejo de productos refrigerados es una técnica, que debido al auge del Gas Natural tiene que desarrollarse en el país.

2.- Para almacenar grandes volúmenes de gas licuado se requiere de una planta de refrigeración y un sistema de recobro de vapores que haga la operación segura y económica.

3.- El almacenaje de productos refrigerados ha provisto a la industria del método más económico y seguro para almacenar grandes cantidades de gas en estado líquido.

4. - El tanque refrigerado es el elemento clave de una planta de refrigeración.

5.- En la operación de un tanque refrigerado es muy importante poner especial atención al control de presión dentro del recipiente al de temperatura en el fondo para prevenir daños mayores al equipo.

6.- La mezcla de productos refrigerados con gran diferencia en sus respectivos puntos de ebullición puede ser una actividad riesgosa y en muchos casos ha causado graves accidentes.

7.- A diferencia del manejo de líquidos estables a temperatura ambiente, en el caso de productos refrigerados el sistema va estar afectado por la condición estática o dinámica del fluido.

8.- Los buques que transportan productos refrigerados, poseen instalaciones similares a las existentes en las plantas de almacenaje.

➤ **Sistema de Refrigeración por Compresión**

Este es uno de sistema de refrigeración que más se emplea En las máquinas de este tipo constituye la parte central del sistema la bomba o compresor, que recibe vapor a baja presión y lo comprime. Con esta operación se elevan considerablemente la presión y la temperatura del vapor. Luego, este vapor comprimido y calentado fluye por el tubo de salida del condensador térmico, donde el vapor cede su calor al agua o aire frío que rodea al condensador. En esta forma su temperatura desciende hasta el punto de condensación, y se convierte en líquido con la correspondiente liberación de calor que ocurre en estos casos, y que provoca que el proceso se realice con un alto grado de eficiencia. El agente frigorífico, en estado líquido, pasa del condensador hasta un receptáculo y de allí fluye por un conducto o válvula, o el tubo reductor, disminuye la presión del líquido a medida que fluye dentro del vaporizador para enfriarlo. Este vaporizador se haya en el espacio que desea refrigerar. El aire tibio de este recinto le transmite, por contacto, al vaporizador parte de su calor, y hace que el líquido se evapore. Como se ve este nuevo cambio de estado, de líquido a

vapor, se efectúa aumentando la temperatura. A continuación, aspira el compresor, por el tubo de succión, el vapor caliente del evaporador, y, después de volverlo a comprimir, lo impulsa al condensador y el proceso se desarrolla hasta el final. ^[10]

2.4 Extracción de líquidos en el procesamiento del gas natural

Este proceso es al que se somete el gas natural rico libre de impurezas, con la finalidad de separar el gas Metano seco (CH_4) de los llamados Líquidos del Gas Natural, (LGN,) integrados por Etano (C_2H_6), Propano (C_3H_8); Butanos (C_4H_{10}), Pentanos (C_5H_{12}), etc. El principal objetivo del proceso de extracción es el estudio del comportamiento de las mezclas de hidrocarburos en equilibrio bifásico. Los componentes más livianos de la mezcla Como Metano (CH_4) y Etano (C_2H_6), los cuales principalmente se concentran en la fase de vapor, mientras que los más pesados Propano (C_3H_8); Butanos (C_4H_{10}) y Pentanos (C_5H_{12}) se acumulan en la fase líquida.

La distribución de los componentes que se encuentran presentes en ambas fases se predice mediante las constantes de equilibrio bajo las condiciones de presión y temperatura. Al disminuir la temperatura y aumentar la presión se favorece la concentración de los compuestos pesados en la fase líquida y se obtienen los (LGN). Esto explica la necesidad de los procesos de extracción de líquidos de operar a temperaturas bajas. El gas natural que se envía a las plantas de extracción está constituido por metano, etano, propano, butano e hidrocarburos más pesados, así como por impurezas tales como el azufre, y otros componentes de gas natural que se consideran impurezas, y que de alguna forma pueden hacer que el proceso que se evalúa tenga una baja eficiencia, y por lo tanto cause problemas de rentabilidad. El

procesamiento de gas cubre una gran variedad de operaciones para preparar el gas para la comercialización. ^[11]

En algunos casos, los hidrocarburos pesados son removidos para controlar el punto de rocío del gas y evitar la condensación de los líquidos en las líneas de transmisión y sistemas de combustible.

En este caso, los líquidos son un sub-producto del proceso y si existen mercados para colocarlos, se usan como combustible. De otra manera, los líquidos pueden ser estabilizados y comercializados como condensados.

2.4.1. Líquidos del Gas Natural (LGN)

Es una mezcla compuesta por los hidrocarburos condensables presentes en la corriente de Gas Natural, el cual es separado por distintos métodos. Entre los componentes de esta mezcla están etano (la cantidad depende si este se recobra o rechaza en los procesos de recuperación de líquidos), propano, butanos, pentanos y fracción C_6^+ . ^[4]

2.4.2. Contenido líquido de un Gas (GPM)

También se conoce con el nombre de riqueza de un Gas. Se define como el número de galones de líquido que pueden obtenerse de 1.000 pies cúbicos normales de gas natural. Se expresa generalmente con las letras GPM. Es un factor muy usado y conocido principalmente en problemas relacionados con plantas de extracción de líquidos del gas natural.

Debido a que sólo el propano y compuestos más pesados, pueden en la práctica recuperarse como líquidos, el metano y el etano no se consideran al calcular el contenido de líquido, GPM, del gas natural. ^[4]

2.4.3 Recobro

El término LGN (líquidos del gas natural) es un término general que se aplica a líquidos recuperados del gas natural y como tal se refiere al etano y productos más pesados. El término LPG (gas licuado de petróleo) describe mezclas de hidrocarburos en los cuales en el LPG los componentes principales son: propano, iso-butano y n-butano, propileno y butilenos. Normalmente en la producción de gas natural las olefinas no se encuentran presentes en el GLP.

El recobro de hidrocarburos líquidos livianos de corrientes de gas natural puede variar desde un simple control de punto de rocío hasta plantas de extracción profunda. El grado deseado de recobro de líquidos tiene un efecto determinante en la selección del proceso, la complejidad y el costo de las facilidades de procesamiento. ^[5]

La refrigeración del Gas puede ser efectuada mediante:

- Refrigeración mecánica.
- Refrigeración por absorción
- Expansión a través de una válvula J-T o una combinación.
- Para alcanzar temperaturas de proceso aun menores, se han desarrollado tecnologías como refrigeración en cascada, refrigerantes mixtos y turbo-expansión.

Con estas tecnologías, el recobro de líquido ha sido aumentado significativamente para lograr altos recobros de etano. Las primeras plantas permitían recobrar cerca del 50% del etano.

A medida que se han desarrollado nuevos procesos, el recobro de etano ha aumentado hasta por encima del 90%

2.5. Fraccionamiento

Es un proceso de separación física de los componentes de una mezcla líquida en dos o más productos que tienen diferentes puntos de ebullición, donde se separa inicialmente el componente de mayor volatilidad en la mezcla. Ocurre la mayor transferencia de masa, sin la necesidad de presencia de solventes inertes o matrices de sólidos. De igual manera es el proceso que posee el menor trabajo requerido para realizar la separación de sus componentes.

La destilación en general provee el más económico y mejor método para la separación de una mezcla líquida en sus componentes, excepto cuando.

- La diferencia de volatilidad de los componentes sea pequeña.
- La mezcla es altamente corrosiva o posee un alto factor de ensuciamiento
- Un componente es térmicamente inestable bajo condiciones de vacío.
- Una pequeña cantidad del componente de más alto punto de ebullición va a ser recuperada de la alimentación. ^[11]

2.5.1. Tipos de fraccionamiento

2.5.1.1. Destilación

Es una operación que se usa para separar los componentes de una solución líquida, y depende de la distribución de estos componentes entre una fase de vapor y una fase líquida. Los componentes están presentes en las dos fases. La fase de vapor se origina de la fase líquida por vaporización en el punto de ebullición. El requisito básico para separar los componentes por destilación consiste en que la composición del vapor sea diferente de la composición del líquido con el cual está en equilibrio en el punto de ebullición de este último. La operación de absorción difiere de la destilación en cuanto a que uno de los componentes de la absorción es esencialmente insoluble en la fase líquida.

La destilación se puede llevar a cabo en la práctica por medio de cualquiera de dos métodos principales. El primer método consiste en la producción de un vapor por ebullición de la mezcla líquida que se va a separar en una sola etapa, para recuperar y condensar los vapores. En este método no se permite que el líquido regrese al destilador de una sola etapa y se ponga en contacto con los vapores que se desprenden. El segundo método implica el retorno de una porción del condensado al destilador. Los vapores se desprenden a través de la serie de etapas o platos a contracorriente con respecto a los vapores. Este segundo método se llama destilación fraccionada, destilación con reflujo o rectificación. Se utilizan varios tipos de dispositivos, como por ejemplo, los empaques vaciados u ordenados y las bandejas o platos, para que las dos fases entren en contacto íntimo. Los platos se colocan uno sobre otro y se encierran con una cubierta cilíndrica para formar una columna. Los empaques también están contenidos dentro de una cubierta cilíndrica, entre los platos de apoyo y soporte. ^[11]

De acuerdo a la presión existen tres tipos de fraccionamiento que son:

- Destilación atmosférica: ocurre cuando la presión de la torre oscila entre 0,4 - 5,5 Atmósferas absolutas.
- Destilación al vacío: es aquella que se opera por debajo de la presión atmosférica, a una presión no mayor que 300 mmHg como presión tope de la columna.
- Destilación presurizada: normalmente usa en el tope de la columna una presión de 80 psia ó mayor.

2.5.2. Proceso de fraccionamiento de los líquidos del Gas Natural

Los Líquidos del Gas Natural (LGN) se envían a las plantas de fraccionamiento, donde se obtiene por separado Etano, Propano, Butano normal e Isobutano, Gasolina Natural y Nafta Residual, que se almacenan en forma refrigerada y presurizada en recipientes esféricos, de tal forma que pueden ser distribuidos con mucha facilidad a los centros de distribución, donde se determinan su utilización, previa planificación para evitar pérdidas innecesarias.

Proceso de Fraccionamiento de Hidrocarburos se define como la separación de los diferentes componentes de una mezcla en una corriente de gas natural, para utilizarla de manera individual. El proceso de fraccionamiento que se lleva a cabo en plantas de gas, se realiza construyendo un conjunto de torres en las cuales se va produciendo el aislamiento de los hidrocarburos de forma progresiva.

El diseño del proceso de fraccionamiento de los Líquidos del Gas Natural (LGN) se sustentan en la composición de los líquidos y, en la cantidad y especificaciones de los productos comerciales que se desean obtener, además del caudal volumétrico o tasa volumétrica de los (LGN) a la de fraccionamiento, en este

caso la obtención de los líquidos del gas natural es por métodos físicos empleando para ello columnas de fraccionamiento. El número de columnas utilizadas en un tren de fraccionamiento depende generalmente del número de productos que se desea obtener a partir de los (LGN), tal como se sabe los (LGN) son una valiosa fuente de componentes que pueden ser utilizados como combustible o, como materia prima en la industria petroquímica. ^[11]

2.6 Compresor

El compresor es una máquina destinada a producir un aumento en la presión de un fluido gaseoso. Para que un compresor funcione se requiere un equipo que le proporcione movimiento energía cinética, para ello se utiliza un motor, el cual puede ser eléctrico, motor a combustión o motores de turbina a gas.

Un compresor es una máquina térmica generadora, donde el flujo de un fluido compresible intercambia trabajo técnico con el exterior. Estos aparatos Se utilizan para comprimir gases, el principal objetivo del proceso de compresión es aumentar la presión, disminuyendo con ello el volumen específico En los distintos usos industriales son de gran utilidad, y se utilizan de diversos tipos, según las necesidades. Los compresores se relacionan por su forma de trabajo con las bombas o máquinas hidráulicas, que se utilizan para trabajar con líquidos, aunque los compresores trabajan fundamentalmente con gases y vapores. ^[10]

2.6.1. Tipos de compresores utilizados en la industria

Los compresores pueden clasificarse según diferentes criterios. Así, en función de la presión final alcanzada se habla de compresión de baja, media, alta y muy alta presión. Son numerosas las aplicaciones de los compresores, en la industria, como por ejemplo: Turbinas, instalaciones frigoríficas, gaseoductos, sobrealimentación de

motores de combustión interna, para máquinas neumáticas, industria química en general, etc.

El proceso de compresión es de tipo mecánico, proceso que necesita de trabajo auxiliar para el proceso. Los compresores consumen trabajo. Si el estudio del proceso de compresión, se realiza desde el punto de vista mecánico, lo cual es válido, ya que trabajar con gases o vapores, tiene su similitud con la mecánica de las turbinas de vapor (que producen trabajo) y con las bombas que trabajan con líquidos. El estudio termodinámico de la compresión es válido para todos los tipos, distinguiéndose dos formas de trabajo, adiabáticos y refrigerados. Este último, por lo general es un proceso isoterma, con lo cual requieren menos trabajo que los adiabáticos, entendiéndose por un proceso adiabático, aquel que ocurre sin intercambio de calor entre el sistema y medio ambiente. ^[10]

En general se puede asegurar que los compresores son máquinas de flujo continuo en donde se transforma la energía cinética (velocidad) en presión. La capacidad real de un compresor es menor que el volumen desplazado del mismo, debido a razones tales como:

- Caída de presión en la succión.
- Calentamiento del aire de entrada.
- Expansión del gas retenido en el volumen muerto.
- Fugas internas y externas.

2.6.2. Compresores centrífugos

A pesar que su eficiencia no es óptima son muy utilizados, en la industria petrolera. Los compresores centrífugos, por lo general son de menor peso y tamaño que los reciprocantes. En los últimos años se ha incrementado el uso de estos compresores, en vista que no presentan fuerzas inerciales que inducen a vibraciones.

El propósito de un compresor centrífugo es incrementar la presión del gas y esto se efectúa en dos etapas.

- Primero se añade energía al gas en forma de velocidad o energía cinética.
- Luego se convierte esta energía a presión.

Los compresores dinámicos, grupo al que pertenecen los compresores centrífugos se basan en el principio de impartir velocidad a una corriente de gas y, luego convertir esta energía en presión. Con frecuencia a estos compresores se les denomina turbocompresores y los cilindros centrífugos comprenden, tal vez, el 80% o más de los compresores dinámicos. Los compresores centrífugos tienen relativamente pocos problemas y son confiables para mover gas. La mayoría de los compresores centrífugos son cilindros de una sola etapa. ^[10]

En los compresores centrífugos el aumento de presión viene dado por el intercambio de energía entre el impulsor del compresor y el gas; en el impulsor, el gas es acelerado y comprimido al mismo tiempo, a la salida de éste el gas adquiere su más alto nivel de energía, la cual es producto del incremento de presión y la energía cinética impartida por el impulsor. La energía cinética proveniente del impulsor es recibida por el gas y transformada en energía potencial una vez desacelerado éste en el difusor del compresor, localizado aguas abajo del impulsor, aproximadamente las dos terceras partes del incremento de presión del gas es generado en el impulsor y el resto se genera en el difusor a través de la reducción de la velocidad del gas.

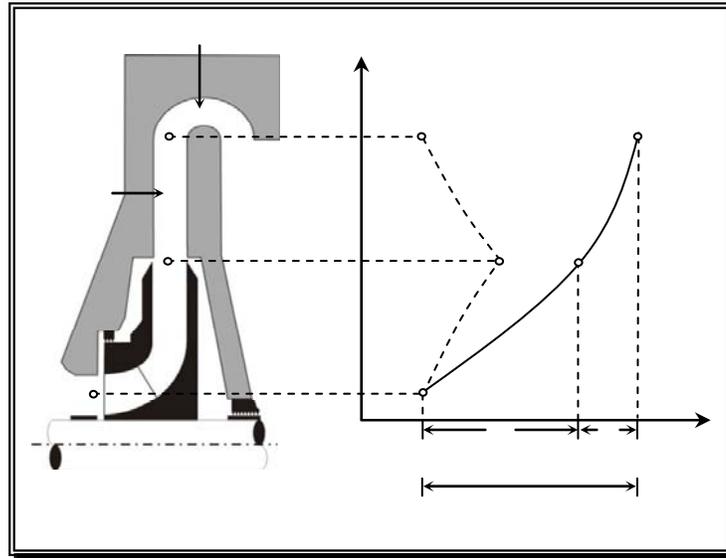


Figura N° 2.3. Etapas de un cilindro Compresor Centrífugo ^[10]

En la figura 2.3 se presentan las diferentes herramientas que conforman el cilindro compresores, y también muestra en forma gráfica en incremento de la presión, que ocurre en el proceso de compresión. Es decir, que presenta en forma gráfica la diferencia entre la presión de succión y descarga. Los compresores centrífugos son los equipos de compresión que más se han desarrollado en los últimos años. Esto se debe a que en muchas aplicaciones han resultado más eficientes que los compresores reciprocantes, esta eficiencia se expresa en términos del consumo total de energía por unidad de costo y por unidad de peso del sistema compresor. Este factor, por ejemplo, ha sido determinante en la selección de los sistemas que deben instalarse en las plataformas construidas costa afuera, donde deben de ser instaladas las plantas compresoras, para permitir el transporte y almacenamiento del gas natural producido.

Los compresores centrífugos pueden ser máquinas tanto de una sola etapa, como de etapas múltiples, ya sean de impulsión directa o indirecta a través de engranajes; estos compresores se subdividen a su vez en dos tipos principales de

acuerdo a su carcasa, en tal sentido se tienen: carcasa dividida en forma horizontal y carcasa dividida en forma vertical, también conocidos como compresores tipo barril; los primeros manejan altos valores de flujo y baja relación de compresión, tienen gran aplicación en líneas de transmisión y procesos; los de tipo barril manejan valores de flujo de medios a altos y alta relación de compresión son empleados; en aplicaciones de levantamiento artificial, reinyección, almacenamiento, etc. En la figura N° 2.6 se representa también un esquema de Un Compresor Centrífugo.

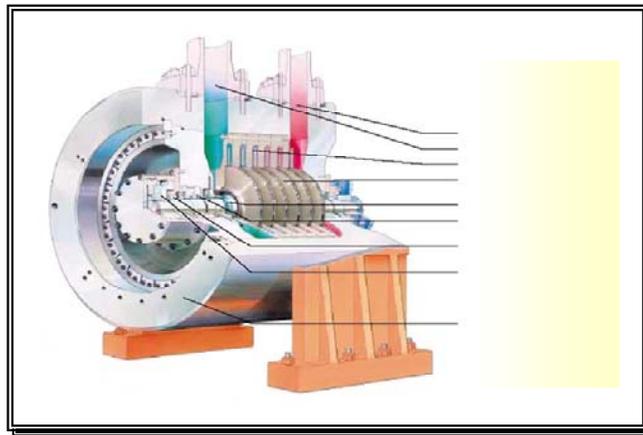


Figura N° 2.4. Representación gráfica de un Compresor Centrífugo ^[10]

En la figura N° 2.4 se observa parte del manejo del cilindro compresor, que no de gran utilidad en la industria de la producción de Hidrocarburos. En la figura se presentan las diversas herramientas que conforman el cilindro compresores centrífugos y su forma de trabajar. En términos generales se puede señalar que en estos compresores el desplazamiento del fluido es esencialmente radial. El compresor consta de uno o más impulsores y de números de difusores, en los que el fluido se desacelera. El fluido aspirado por el centro de una rueda giratoria, ojo del impulsor, es impulsado por los álabes de ésta y debido a la fuerza centrífuga, hacia los canales del difusor. La principal características de los compresores centrífugos, es que su función de trabajo esta relaciona con los cambios en la velocidad del proceso de

compresión, velocidad que después se convierte en energía, que hace que el proceso de compresión se lleve a cabo. Después que la energía cinética se ha convertido en presión, el fluido es conducido hacia el centro del próximo impulsor y así sucesivamente.

Las velocidades de funcionamiento son bastante altas comparadas con otros compresores. La gama comprendida entre 50.000 - 100.000 (RPM). es bastante frecuente en industrias aeronáuticas y especiales donde el peso es un factor dominante, en vista que si el peso del compresor es extraordinariamente grande, puede afectar la eficiencia del cilindro compresor, y por ende afectar todos los procesos que depende de este. Los compresores centrífugos, con velocidades próximas a las 20.000 (RPM) suelen ser la gama comercial más común, aún cuando están fabricando con velocidades un tanto mayores. Debido a las elevadas velocidades con que se construyen los compresores dinámicos de tamaño medio, se utilizan cojinetes amortiguadores inclinados o abiertos en lugar de los rodillos, que son los que se incorporan a los compresores de desplazamiento. El caudal mínimo de un compresor centrífugo, está limitado principalmente por el flujo de la última etapa, luego es de vital importancia tener claramente establecido el caudal en esta etapa. ^[10]

Los compresores centrífugos han tenido un gran desarrollo, en los últimos años, debido fundamentalmente al consumo total de energía por unidad de costo y por unidad de peso del sistema compresor, teniendo como función la compresión del gas natural. En estos casos el gas es acelerado por el movimiento de aspas en rápida rotación, corriente arriba dispositivos internos convierten esa energía cinética en presión a la descarga Estos compresores son los equipos adecuado para comprimir grandes volúmenes de gas, con relaciones de compresión reducidas, si esto se cumple el proceso de compresión puede llegar a ser de una alta eficiencia, lo que es de gran importancia en la industria del gas natural.

Los compresores centrífugos tienen un intervalo de condiciones de operación relativamente estrecho, que puede llegar a tener un efecto importante en la capacidad del sistema. Las condiciones de operación son determinadas en banco de pruebas. Y los resultados se plasman en la curva del compresor. Los compresores centrífugos se pueden utilizar a presiones relativamente bajas o medianas, con caudales altos y diferenciales de presión baja, estos compresores, por lo general son de alta eficiencia, la cual se expresa en términos del consumo total de energía por unidad de costo y por unidad de peso del sistema de compresión.

2.7. Proceso de compresión

Para hacer posible la conducción del gas a través de gasoductos es necesario aplicarle la presión necesaria para vencer la resistencia a la fricción. Los equipos que comunican presión al gas se denominan compresores, los cuales al comunicar presión reducen el volumen. La presión necesaria que habrá que aplicar al gas dependerá del uso que se le dará al gas. En las plantas compresoras se obtiene en Gas Natural Comprimido (GNC), el cual tiene múltiples usos. ^[10]

2.7.1. Factores que influyen en el sistema de compresión

Para la óptima instalación de un sistema de compresión integral se deben considerar los siguientes factores:

- Ubicación del Equipo de Compresión del Gas.
- Diseño del Equipo de Subsuelo para cada Pozo.
- Requerimiento de Volumen de Gas.
- Requerimiento de Presión.
- Presión de Separación y de Succión del gas.
- Ubicación del Equipo de Compresión del Gas

Considerando las pérdidas de presión por fricción, los compresores deben localizarse en el lugar más equidistante posible de cada uno de los pozos a los cuales se proyecta inyectar gas. ^[10]

2.7.2. Proceso de compresión del Gas Natural

El gas natural tiene que ser comprimido para su posterior utilización, todo esto conlleva a que el proceso de compresión del gas natural tenga mucha importancia, como por ejemplo: Disminución del volumen para su almacenamiento, facilidades en el transporte, utilización en los procesos de Inyección secundaria, transformación de una forma de energía a otra.

En el proceso de compresión del gas natural, los compresores tienen como función principal, aumentar la presión del fluido gaseoso, con el aumento de la presión son comprimidos y por ende pueden ser almacenado o confinados en recipientes de determinados volúmenes. El proceso de compresión es una parte integral de los ciclos para refrigeración y las turbinas de gas. Los compresores son máquinas que disminuyen el volumen de una determinada cantidad de gas y aumenta su presión, todo esto ocurre a través de procedimientos mecánicos. Luego el gas comprimido posee una gran energía potencial. El aumento en la energía potencial se debe a que en el proceso de compresión se elimina la presión a la cual está sometido el gas, y durante la compresión se expande rápidamente. ^[10]

El control de esta fuerza expansiva proporciona la fuerza motriz de muchas máquinas y herramientas. El proceso de compresión, como proceso es termodinámico, el cual se lleva a cabo a través de una serie de etapas. La principal función de los compresores es someter el gas a un trabajo, para así aumentar la energía total.

2.7.2.1. Descripción del proceso de compresión del Gas Natural

La compresión se refiere al aumento de energía que se logra en un fluido gaseoso por medio de un trabajo que se efectúa sobre él, los fluidos que más comúnmente se comprimen son: el aire, gas natural, componentes separados del gas natural y gases comerciales con propósitos industriales. El gas natural se somete a un proceso de compresión para elevar su nivel energético, los compresores tienen como función principal aumentar la presión del gas, por lo cual el compresor somete el gas a un trabajo de tal manera que se incremente la energía total del mismo, este incremento se manifiesta por aumentos de presión y temperatura. El proceso de compresión del gas natural se puede representar a través de un proceso termodinámico; en donde el gas con una presión P_1 , se comprime y posteriormente se descarga a los niveles de presión P_2 superiores requeridos. Este proceso puede darse en una o varias etapas. En la figura 2.7 se presenta un diagrama simplificado de un sistema de compresión.

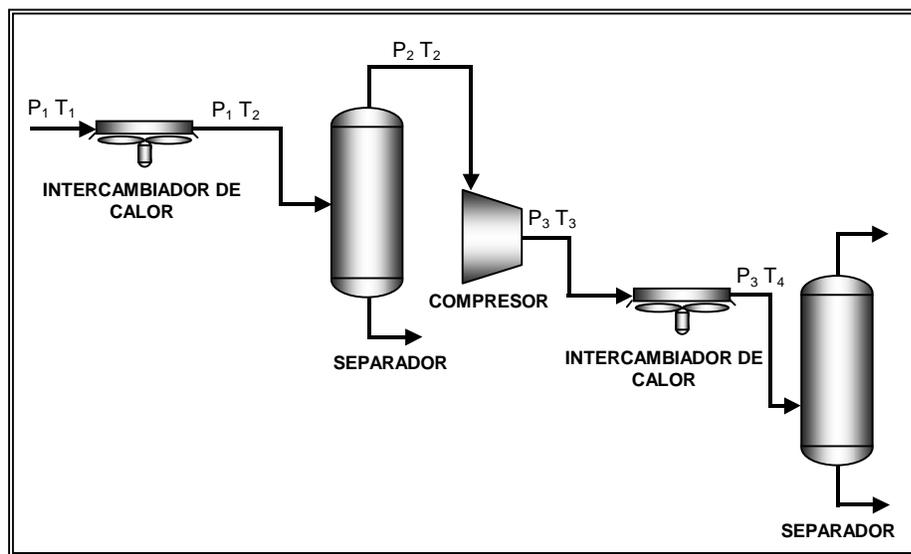


Figura N° 2.5. Diagrama simplificado de un Sistema de Compresión ^[10]

En la figura N° 2.5 se puede observar que el gas proveniente de la fuente entra a un intercambiador de calor donde se reduce la temperatura desde T_1 hasta T_2 . Producto de este descenso en la temperatura, se puede o no producir la condensación de ciertos componentes, que conforman la mezcla, por lo tanto en aquellos casos donde este proceso se produzca, es necesario instalar un separador, del cual salen típicamente dos corrientes, una de gas por el tope y una de líquido por el fondo; la corriente de gas es enviada hacia el compresor en donde se eleva la presión desde P_2 hasta P_3 , lo que origina un aumento de temperatura desde T_2 hasta T_3 ; la corriente de gas que sale del compresor a T_3 entra a un intercambiador de calor de donde sale a una temperatura menor T_4 ; esta corriente de gas, con cierto contenido de líquido, es enviada a un separador de donde salen dos corrientes, una de gas por el tope y una de líquido por el fondo; así se cuenta con el volumen de gas a las condiciones de presión y temperatura requeridas por el proceso. ^[10]

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

El estudio del desarrollo de las plantas de control de punto de rocío del Gas Natural, tiene la finalidad de recobrar los líquidos del gas natural (LGN), los cuales presentan un alto valor comercial, estas plantas se adaptan a las exigencias del mercado nacional.

La metodología utilizada para el desarrollo de los objetivos planteados son los siguientes:

3.1. Recopilación de la información existente para el diseño de una planta de control de punto de rocío

Para llevar a cabo este trabajo se realizó una recopilación de toda la información disponible referente a las características del gas natural, los diferentes procesos de refrigeración disponibles, conceptos e información básica sobre el proceso de extracción del gas natural, características de los principales equipos, operación y diseño del proceso. Con la finalidad de realizar la clasificación de toda esta información, a fin de dar la adecuada estructuración al tema planteado.

Se hará énfasis en el estudio de los procesos que permiten refrigerar la corriente de gas para obtener líquidos del gas natural (LGN) y permitir que el gas residual alcance las especificaciones para reinyección en pozos. La mayoría de esta información es manejada por las compañías que realizan estos trabajos en campo, y en consecuencia no están disponibles para todo público. Razón por la cual, la mayor cantidad de la información fue proporcionada por los ingenieros conocedores del

tema y por la visita realizada a la planta, así como también por la revisión de literaturas, informes técnicos, tesis de grado, cursos, presentaciones, entre otros. Todos de fundamental importancia para cumplir con los objetivos planteados.

3.2. Estudio de la composición presente de la corriente del fluido al controlar el punto de rocío

Finalizada la etapa anterior se llevó a cabo la recopilación de toda la información disponible referente a las características del Gas Natural, los diferentes procesos de refrigeración disponibles, conceptos e información básica sobre el proceso de extracción del Gas Natural.

Después de analizar la información suministrada de la hoja de análisis de la Compañía Wilpro Energy Services (Pigap II) ltd 06/17/09, obtuvimos la composición para realizar las premisas o bases del diseño de la planta de control de punto rocío propuesta, la cual trabaja con los siguientes parámetros que se especifican a continuación:

- La alimentación de la corriente de entrada al separador es de 1500 MMPCED de Gas Natural.
- A una temperatura de 120 °F.
- Una presión de 1200 psia.
- Se considerará la composición del Gas Natural típica del norte del estado Monagas, reportada en la hoja de análisis Wilpro que puede observarse en el Apéndice A.
- Relación C_2 / C_3 es de 0,02 en la torre deetanizadora.
- La masa molar del Gas para recompresión debe ser como máximo 19,6 Lb/Lb_mol para su entrada a los compresores.

3.3. Descripción de la variación de los parámetros dentro del sistema de control de punto de rocío

En este objetivo se describe el proceso mediante el cual una corriente de gas natural es refrigerada al punto tal de poder modificar su composición, con el fin de obtener una temperatura de rocío que permite su transporte seguro en el sistema de distribución de gas a reinyección. Se identifican y describen las variables operacionales de diseño que permiten obtener un funcionamiento adecuado a los requerimientos del sistema.

El tren de procesamiento de la planta de control de punto de rocío dispone de los siguientes equipos principales en operación:

1. Un Intercambiador de calor tubo y carcaza (Gas/Gas).
2. Un Chiller.
3. Un Separador de bajas temperaturas (LTS).
4. Una Torre Deetanizadora.

Se considera que la corriente esta deshidratada. Caso base a la Planta de Refrigeración (Base Seca) con el fin de controlar la temperatura de punto de rocío para prevenir la formación de posibles hidratos, permitiendo en el sistema el Gas a reinyección. Se envían los LGN a la Planta de Fraccionamiento de Jose.

3.3.1 Esquema de simulación de la planta de control de Punto de Rocío

1. La alimentación de nuestro caso estudio proviene de la planta PIGAP II donde se le realiza un previo tratamiento.

2. El Gas de alimentación ingresa a un separador de entrada a 120 °F y 1200 psia.
3. Se dirige a un intercambiador de calor Gas/Gas tubo y coraza, el cual disminuye su temperatura.
4. Luego, el Gas a través de un proceso de refrigeración mecánica es enfriado, donde la temperatura del enfriador deberá se ajustada a la temperatura de rocío del Gas tratado a 900 psia.
5. Los líquidos condensados en el enfriador se separan en el separador de baja temperatura (Separador-Frío), mientras el Gas es retornado al intercambiador Gas/Gas para pre-enfriar el Gas que se extrae en el separador.
6. Los líquidos provenientes del separador de baja temperatura (Separador-Frío) se mezclan con los provenientes del separador de entrada a la planta y se alimentan a la columna deetanizadora.
7. Estos líquidos combinados pasan a través de una válvula (VLV-100) donde se disminuye su presión hasta 435 psia, y luego son alimentados al tope de la columna.
8. La función de la columna es separar etano y componentes más pesados, la columna tiene 10 etapas ideales, las presiones de tope y fondo son 400 y 405 psia respectivamente.
9. El producto de tope de la columna deetanizadora se une con el Gas tratado y se envía al compresor (K-100) donde se incrementa la presión a 9000 psia para su reinyección al pozo.

10. Mientras que los LGN serán enviados a la Planta de Fraccionamiento Jose por su alto valor comercial.

3.4. Simulación de los equipos presentes en la planta de control de punto de rocío

La elaboración del modelo de simulación de la planta se desarrolló con la herramienta de simulación comercial Aspen Hysys versión 7.1 para simular una planta conformada por un intercambiador de calor de tubos y coraza, un Chiller conectado a un sistema de refrigeración mecánica con propano como agente refrigerante, un separador frío, una Torre Deetanizadora para estabilizar la corriente de LGN obtenida en el proceso y un compresor de gas para reinyección. El sistema de propano propuesto consistió en un sistema de una sola etapa, utilizando la temperatura necesaria en el Chiller para alcanzar la temperatura de rocío del gas residual. El programa permitió verificar la variación de los parámetros operacionales al utilizar diferentes corrientes de alimentación al sistema.

En el modelo de simulación se consideró un tren integral para una capacidad de procesamiento de 1500 MMPCED.

En este estudio la corriente del Gas Natural es un mezcla de los siguientes componentes: (C₁, C₂, C₃, i-C₄, n-C₄, i-C₅, n-C₅, C₆, N₂ y CO₂) mostrando su composición en la Tabla N° 4.1, esta mezcla se considera deshidratada (libre de agua), el proceso de deshidratación no es estudiado en este proyecto.

El paquete termodinámico utilizado en la simulación fue el de Peng Robinson (PR), éste es uno de los más utilizados en la industria para las caracterizaciones de estado del Gas Natural, arrojando excelentes resultados.

El programa de simulación permitió verificar la variación de los parámetros operacionales al utilizar diferentes corrientes de alimentación al sistema, así como también se obtuvo un dimensionamiento preliminar de los equipos requeridos en la planta.

3.5. Dimensionamiento de los equipos de ajuste de punto de rocío

El dimensionamiento se obtuvo mediante la simulación de la planta propuesta a través de un simulador comercial Hysys versión 7.1, como un dimensionamiento preliminar. El dimensionamiento se realizó para aquellos equipos relevantes involucrados en el proceso (Separador de entrada, Intercambiador de Calor de tubos y coraza Gas/Gas, Chiller, Separador Frío, Deetanizadora y Compresor), todos estos valores se observan en el Apéndice, identificados en el Apéndice C para el caso Base, en el Apéndice D para el caso Oriente Libre y en el Apéndice E para el caso Oriente Asociado.

CAPITULO IV

DESARROLLO DEL PROYECTO

4.1. Recopilación de la información existente para el diseño de una planta de control de punto de rocío

En el campo Pirital se ha diseñado una planta de control de punto de rocío, la cual tiene una capacidad instalada para comprimir un flujo de 1500 MMPED desde 1200 hasta 9000 psia.

El proyecto contempla la inyección de Gas Natural a alta presión, posee trenes idénticos de compresión que cumplen con los planes de inyección de gas en el norte del estado Monagas, permite el tratamiento de Gas e incrementa el potencial de producción de crudo.

La alimentación de la planta propuesta proviene de la planta (PIGAP II), en la cual se le realiza un acondicionamiento primario donde se deshidrata con un glicol, pasando por un proceso de deshidratación con tamices moleculares posteriormente, con la finalidad que la corriente entre a la planta de control de punto de rocío propuesta, con una cantidad mínima de agua (5 lbs H₂O/1000 ft³ de Gas).

El recobro de hidrocarburos líquidos livianos de corrientes de Gas Natural puede ir desde el control de punto de rocío a la extracción profunda de etano. Los LGN extraídos desde el fondo de la torre deetanizadora para su posterior tratamiento van a la Planta de Fraccionamiento de Jose. El grado deseado de recuperación de líquidos tiene un considerable efecto en el proceso de selección, la complejidad y el costo de la instalación de procesamiento.

4.2. Análisis de la composición presente en la corriente de flujo al controlar el punto de rocío

La composición del gas tiene un impacto importante sobre la economía en el proceso de recobro de LGN y el proceso de selección de la tecnología a utilizar. En general, un gas con mayor cantidad de hidrocarburos licuables produce una mayor cantidad de producto y por lo tanto, produce mayores ingresos. Gases con mayor riqueza implican a su vez mayores requerimientos de refrigeración, mayores superficies de intercambio de calor y mayor inversión de capital para una eficiencia de recuperación dada. Los gases más pobres requieren condiciones de proceso más severas (más bajas temperaturas) para lograr una alta eficiencia de recuperación. La riqueza de una corriente de gas se mide por los galones de líquido por cada mil pies cúbicos de Gas, o comúnmente conocido como GPM.

4.2.1. Contenido líquido del Gas (GPM)

También conocido como riqueza de un gas se refiere a la cantidad en volumen de propano y componentes más pesados que se pueden obtener de un volumen dado de Gas. Estos componentes se le deben remover al gas porque son muy valiosos y no se pueden usar como metano. Generalmente el contenido líquido de un gas se da en galones por mil pies cúbicos (GPM) y la riqueza de un gas se conoce como su GPM. Para calcular los galones, por ejemplo, de propano que se le pueden remover a 1000 pies cúbicos normales de un gas dado se hace lo siguiente: 1000 PCN de Gas equivalen a:

$$\frac{1000}{379} \text{ moles de gas}$$

Ec 4.1

en las cuales se encuentra

$$\frac{1000}{379} * Y_{C_3} \text{ moles de propano}$$

Ec 4.2

donde Y_{C_3} es la fracción molar del propano en el Gas; estos moles de propano pesan

$$\frac{1000}{379} * Y_{C_3} * MWC_3$$

Ec 4.3

donde M_{C_3} es el peso molecular del propano en lbm/lbmol; estas libras de propano llevadas a volumen ocupan

$$\frac{1000}{379} * \frac{Y_{C_3} * MWC_3}{\rho_{C_3}}$$

Ec 4.4

Donde la cantidad ρ_{C_3} es la densidad del propano a condiciones normales en lbm/gal. De igual manera se puede aplicar para encontrar los galones de los otros componentes más pesados que se pueden obtener de 1000 pies cúbicos de un Gas dado, o sea que el volumen total de componentes pesados que se puede obtener del Gas, en galones es:

$$V_T = GPM = \frac{1000}{379} \sum_{i=3} \frac{Y_i MW_i}{\rho_i}$$

Ec 4.5

Donde:

Y_i = fracción del compuesto pesado en el Gas.

MW_i, ρ_i = Peso molecular y la densidad del compuesto. (lb/gal)

ρ_{li} = densidad que tendría el hidrocarburo i en estado líquido (lbm/gal)

4.3. Descripción de la variación de los parámetros dentro del sistema de control de punto de rocío

La alimentación del caso en estudio proviene de la planta PIGAP II donde se le realiza un previo tratamiento para incrementar su potencial de producción de crudo, el proyecto PIGAP, contempla la inyección de Gas Natural a alta presión. En tal sentido, PIGAP posee trenes idénticos de compresión que cumplen con los planes de inyección de gas en el norte de Monagas.

La planta diseñada involucra cuatro procesos principales:

- Ciclo de refrigeración con propano.
- Sistema de recuperación de líquidos condensados.
- Destilación Multicomponentes (Columna Deetanizadora).
- Sistema de compresión para inyección de Gas.

A continuación se presenta una descripción general del proceso correspondiente al diseño de la Planta de Refrigeración.

La alimentación a la planta ingresa a un separador de entrada (Separador-Entrada) a 120°F y 1200 psia, en él se separan los líquidos que ingresan a la planta y son alimentados a la columna deetanizadora. El Gas del separador es enfriado por un intercambiador de calor (Gas/Gas) y un enfriador de propano (Chiller). La

temperatura del enfriador deberá ser ajustada a la temperatura de rocío del Gas tratado a 900 psia. Los líquidos condensados en el enfriador se separan en el separador de baja temperatura (Separador-Frío), mientras el Gas es retornado al intercambiador Gas/Gas para pre-enfriar la alimentación. Los líquidos provenientes del separador de baja temperatura (Separador-Frío) se mezclan con los provenientes del separador de entrada a la planta y se alimentan a la columna deetanizadora. Estos líquidos combinados pasan a través de una válvula (VLV-100) donde se disminuye su presión hasta 435 psia, luego son alimentados al tope de la columna. La función de la columna es separar etano y componentes más pesados. La columna tiene 10 etapas ideales y las presiones de tope y fondo son 400 y 405 psia respectivamente.

El producto de tope de la columna deetanizadora se une con el Gas tratado y se envía al compresor (K-100) donde se incrementa la presión a 9000 psia para su reinyección al pozo y los líquido del Gas Natural son enviados al Complejo de Fraccionamiento Jose para sus diversos usos.

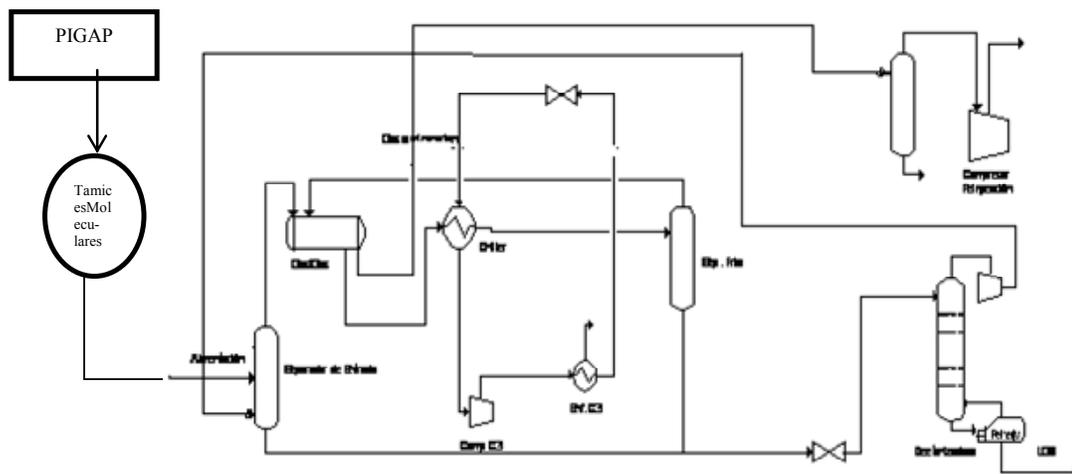


Fig. N° 4.1. Diagrama del tren de procesamiento de la planta de control de Punto de Rocío

4.3.1. Ciclo de refrigeración con propano

El enfriamiento del Gas se realiza por medio de un sistema de refrigeración mecánica, el cual emplea propano puro como medio refrigerante.

El propano líquido, a su paso por el “Chiller”, experimenta un cambio de fase, producto del intercambio de calor con el Gas del proceso. El propano abandona el “Chiller” como vapor saturado. Seguidamente, el propano se comprime para posteriormente ingresar al enfriador E-103, a su temperatura de burbuja. El propano líquido pasa a continuación a la válvula VLV-101, donde se reduce la presión del propano hasta 14,7 psia. Por efecto de esta expansión, el propano se enfría para luego ser enviado al “Chiller”, a fin de iniciar nuevamente el ciclo de refrigeración.

El diagrama del ciclo se muestra a continuación:

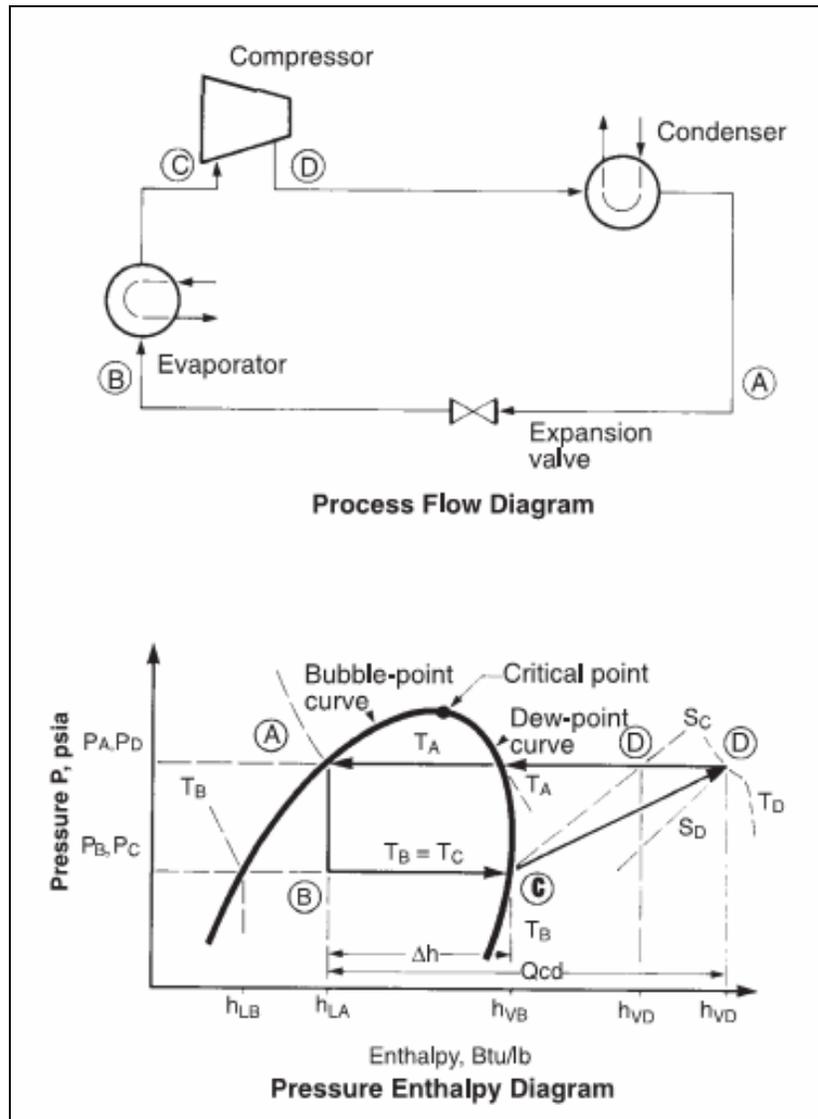


Figura N° 4.2. Diagrama de flujo de proceso y diagrama p-h para el propano

4.3.2. Sistema de recuperación de líquidos condensados

En la etapa de recuperación de líquidos condensados se remueven los hidrocarburos más pesados presentes en la corriente del Gas Natural mediante una serie de etapas de enfriamiento y separación. El proceso puede ser utilizado para alto

recobro de propano, y en el caso de los gases ricos, para recuperación de cantidades razonables de etano. Los líquidos a recuperar pasan por el fondo de la torre.

Considerando que el sistema diseñado contempla altas presiones en el separador y recobro limitado a C_3+ , entonces se esperan altas tasas de reciclo/compresor, lo que conlleva a mayor potencia en el compresor, mayor carga de refrigeración, mayor calor en el fraccionador y equipos más grandes.

4.3.3. Destilación multicomponentes (columna Deetanizadora)

El sistema de fraccionamiento es usado para separar una mezcla en productos individuales de salida. El fraccionamiento es posible cuando dos productos tienen diferentes puntos de ebullición. La operación consiste en que al introducir una mezcla de hidrocarburos, los componentes que tengan menor punto de ebullición (más livianos) se vaporizan primeramente y tienden a subir y los componentes de punto de ebullición más alto (más pesados) se quedan en el fondo.

Los métodos de cálculo en destilación multicomponente pueden dividirse en dos categorías generales que atienden al tipo de problema con el que se trabaja. Así se habla de métodos de operación (simulación) cuando se requiere encontrar la separación que se produce en una columna con un número de pisos predeterminado y en unas condiciones dadas, y por otro lado, de los métodos de diseño que tratan de determinar la mejor configuración de la columna para cumplir con unas especificaciones de separación dadas.

El enfoque en ambos tipos de planteamiento es muy distinto, mientras que para los problemas de operación se pueden utilizar métodos aproximados o métodos rigurosos de cualquier tipo, tanto en estado estacionario como en estado no

estacionario, por el contrario, para los problemas de diseño de columnas de rectificación multicomponente la situación no está tan bien definida.

Para el diseño se especifican las presiones de tope y fondo de la columna, así como también la relación C_2/C_3 en el rehervidor.

4.3.4 Sistema de compresión para inyección de Gas

Una de las limitantes en el proceso de compresión del Gas es la temperatura a menudo para dar protección contra la polimerización en las plantas de olefinas y butadieno. A temperaturas mayores a 450-500°F, el límite mecánico aproximado, se empiezan a presentar problemas de crecimiento de los sellos de la carcasa. Una temperatura elevada requiere una máquina especial y más costosa. La mayor parte de las aplicaciones de etapas múltiples se diseñan para permanecer por debajo de 300°F.

Se puede usar el enfriamiento interno con el fin de mantener las temperaturas deseadas en las aplicaciones de relaciones totales elevadas de compresión. Éste se puede realizar entre etapas en una sola carcasa del compresor o bien, entre carcasas en serie. A veces, los aspectos económicos, en lugar de un límite de temperatura, determinan el enfriamiento interno. Para muchas aplicaciones la relación de compresión a través de la carcasa irá de 3,5 a 4,0.

Para comprimir el Gas que sale de la planta de refrigeración de 1200 a 9000 psia es posible utilizar un compresor centrífugo comercial del catálogo de la empresa General Electric Oil & Gas, el cual cumple con las especificaciones que se muestran en el Apéndice C para el caso Base, Apéndice D para el caso Oriente Libre y en el Apéndice E para el caso Oriente Asociado.

4.4 Bases y premisas generales de la planta propuesta de control de punto de rocío

Las bases y premisas generales sobre los cuales se fundamenta la simulación de la Planta de Refrigeración, son las siguientes:

4.4.1 Paquete de simulación

- Empleo de la herramienta de simulación “Aspen Hysys 7.1”, perteneciente a la firma comercial “AspenTech”.
- Modelo termodinámico: Peng Robinson.

4.4.2 Alimentación a la planta de control de Punto de Rocío

- Caracterización: Se considerará la composición del Gas Natural típica del norte de Monagas reportada en la hoja de análisis suministrada por la compañía Wilpro Energy Services (Pigap II) Ltd. de fecha 17 de Junio de 2009, la cual se muestra en la Tabla N° 4.1.
- Flujo volumétrico: 1.500 MMPCED.
- Condiciones de operación: T= 120 °F; P= 1200 psig. Se considera que la corriente está deshidratada a 5 lbs de agua por cada 1000 pies³ de Gas (previo a la alimentación mediante un sistema de tamices moleculares)

Tabla N° 4.1. Caracterización del Gas de alimentación, caso base a planta de refrigeración (base seca) (compañía Wilpro Energy Services (Pigap II) Ltd. de fecha 17 de Junio de 2009)

COMPONENTES	PORCENTAJE MOLAR
C ₁	80,9870
C ₂	7,3574
C ₃	2,6931
i-C ₄	0,5852
n-C ₄	0,7637
i-C ₅	0,3202
n-C ₅	0,2476
C ₆	0,4795
CO ₂	6,4858
N ₂	0,0806
Total	100,0000
<i>GPM</i>	<i>1,5741</i>

Adicionalmente, se simulará la planta con las dos composiciones típicas del Gas Natural pertenecientes al área de Oriente, tanto libre como asociado la cual se muestra en la siguiente tabla:

Tabla N° 4.2. Composiciones adicionales de la zona Oriente de Venezuela para la simulación del modelo de planta propuesto (Obtenidas del libro de Marcías Martínez)

COMPONENTE	ORIENTE (LIBRE) Porcentaje Molar	ORIENTE (ASOCIADO) Porcentaje Molar
C ₁	76,9	75,1
C ₂	5,8	8,0
C ₃	2,5	4,6
i-C ₄	0,5	0,9
n-C ₄	0,6	1,1
i-C ₅	0,3	0,3
n-C ₅	0,2	0,3
C ₆	0,2	0,2
C ₇₊	0,4	0,2
CO ₂	12,5	9,2
N ₂	0,1	0,1
Total	100,0	100,0
GPM	1,5	2,3

4.4.1. Bases de simulación - Equipos principales

A continuación se mencionan las especificaciones generales de los equipos principales empleadas como premisas en el desarrollo de las simulaciones de los casos de estudio.

➤ *Sistema de recuperación de líquidos:*

Tabla N° 4.3. Premisas generales de la simulación, equipos principales de la planta de control de Punto de Rocío (Recuperación de Líquidos)

EQUIPO	DESCRIPCIÓN
Separador de entrada	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $\Delta P = 0$ psia ➤ Adiabático
Intercambiador Gas-Gas	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ΔP lado Tubos y Carcasa = 0 psia ➤ ΔT Gas a compresión y Vapores del Separador = 10°F
“Chiller”	<ul style="list-style-type: none"> ➤ ΔP Carcasa = 0,5 psia ➤ ΔP Tubos = 0,1 psia
Separador Frío	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $\Delta P = 0$ psi ➤ Adiabático
Válvula Joule Thomson VLV-100	<ul style="list-style-type: none"> ➤ $\Delta P = 754,6$ psi
Columna Deetanizadora	<ul style="list-style-type: none"> ➤ N° de etapas = 10 platos reales + rehervidor ➤ Presión de tope = 400 psia ➤ Presión de fondo = 405 psia ➤ Relación C_2/C_3 en el rehervidor = 0,018

➤ *Sistema de refrigeración con propano:*

Tabla N° 4.4. Premisas generales de la simulación, equipos principales de la planta de control de Punto de Rocío (Refrigeración con Propano)

EQUIPO	DESCRIPCIÓN
Compresor de Propano K-104	➤ Eficiencia adiabática = 0,75
Enfriador de propano	➤ $\Delta P = 0$ psi
Válvula de expansión VLV-101	➤ $\Delta P = 228,5$ psi

➤ *Sistema de compresión para inyección:*

Tabla N° 4.5. Premisas generales de la simulación, equipos principales de la planta de control de Punto de Rocío (Compresión para inyección)

EQUIPO	DESCRIPCIÓN
Compresor K-100	Presión de descarga = 9000 psig Eficiencia adiabática = 0,75

4.4.3 Principales premisas de Simulación

4.4.3.1 Sistema de recuperación de líquidos

- Se considera el Gas de alimentación como Gas Natural deshidratado.
- Se utiliza la herramienta “BALANCE” para identificar la temperatura de rocío (fracción vapor = 1,0) a 900 psig de presión.

- Se utiliza la herramienta “AJUSTE” para fijar la temperatura de salida del Chiller a la temperatura de rocío de 900 psig calculada en el apartado anterior.

4.4.3.2 Sistema de Refrigeración

- Se considera el fluido refrigerante como propano puro.
- El propano entra al enfriador como líquido saturado (fracción vapor = 0,0) y 120°F.
- El propano abandona el Chiller en su punto de rocío (fracción vapor = 1,0)

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. Recopilación de la información existente para el diseño de una planta de control de punto de rocío

A través de la revisión bibliográfica de diferentes tesis se pudo observar que los parámetros de alimentación a la planta influyen en el control de Punto de Rocío debido a la composición del Gas Natural, se puede controlar el Punto de Rocío utilizando equipos de refrigeración mecánica donde se ajustan las condiciones de operación para llegar a obtener un resultado satisfactorio.

5.2. Estudio de la composición presente de la corriente del fluido al controlar el Punto de Rocío

Para cada alimentación se siguió el esquema mostrado en el capítulo anterior y se obtuvieron diferentes resultados, de los cuales se seleccionaron aquellos que fueran de utilidad a la hora de analizar el comportamiento del sistema planteado, conforme a las premisas de simulación establecidas en el capítulo anterior. Para información adicional de los datos obtenidos se incluye en los Apéndices C, D y E los reportes detallados de las simulaciones realizadas para los tres casos de estudio, así como también el dimensionamiento de los equipos principales de la planta.

Se muestra a continuación una tabla resumen con los valores más importantes para la realización del análisis del comportamiento de la planta.

Tabla N° 5.1. Parámetros operacionales de la planta a ser analizados para cada caso de alimentación presentado

PARÁMETRO	UNIDAD	CASO		
		Base	Oriente (Libre)	Oriente (Asociado)
Flujo volumétrico LGN	BPD	17.869,57	22.028,00	39.060,09
Flujo total Gas a reinyección	MMPCED	1.978,25	1.974,24	1.948,97
Masa molar Gas reinyección	lb/lbmol	19,34	21,66	21,59
T de rocío Gas tratado @ 900 psig	°F	25,00	31,97	26,43
T del Gas a la salida del Chiller	°F	9,28	3,99	3,93
Flujo másico de propano refrigerante	lb/hr	687.128,34	852.162,20	1.415.242,32
Potencia compresor propano	hp	20.608,11	25.557,75	42.445,44
Potencia compresor gas a reinyección	hp	300.619,37	291.930,20	287.032,47
Σ De la potencia del compresor Propano y compresor Gas a reinyección	hp	321.227,71	317.487,95	329.477,91
Calor en el rehervidor	BTU/hr	40,53E+06	54,37E+06	94,12E+06
Intercambiador Gas/Gas	BTU/hr	9.931E-008	1,043E-006	6,455E-007

Al analizar los datos obtenidos se puede observar cómo a medida que aumenta el GPM de la corriente, aumenta la cantidad de LGN producido. Por otra parte, el flujo total de Gas a inyección varía en casi 30 MMPCED entre la corriente de Gas Oriente asociado y las corrientes Gas Oriente libre y el caso base, lo que es de esperarse ya que al convertir mayor cantidad de Gas en líquidos disminuye el volumen de Gas residual.

Por otra parte, puede verse como la masa molar del Gas a inyección (19,34) del caso base cumple con la premisa establecida de no ser mayor a 19,6 lb/lbmol. No obstante los casos Oriente libre y asociado son un 10,53% y 10,13% mayores a ese límite. Esto es debido a que existe un aumento en el volumen de la corriente de Gas de tope de la columna deetanizadora, que posee una masa molar mayor por presentar mayor contenido de etano, por consiguiente es mezclada con la del Gas tratado en el sistema de refrigeración mecánica, que es principalmente metano.

Al observar las temperaturas de rocío a 900 psia de presión, puede verse que aunque exista la tendencia a asociar un contenido de líquido mayor a una temperatura de rocío alta, el análisis definitivo que permite conocer este parámetro es el diagrama de fases de la corriente, como puede verse en la Figura N° 5.2. Debe tomarse en cuenta el efecto que tiene considerar para las corrientes luego de procesamiento en los casos Oriente Libre y Asociado la presencia del componente C_{7+} , el cual no está en la cromatografía de la corriente del caso base, así como también la más alta cantidad de CO_2 de la corriente Oriente Libre que hace que la envolvente sea más amplia, lo que indica la formación de condensados a la presión fijada a mayor temperatura que la corriente de Oriente asociado que presenta un GPM mayor.

5.3. Descripción de la variación de los parámetros dentro del sistema de control de Punto de Rocío

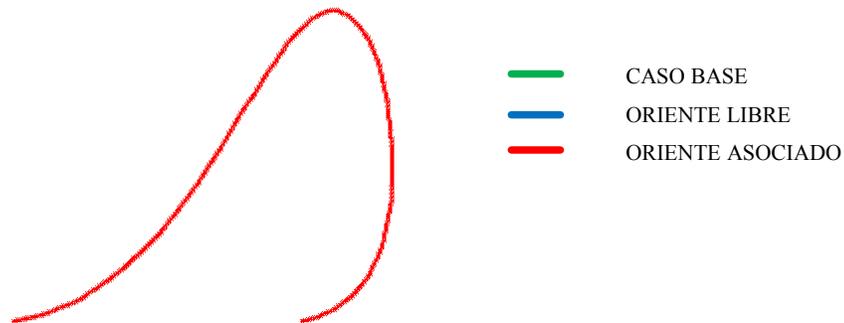


Figura N° 5.1. Diagramas de fase presión – temperatura para las corrientes de Gas procesado para los diferentes casos de estudio

En el ciclo de refrigeración con propano, el cual fue simulado considerando la mínima temperatura que puede alcanzarse con este refrigerante para este proceso (- 43 °F) puede observarse que al aumentar el GPM de la corriente de alimentación, se requiere de un mayor flujo de refrigerante y por ende, un mayor requerimiento de potencia en el compresor de este subsistema, para poder alcanzar los requerimientos del proceso definidos por la temperatura de rocío del Gas tratado a 900 psia de presión.

Usando el mismo criterio puede explicarse el comportamiento del rehervidor de la columna deetanizadora, ya que al obtenerse mayor cantidad de líquidos, se requiere mayor cantidad de calor para evaporar la corriente, a fin de obtener la relación etano/propano de fondo.

Por último, puede observarse que el compresor de reinyección requeriría prácticamente de la misma energía para todos los casos.

5.4. Simulación de los equipos presentes en la planta de control de Punto de Rocío

La simulación del sistema puede verse en el diagrama de flujo de proceso siguiente:

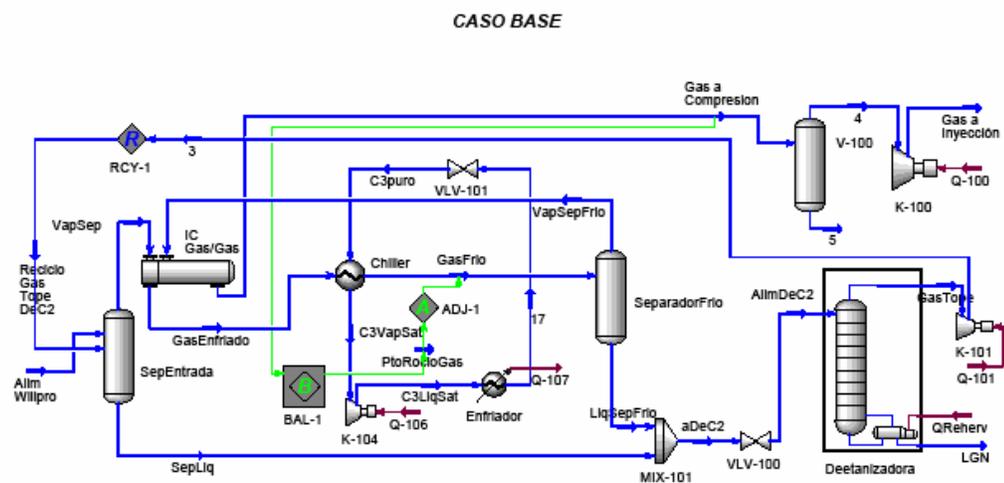


Figura N° 5.2. Simulación

Para los tres casos estudiados se siguió el esquema mostrado en la Figura 5.2 y se obtuvieron diferentes resultados, de los cuales se seleccionaron aquellos que fueran de utilidad a la hora de analizar el comportamiento del sistema planteado, conforme a las premisas de simulación establecidas en el capítulo anterior.

5.5. Dimensionamiento de los equipos de ajuste de Punto de Rocío

El dimensionamiento de los equipos de la planta de control de Punto de Rocío cumple características estándar dependiendo de las condiciones de operación, a través de la herramienta Hysys versión 7.1 se pudo obtener un aproximado del tamaño de cada uno de los equipos que conformaron la planta de control de punto de rocío propuesta.

Hysys es un programa que aporta facilidad por su mínimo nivel de complejidad a la hora del manejo de la herramienta en cuanto a diseño, acortando el tiempo de dimensionamiento; este software está certificado bajo licencia de Aspen Tech.

Para información adicional de los datos obtenidos se incluye en los Apéndices C, D y E los reportes detallados de las simulaciones realizadas para los tres casos de estudio, así como también el dimensionamiento de los equipos principales que conforman la planta de control de Punto de Rocío propuesta.

CONCLUSIONES

1. Las premisas establecidas para el diseño de control de punto de rocío se ajustó de manera satisfactoria a la propuesta realizada.
2. La mayor recuperación de líquidos condensados se obtuvo de la corriente Oriente Asociados con un flujo volumétrico de 39.060,09 BPD.
3. Se requiere mayor cantidad de calor en el rehervidor para evaporar la corriente de Oriente asociado y mantener la relación C2/C3 de fondo consumiéndose así $94,12E+06$ BTU/ hr.
4. Al convertir mayor cantidad de Gas en líquidos disminuye el volumen de Gas residual.
5. La masa molar del Gas a inyección en el caso Oriente Libre y Asociado supera en un 10,53 % y un 10,13 % respectivamente el límite establecido de 19,6 lb/lbmol.
6. La temperatura de rocío de Gas tratado se ajustó de 50.27 °F a 10.15 °F para caso base.
7. En la deetanizadora se obtiene un flujo de etano de 14.450.745 BND con una composición de 0.074358 fracción mol y 167.674,8 BND con una composición de 0.004930 fracción mol por tope y fondo respectivamente.
8. La potencia de los compresores a reinyección es mayor para el caso de Base con un valor de 300.619,37 Hp.

RECOMENDACIONES

1. Monitorear las plantas de control de punto de rocío con la finalidad de que se mantengan las temperaturas en el rango permisible evitando la formación de hidratos y un aumento en los costos de procesos.
2. Se propone evaluar la rentabilidad económica con respecto a los LGN recuperado para un horizonte de 20 años, ya que es un impacto importante sobre la economía del país.
3. Una de las limitantes en el proceso de compresión del Gas es la temperatura para dar protección contra el límite mecánico, por eso se recomienda trabajar con temperaturas inferiores a 300° F.
4. Tener muy claro los rangos de las variables a utilizar en el simulado para no obtener resultados erróneos.
5. Realizar una tesis donde se hagan los cálculos manuales del dimensionamiento de los equipos involucrados en esta.
6. Se exhorta a utilizar la herramienta de ajuste y balance para fijar e identificar respectivamente temperaturas de rocío.

BIBLIOGRAFÍA

1. **SÁNCHEZ, C y Barrios M. “Evaluación del efecto de la humedad y el punto de rocío de hidrocarburos en el transporte y almacenamiento de gas natural libre y asociado en (2009).**
2. **MARTÍNEZ, M. “Ingeniería de gas, principios y aplicaciones”, Séptima edición, Febrero de 2005.**
3. **Gas Processors Suppliers Association (GPSA), Engineering data Book, 1998.**
4. **MARTÍNEZ, M. “Ingeniería de Gas, Principios y Aplicaciones. Deshidratación del Gas Natural”. (1995). Consultores S.R.L. Maracaibo – Venezuela.**
5. **CAMPBELL, John M (1988); “Gas Conditioning and Processing”. Volumen 1: The Basic Principles. Campbell petroleum series. USA.**
6. **MARTINEZ, Macías (1994); “El diagrama de fases, un lenguaje en la industria del gas natural”. ULA. Mérida.**
7. **MARTÍNEZ, M. 1995. “Endulzamiento del Gas Natural”. Ingenieros Consultores, S.R.L. Maracaibo (Estado Zulia), Venezuela.**
8. **SMITH J., Van Ness H.1989, "Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química", 4º Ed., Ed. McGraw-Hill, México.**

9. **LIZARRAGA**; J.M. y otros.1984 “**Termodinámica Aplicada**”, segunda edición, J. M. Universidad de la Rioja, España.

10. **BALZHISER R.**, Samuels M., Eliassen J., 1974, "**Termodinámica Química para Ingenieros**", Ed. Prentice Hall, España.

11. **WARREN L**, McCabe Julian C y Smith Peter Harriot, “**Operaciones Unitarias en Ingeniería Química**”, 4º Edición, Editorial Mc Graw Hill, Impreso en España.

**METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y
ASCENSO**

TITULO	DISEÑO DE UNA PLANTA DE CONTROL DE PUNTO DE ROCÍO UBICADA EN PIRITAL EN EL NORTE DEL ESTADO MONAGAS
SUBTITULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CDIGO CULAC / E MAIL
García R., Jeixy Del Carmen	CVLAC: C.I: 13.052.909 E MAIL: jeixycgarciar@hotmail.com
Tineo G., Joarquis Del Valle	CVLAC: C.I: 12.578.966 E MAIL: joarquistineo@hotmail.com

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Gas natural

Punto de rocío

Planta de control de punto de rocío

Refrigeración Mecánica

Deetanizadora

Recompresión de gas

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	INGENIERÍA QUÍMICA

RESUMEN (ABSTRACT):

A fin de reducir la condensación de hidrocarburos y vapores de agua se diseñó una planta de control de punto de rocío, ubicada aguas abajo de la planta PIGAP en la estación de flujo del campo Pirital al norte del estado Monagas. Esta planta tendrá una capacidad de manejar un volumen de Gas de unos 1500 MMPCND, la cual está compuesta por un tren de procesamiento que contiene: un intercambiador de calor Gas/Gas de tubo y coraza, un chiller y un separador de bajas temperaturas (LTS). Esta planta controlará el punto de rocío del Gas Natural enfriando el mismo a temperaturas más bajas que las existentes antes de entrar a los compresores para su respectiva recuperación secundaria. Además, contiene una deetanizadora para recuperar los líquidos del Gas Natural que serán enviados al Complejo de Fraccionamiento Jose para sus diversos usos. En este caso las premisas establecidas para el diseño de control de punto de rocío se ajustaron de manera satisfactoria a la propuesta realizada, disminuyendo el gas tratado a una temperatura de rocío de 50.27 °F a 10.15 °F para el caso base. Las composiciones del Oriente asociado y el Oriente libre no cumplieron con las condiciones de operación planteadas para de control de punto de rocío diseñada. Se utilizó la herramienta Hysys 7.1 para realizar la simulación del proceso.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**CONTRIBUIDORES:**

APELLIDOS Y NOMRES	ROL/CÓDIGO CVLAC/ E_MAIL				
Nelson Ferreira	ROL	CA	AS	TU	JU
				X	
	CVLAC				
	E_MAIL	nelfr@gmail.com			
Rafael Barrueta	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
					X
	CVLAC:				
Luis Moreno	E_MAIL	barruetaraf@cantv.net			
	E_MAIL				
	ROL	CA	AS	TU	JU
					X
	CVLAC:				
	E_MAIL	morenoluis@cantv.net			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2010	04	16
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE: SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
MONOGRAFÍA. Diseño de una planta de control de punto de rocío.doc	Aplication / msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K
L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z. 0
1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pre – Grado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente – Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO:**DERECHOS:**

De acuerdo con el artículo 41 del reglamento de trabajos de grado de la Universidad de Oriente: “Los trabajos de grado son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y solo podrán ser utilizados a otros fines, con el consentimiento de Consejo de Núcleo respectivo, quien deberá participar al Consejo Universitario, para su autorización”

García R., Jeixy Del Carmen

AUTOR

Tineo G., Joarquis Del Valle

AUTOR

Nelson Ferreira

TUTOR

Rafael Barrueta

JURADO

Luis Moreno

JURADO

Salas, Yraima

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS