

**PROPUESTA DE VIABILIDAD PARA EL MEJORAMIENTO DE LA PLANTA DE  
GAS APIAY DE ECOPETROL S.A.**

**JAVIER MAURICIO CASTIBLANCO HERRERA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA DE GAS  
BUCARAMANGA**

**2011**

**PROPUESTA DE VIABILIDAD PARA EL MEJORAMIENTO DE LA PLANTA DE  
GAS APIAY DE ECOPETROL S.A.**

**JAVIER MAURICIO CASTIBLANCO HERRERA**

**Monografía para obtener el Título de Especialista en Gerencia de  
Hidrocarburos**

**Director:**

**M.Sc. Nicolás Santos Santos**

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

**2011**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	15
1. JUSTIFICACIÓN.....	17
2. OBJETIVOS.....	19
2.1 OBJETIVOS GENERALES.....	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
3. MARCO TEÓRICO.....	21
4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	28
5. DATOS EMPLEADOS – BASES DE CÁLCULO.....	30
5.1 INFORMACIÓN DE PRODUCCIÓN ACTUAL.....	30
5.2 COMPOSICIÓN DEL GAS.....	30
5.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	31
5.4 PERFIL TOPOGRÁFICO LÍNEA CUIAGUA – APIAY.....	32
5.5 CAUDALES.....	34
5.6 CONDICIONES DEL GAS DE VENTA.....	34
5.7 CONDICIONES DEL LUGAR.....	34

6. CÁLCULOS .....	37
6.1 USO DE SÍLICA GEL COMO DESECANTE.....	37
6.1.1 Cálculo del tiempo de secado .....	37
6.1.2 Cálculos de regeneración.....	44
6.2 USO DE ETILEN GLICOL COMO INHIBIDOR DE FORMACIÓN DE HIDRATOS .....	52
6.3 LÍNEA PARA ENVÍO DE GAS DE CUPIAGUA A APIAY.....	58
7. RESULTADOS .....	62
7.1 USO DE SÍLICA GEL.....	62
7.2 USO DE ETILEN GLICOL COMO INHIBIDOR DE FORMACIÓN DE HIDRATOS .....	63
7.3 COMPLEMENTO DE CARGA CON GAS DE CUPIAGUA .....	64
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	65
9. CONCLUSIONES.....	69
BIBLIOGRAFÍA .....	71

## LISTADO DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Comparación entre los tipos de desecantes sólidos más comunes .....	24
Tabla 2. Comparación entre las propiedades del etilenglicol y el metanol.....	27
Tabla 3. Volúmenes de materia prima y productos manejados en la Planta de Gas de Apiay .....	30
Tabla 4. Composición en fracción molar de la mezcla de gas de los campos Apiay - Suria - Reforma y del gas de la CPF Cupiagua de la etapa Joule-Thompson.....	31
Tabla 5. Condiciones de entrega de gas rico Cupiagua .....	31
Tabla 6. Condiciones de operación en la Planta de Gas Apiay .....	32
Tabla 7. Perfil de elevaciones Gasoducto Cusiana – Apiay.....	33
Tabla 8. Especificaciones de calidad del gas natural.....	35
Tabla 9. Condiciones ambientales Apiay .....	36
Tabla 10. Condiciones y propiedades del gas a deshidratar .....	37
Tabla 11. Flujo másico de agua a remover .....	38
Tabla 12. Información de los lechos de secado .....	39
Tabla 13. Masa de desecantes requerida para la deshidratación.....	39

Tabla 14. Resultados del cálculo de la velocidad superficial del gas y el flux de agua.....	42
Tabla 15. Capacidad de adsorción de los desecantes - sin corrección .....	42
Tabla 16. Altura de lecho disponible para transferencia de masa y capacidad de adsorción de los desecantes corregidos.....	42
Tabla 17. Tiempos de secado de los desecantes para los distintos flujos.....	43
Tabla 18. Parámetros utilizados para determinar la energía requerida para regeneración.....	46
Tabla 19. Masa de agua adsorbida por los desecantes.....	47
Tabla 20. Calor total de regeneración requerido.....	48
Tabla 21. Condiciones de operación y propiedades del gas de regeneración.....	48
Tabla 22. Cálculo del tiempo de regeneración.....	50
Tabla 23. Carga de calor del horno de calentamiento de gas de regeneración.....	51
Tabla 24. Condiciones de operación a utilizar para el cálculo .....	52
Tabla 25. Cálculo de fracción en peso del inhibidor en corriente acuosa final mediante la Ecuación 16.....	53
Tabla 26. Cálculo de fracción en peso de metanol en corriente acuosa final mediante la Ecuación 17.....	54
Tabla 27. Flujo de agua a retirar para distintos flujos de gas.....	55
Tabla 28. Cálculo de la cantidad de inhibidor a inyectar.....	55
Tabla 29. Cálculo de las pérdidas de metanol por evaporación .....	56

Tabla 30. Propiedades del hidrocarburo líquido generado en el enfriamiento .....	56
Tabla 31. Cantidad de inhibidores requerida .....	57
Tabla 32. Criterios de diseño para dimensionamiento de la línea de envío de gas de Cupiagua a Apiay .....	58
Tabla 33. Condiciones de la corriente de llegada a Apiay .....	58
Tabla 34. Cálculo de cantidad de líquidos recuperables en corriente actual de alimentación a la Planta de Gas de Apiay .....	59
Tabla 35. Cálculo de la cantidad de líquidos recuperables al complementar la carga de alimentación a la planta de gas con 8 MMSCFD de gas de Cupiagua ...	60
Tabla 36. Comparación de cantidad de líquidos recuperables con alimentación actual y con la carga complementada en BPD .....	61
Tabla 37. Comparación económica entre el uso de sílica gel y tamiz molecular ...	62
Tabla 38. Comparación económica entre el uso de metanol y etilenglicol para la inhibición de formación de hidratos.....	63
Tabla 39. Costo de inversión para complementar la carga de gas a en comparación con la rentabilidad obtenida.....	64

## LISTADO DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Perfil de elevaciones gasoducto Cusiana-Apiay .....	33
Figura 2. Capacidad de adsorción de desecantes vs saturación relativa del gas ..	41
Figura 3. Efecto de la temperatura del gas en la capacidad de adsorción del desecante .....	41

## GLOSARIO

**APIASOL:** Nombre dado a la gasolina natural obtenida en la Planta de Gas de Apiay.

**DESHIDRATACIÓN:** Proceso utilizado en la industria del gas para remover agua del gas natural y la cual es requerida para prevenir la formación de hidratos y la condensación de agua libre en las facilidades de proceso y de transporte, para alcanzar una especificación de contenido de agua y para prevenir la corrosión.

**GAS ÁCIDO:** Gas que contiene cantidades indeseables de sulfuro de hidrógeno, mercaptanos o dióxido de carbono.

**GAS DULCE:** Gas que no contiene cantidades de sulfuro de hidrógeno, mercaptanos o dióxido de carbono superiores a las especificadas o reguladas para el gas de ventas.

**GAS NATURAL:** Mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso a condiciones atmosféricas, que en su mayor parte está constituida por metano y etano y en menor proporción por propano e hidrocarburos más pesados.

**GASOLINA NATURAL:** Mezcla de hidrocarburos líquidos obtenidos a partir del gas natural, compuesto principalmente por pentanos e hidrocarburos más pesados, aunque puede incluir algunas cantidades de butanos, dependiendo del grado de comercialidad.

**GLP:** Gas licuado de petróleo. Mezcla de propano y butano líquidos que se encuentran como gases condensables en el gas natural o disueltos en el petróleo.

**GPM:** Cantidad de líquidos potencialmente recuperables expresados como galones de líquido a 60° F, si son completamente condensados, por cada 1.000 pies cúbicos de gas.

**HIDRATOS:** En un sistema de gas natural es una combinación física de agua y otras moléculas pequeñas como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, metano y etano, para producir un sólido con apariencia similar al hielo pero con una estructura diferente al mismo. Su formación puede ocasionar taponamientos en tuberías, equipos e instrumentos.

**INHIBICIÓN DE HIDRATOS:** Proceso en el cual se utilizan sustancias para disminuir la temperatura de formación de los hidratos. Tradicionalmente se utilizan glicoles o metanol.

**MMSCFD:** Millones de pies cúbicos estándar por día, a 14,7 psia y 60°F.

**PODER CALORÍFICO BRUTO:** Máximo poder calorífico del gas, el cual supone que el agua de la combustión se condensa, por lo que se entrega todo el contenido de calor al hacer la combustión.

**PODER CALORÍFICO NETO:** Mínimo poder calorífico del gas, el cual considera que el agua de combustión sale en estado vapor con los gases de combustión, a la temperatura de la chimenea.

**PRODUCTOS BLANCOS:** Productos líquidos obtenidos del tratamiento del gas natural.

## RESUMEN

**TÍTULO:** PROPUESTA DE VIABILIDAD PARA EL MEJORAMIENTO DE LA PLANTA DE GAS APIAY DE ECOPETROL S.A.\*

**AUTOR:** JAVIER MAURICIO CASTIBLANCO HERRERA\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Deshidratación, Inhibición de hidratos, sílica gel, tamiz molecular, metanol, etilenglicol

Mediante el presente trabajo de monografía se exploran procesos alternativos al uso de metanol como inhibidor de formación de hidratos y a la utilización de Tamiz Molecular para la deshidratación de gas en la Planta de Gas Apiay de Ecopetrol S.A., específicamente el uso de etilenglicol y de sílica gel.

Se evalúa de manera conceptual la factibilidad de utilizar gas de Cupiagua como insumo para la Planta de Gas Apiay, como complemento al gas de carga actual.

Para esto se realizan cálculos termodinámicos y de balance de masa y se determinan los requerimientos, beneficios y costos de los procesos, para verificar la rentabilidad económica de realizar las modificaciones propuestas al proceso.

Se concluye que no se presenta un ahorro considerable en el costo operativo al utilizar sílica gel en lugar de tamiz molecular, aunque sí se pueden tener disminuciones al disminuir la frecuencia de regeneración del lecho, ajustándose a los caudales reales utilizados.

Por otro lado se obtiene que debido a las bajas cantidades de metanol utilizadas en la inhibición de formación de hidratos, no es rentable modificar el proceso para inyectar glicol, debido a que se debería instalar un sistema de regeneración de glicol cuyo costo de suministro no se ve compensado por el ahorro generado.

Finalmente se tiene que al complementar el gas de carga con gas de Cupiagua, se tienen unos incrementos considerables en los ingresos de la Planta de Gas de Apiay que podrían pagar la inversión requerida en menos de un año.

---

\*Proyecto de grado

\*\*Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director Nicolás Santos Santos.

## SUMMARY

**TITLE:** PROPUESTA DE VIABILIDAD PARA EL MEJORAMIENTO DE LA PLANTA DE GAS APIAY DE ECOPETROL S.A.\*

**AUTHOR:** JAVIER MAURICIO CASTIBLANCO HERRERA\*\*

**KEY WORDS:** Dehydration, Hydrate Inhibition, silica gel, molecular sieve, methanol, ethylene glycol

This monograph work is intended to explore alternative processes to methanol use as hydrate inhibitor and to molecular sieve use for gas dehydration at the Apiay Gas Plant of Ecopetrol S.A., these alternative processes are specifically using ethylene glycol and silica gel.

Feasibility to use gas from Cupiagua Field as input to Apiay Gas Plant is evaluated, as complement to current gas load.

Thermodynamic and mass balance calculations are carried out and requirements, profits and costs are estimated, in order to verify economic profitability if proposed processes modifications are implemented.

In conclusion no considerable saving on operative cost is obtained using silica gel instead of molecular sieve, however if molecular sieve keeps being used, it is possible to decrease desiccant regeneration frequency, adjusting to actual used flow what means less operative costs.

On the other hand, to modify the process to glycol injection is not profitable, because a regeneration glycol system should be purchased and installed and its supply cost is not compensated for the saving gained because of low methanol quantities used currently in hydrates inhibition,.

Finally, if gas load to Apiay Gas Plant is completed with gas from Cupiagua Field, some considerable increments on Apiay's Gas Plant incomes are obtained which could pay the required investment in no more than one year.

---

\*Degree Project

\*\*Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Director Nicolás Santos Santos.

## INTRODUCCIÓN

La Planta de Gas Apiay tiene capacidad de tratar 20 MMSCFD de gas, el cual recibe de los campos Apiay, Suria y Reforma, cuya producción ha declinado. Adicionalmente, en la Planta de Gas de Apiay se están utilizando actualmente procesos de tratamiento de inhibición de hidratos y de deshidratación de gas posiblemente más robustos de lo requerido para los productos que se desean obtener, lo cual puede estar generando mayores costos operativos de los requeridos.

Lo anterior lleva a explorar procesos que reflejen una disminución en los costos de procesamiento de gas y opciones que viabilicen la continuidad operativa de la Planta de Gas de Apiay.

Para lo anterior en el presente trabajo se realiza un estudio exploratorio en el cual se evalúan procesos alternativos a la inhibición de formación de hidratos con metanol y al uso de Tamiz Molecular para la deshidratación de gas en la Planta de Gas Apiay. Adicionalmente se evalúa de manera conceptual la factibilidad de utilizar gas de Cupiagua como insumo para la Planta de Gas Apiay, complementando la carga de gas actual.

Con base en cálculos termodinámicos, balances de masa y de fenómenos de transporte, se determinan los requerimientos de uso de glicol para la inhibición de hidratos y de sílica gel para deshidratación y se comparan con los requerimientos de metanol y tamiz molecular respectivamente, para determinar la viabilidad técnico-económica de reemplazar estos últimos.

Igualmente, se calcula el diámetro del gasoducto que se debería construir para llevar el gas de Cupiagua a la Planta de Gas de Apiay y se compara

económicamente el costo de suministro y montaje de dicho gasoducto con el incremento en los productos blancos que se puedan obtener mediante el uso de este gas.

## 1. JUSTIFICACIÓN

La Planta de Gas Apiay tiene capacidad de tratar 20 MMSCFD de gas, el cual recibe de los campos Apiay, Suria y Reforma. El gas obtenido en esta planta es utilizado para operaciones de autogeneración, levantamiento de crudo y para abastecimiento de gas al sur de Bogotá D.C. Adicionalmente se obtienen productos blancos como GLP y gasolina natural (Apiasol), los cuales actualmente tienen un valor en el mercado de \$5.666 y \$2.262 por galón, respectivamente.

Sin embargo, el gas de los campos que abastecen la planta de gas está declinando su producción, con lo cual a futuro se puede perder la oportunidad de recibir utilidades por la venta de los productos blancos que se obtienen a partir del gas y no se contaría con disponibilidad de gas para abastecer las necesidades energéticas de la Gerencia Central de Ecopetrol S.A.

Adicional a lo anterior, para los procesos y condiciones manejados en la Planta de Gas de Apiay, se pueden implementar procesos de inhibición de hidratos y de deshidratación del gas, menos robustos a los utilizados actualmente, que pueden garantizar la calidad de los productos y que pueden reflejarse en menores costos operativos.

Se utiliza metanol como agente de inhibición de hidratos, cuyo manejo requiere mayores cuidados debido a su elevada volatilidad. Este no es utilizado continuamente sino en paradas de planta, en las cuales se pueden consumir hasta 220 galones. Este es un producto que no se recupera en el proceso y que presenta un costo de adquisición de \$681.843 por cada tambor de 55 galones.

Se utiliza tamiz molecular como medio de deshidratación de gas, el cual es más costoso que otros medios que también aplican para el gas tratado en la Planta de

Gas, ya que en esta planta no se aplica criogenia, proceso en el cual sí se requiere deshidratación con tamiz molecular. La reposición de este material se realiza en promedio cada 5 años, un volumen de 4.400 galones, por un costo de \$2'282.162 cada tambor de 55 galones.

Al implementar otro agente de inhibición de hidratos como el glicol y un lecho de secado para la deshidratación del gas en la Planta de Gas, como sílica gel, se pueden reducir los costos operativos mostrados arriba.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVOS GENERALES**

1. Explorar alternativas para los procesos de inhibición de formación de hidratos y deshidratación de gas en la Planta de Gas Apiay, que reflejen una disminución en los costos de procesamiento de gas.
2. Evaluar la factibilidad de utilizar gas de Cupiagua como insumo para la Planta de Gas de Apiay, como complemento a la carga actual.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Calcular el consumo de glicol como alternativa al metanol para inhibición de formación de hidratos.
2. Comparar técnica y económicamente la alternativa de uso de glicol como inhibidor de formación de hidratos frente al uso de metanol.
3. Explorar el uso de sílica gel como alternativa al uso de tamiz molecular para la deshidratación de gas.
4. Comparar la calidad de gas en contenido de agua que se puede obtener mediante el uso de sílica gel, aprovechando la infraestructura existente en la Planta de Gas.
5. Comparar técnica y económicamente el uso de sílica gel frente al uso de tamiz molecular.
6. Calcular el diámetro de gasoducto requerido para llevar a Apiay 20 MMSCFD de gas de Cupiagua.
7. Calcular los productos blancos que se pueden obtener mediante el uso de gas de Cupiagua como insumo completando la carga de 20 MMSCFD.

8. Evaluar la rentabilidad de utilizar gas de Cupiagua como insumo para la Planta de Gas de Apiay.

### 3. MARCO TEÓRICO<sup>1</sup>

El gas natural obtenido en las operaciones de producción, contiene normalmente agua, en estado líquido o vapor, proveniente del yacimiento. Para contar con una operación segura de tratamiento y transporte de gas, es necesario reducir y controlar el contenido de agua en el gas, dentro de otras, por las siguientes razones:

- El gas natural a determinadas condiciones (las cuales son particulares de cada gas) se puede combinar con agua en estado líquido o vapor formando hidratos, los cuales pueden obstruir válvulas, accesorios e incluso tuberías.
- El agua puede condensar en la tubería, causando flujos por baches y posible erosión y corrosión.
- El vapor de agua incrementa el volumen del gas lo cual disminuye el poder calorífico del mismo.
- Las especificaciones colombianas para el gas de ventas exigen un contenido de agua máximo de 6 libras de agua por cada millón de pies cúbicos estándar de gas.<sup>2</sup>

El agua libre se puede retirar por operaciones de separación gravitacionales, sin embargo, para despojar el agua en estado vapor que se encuentra en solución en el gas natural, se requieren operaciones de deshidratación, mediante las cuales se obtiene una disminución en la temperatura de punto de rocío del gas a la cual el vapor de agua condensará.

---

<sup>1</sup> Tomado de Referencia [2] Capítulo 19, referencia [4] Sección 20 y referencia [10] Capítulo 9.

<sup>2</sup> Resolución CREG 054 de 2007. Por la cual se establece el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural – RUT.

Existen varios mecanismos de deshidratación del gas natural. Los esquemas de deshidratación más utilizados incluyen absorción con glicoles, adsorción con desecantes sólidos o refrigeración mecánica. La aplicación de uno u otro esquema dependerá principalmente de las especificaciones del gas y de los procesos subsecuentes que se tendrán en la planta, como las temperaturas de operación que se manejarán.

Los primeros dos métodos mencionados se basan en la transferencia de masa de las moléculas del agua hacia el solvente líquido (absorción con glicol) o dentro de una estructura cristalina (desecante sólido). El tercer método emplea el enfriamiento para condensar las moléculas de agua al estado líquido con una subsecuente inyección de inhibidor para prevenir la formación de hidratos.

Los glicoles son utilizados en aplicaciones donde se requieren depresiones en el punto de rocío de 60° a 120°F. De estos, el trietilenglicol es el más utilizado, debido a que cuenta con características como mayor facilidad de regeneración hasta un 98 o 99 por ciento de concentración, tiene una temperatura teórica inicial de descomposición de 404°F, las pérdidas por vaporización del mismo son menores que las presentadas por el monoetilenglicol y el dietilenglicol y su costo de inversión inicial y de operación es menor.

Las unidades de secado con desecantes sólidos son normalmente más costosas en inversión inicial y en operación que las unidades de absorción con glicol, razón por la cual su uso es limitado a aplicaciones como gases con alto contenido de H<sub>2</sub>S, requerimientos de punto de rocío de agua muy bajos, procesos con temperaturas criogénicas, entre otros.

El principio de la deshidratación mediante el uso de desecantes sólidos es llamado adsorción, mediante el cual las moléculas del componente a separar son retenidas en la superficie del agente desecante mediante fuerzas superficiales.

En el mercado se cuenta con varios desecantes sólidos disponibles para distintas aplicaciones. Para la deshidratación del gas natural, los desecantes sólidos utilizados deben contar preferiblemente con las siguientes propiedades:

- Alta capacidad de adsorción. Esto disminuye el volumen de desecante requerido, permitiendo el uso de recipientes más pequeños con bajos costos de inversión y disminuyendo el calor requerido para regeneración.
- Alta selectividad. Esto minimiza la remoción indeseable de componentes valiosos y reduce los costos operativos globales.
- Fácil regeneración. Una temperatura de regeneración relativamente baja minimiza los requerimientos globales de energía y los costos operativos.
- Proporcionar baja caída de presión del fluido a través del lecho.
- Buenas propiedades mecánicas, las cuales disminuyen el mantenimiento general al reducir la frecuencia de reemplazo y minimizando los tiempos muertos, los cuales se reflejan en pérdidas de producción.
- Económico, no corrosivo, no tóxico, inerte químicamente, alta densidad a granel y no presencia de cambios significativos en el volumen ante la adsorción y desorción del agua.

La capacidad de un desecante se expresa normalmente en masa de agua adsorbida por masa de desecante. La capacidad de adsorción dinámica de humedad de un desecante dependerá de factores como la humedad relativa del gas de entrada, el flujo de gas, la temperatura de la zona de adsorción, la granulometría del sólido desecante, el tiempo de servicio y el grado de contaminación del desecante. Existen tres términos utilizados para la capacidad de adsorción:

- Capacidad de equilibrio estática: Es la capacidad de adsorción de agua de un desecante nuevo, en equilibrio y sin flujo.

- Capacidad de equilibrio dinámica: Es la capacidad de adsorción de agua de un desecante donde hay flujo del fluido a través del desecante a una tasa específica.
- Capacidad útil: Es la capacidad de diseño que tiene en cuenta pérdidas de capacidad del desecante con el tiempo, el cual es determinado con base en la experiencia y consideraciones económicas; adicionalmente considera el hecho de que todo el lecho desecante nunca podrá ser completamente utilizado.

Como se mencionó arriba, el agente adsorbente o desecante debe cumplir con características como amplia área superficial que proporcione una alta capacidad, alta tasa de transferencia de masa, fácil y económicamente regenerable y baja resistencia al flujo.

Los desecantes de uso comercial que cumplen con las anteriores características son sílica gel, alúminas y tamices moleculares, los cuales proporcionan al gas deshidratado puntos de rocío del orden de -60°, -90 ° y -150°F, respectivamente. En la Tabla 1 se presenta una comparación de algunas propiedades y características de los tres tipos de desecante sólidos mencionados.

**Tabla 1. Comparación entre los tipos de desecantes sólidos más comunes\***

<b>Característica</b>	<b>Sílica Gel</b>	<b>Alúmina</b>	<b>Tamiz molecular</b>
Mínima humedad del gas efluente	-60°F de punto de rocío	-90°F de punto de rocío	-150°F de punto de rocío 0,1 ppmv
Variación de la capacidad de adsorción con la humedad	Alta	Media	Baja
Temperatura aproximada de regeneración	375°F	375-600°F	600°F

\* FUENTE: CAMPBELL, John. Gas Conditioning and Processing. Campbell Petroleum Series, Séptima Edición, Julio 1992. Capítulo 19; GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION. Engineering Data Book. 12<sup>va</sup> Edición, 2004. Sección 20.

Los tamices moleculares son los más efectivos, pero de acuerdo con las referencias, son normalmente varias veces más costosos que los geles y las alúminas, razón por la cual son utilizados en aplicaciones en las que los geles o las alúminas no pueden proporcionar los puntos de rocío de agua deseados.

En la planta de gas de Apiay, la temperatura más baja obtenida es de  $-50^{\circ}\text{F}$ ; de acuerdo con la información de la Tabla 1, la sílica gel puede proporcionar este requerimiento.

La formación de hidratos se puede prevenir mediante deshidratación del gas para eliminar la condensación de agua en estado líquido o sólido, o mediante la aplicación de un inhibidor de formación de hidratos, el cual disminuye la temperatura de formación del hidrato, previniendo así su formación a las condiciones de operación manejadas en el proceso en particular.

En la inhibición de formación de hidratos se inyecta algún tipo de glicol o metanol dentro de la corriente de gas de proceso donde se pueda combinar con el agua presente en dicha corriente, para disminuir la temperatura de formación del hidrato a una presión dada.

Tanto el glicol como el metanol se pueden recuperar con la corriente acuosa, regenerar y reinyectar. Para inyección continua en servicios hasta  $-40^{\circ}\text{F}$ , los glicoles ofrecen ventajas económicas frente al metanol; a temperaturas por debajo de  $-40^{\circ}\text{F}$  se utiliza normalmente metanol debido a que la viscosidad del glicol hace su separación más complicada.

El etilenglicol es el glicol más utilizado para la inhibición de formación de hidratos, debido a su costo más bajo y menor viscosidad y solubilidad en hidrocarburos.

Utilizando metanol se pueden conseguir temperaturas de congelación hasta aproximadamente  $-175^{\circ}\text{F}$ , sin embargo, puede alcanzar los  $-40^{\circ}\text{F}$  desde

concentraciones de 40 por ciento en peso. Por su parte el etilenglicol puede alcanzar estos puntos de congelación con concentraciones entre 50 y 85 por ciento en peso.

Por otro lado, el metanol está propenso a presentar mayores pérdidas en el proceso debido a que presenta una presión de vapor mucho más elevada que la del etilenglicol (a 77°F es de 120mmHg en comparación con la del etilenglicol de 0,12mmHg, mil veces mayor). Adicionalmente el metanol presenta una mayor solubilidad en los hidrocarburos líquidos que el glicol. Lo anterior hace que se requiera utilizar mayor cantidad de metanol para la inhibición de la que se requiere específicamente para tal fin, al tener en cuenta las pérdidas del mismo en el gas y en los hidrocarburos líquidos.

Las viscosidades del etilenglicol y de sus soluciones acuosas aumentan significativamente conforme la temperatura disminuye. El glicol puro puede alcanzar los 1.000 cP a aproximadamente -45°F.

Las soluciones de glicol y agua e hidrocarburos líquidos pueden emulsificar al agitarse o expandirse de una presión elevada a una presión baja, como por ejemplo en una válvula Joule-Thompson.

En la Tabla 2 se presentan comparativamente algunas de las propiedades del etilenglicol y del metanol.

**Tabla 2. Comparación entre las propiedades del etilenglicol y el metanol\***

<b>Propiedad</b>	<b>Etilenglicol</b>	<b>Metanol</b>
Punto de ebullición a 760 mmHg	387,1°F	148,1°F
Presión de vapor a 77°F (25°C)	0,12 mmHg	120 mmHg
Densidad a 77°F (25°C)	9,26 lb/gal	6,59 lb/gal
Temperatura de congelamiento	8°F	-144°F
Viscosidad a 77°F (25°C) a 140°F (60°C)	16,5 cP 4,68 cP	0,52 cP

\*FUENTE: GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION. Engineering Data Book. 12<sup>va</sup> Edición, 2004. Sección 20.

#### 4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA<sup>3</sup>

La Planta de Gas Apiay cuenta con una infraestructura que contempla los siguientes procesos para tratar un total de 20 MMSCFD de gas:

**Tren de compresores de carga:** Está conformado por tres compresores reciprocantes de tres etapas (dos en operación y uno en stand-by). Su función es subir la presión de 5 psi a 680 psi y entregar el gas al sistema de tratamiento.

**Tren de enfriamiento:** Conformado por un sistema de ventiladores de aire de tiro inducido cuya función es enfriar el gas en las inter-etapas.

**Tren de deshidratación de gas:** Está conformado por una unidad paquete que utiliza dos vasijas empacadas con tamiz molecular, cuyo funcionamiento es alternado y por ciclos: mientras en una se deshidrata el gas, en la otra se regenera el lecho utilizando para ello etano de reciclaje previamente calentado y cuya función es retirar el agua adsorbida.

**Control de punto de rocío:** Se emplea refrigeración mecánica con propano combinada con expansión Joule Thompson posterior a la refrigeración. Este proceso se realiza en una caja fría, en la cual se tiene aprovechamiento térmico de distintas corrientes para lograr el punto de rocío de hidrocarburos requerido.

**Tren de fraccionamiento:** Constituido por tres torres de destilación, que reciben los líquidos de la etapa de control de punto de rocío. La primera torre es una deetanizadora, cuyos fondos son enviados a la segunda torre donde se obtiene Apiasol como producto de fondo y por la cima GLP. De la torre deetanizadora se

---

<sup>3</sup> Tomado de Manual de Operaciones Planta de Gas Apiay, Septiembre de 2005.

obtiene una corriente intermedia que es enviada a una tercera torre en la cual se obtiene propano.

**Tren de Despacho:** Constituido por tres compresores de despacho recíprocos de dos etapas (dos en operación y uno en stand-by). Eleva la presión del gas de venta de 680 psi a 1700 psi para asegurar el despacho de gas domiciliario hacia la ciudad de Bogotá.

## 5. DATOS EMPLEADOS – BASES DE CÁLCULO

### 5.1 INFORMACIÓN DE PRODUCCIÓN ACTUAL

En la Tabla 3 se presentan los volúmenes manejados actualmente en la Planta de Gas Apiay.

**Tabla 3. Volúmenes de materia prima y productos manejados en la Planta de Gas de Apiay\***

<b>Materia prima e insumos</b>	
Carga de gas a la Planta	12 MMSCFD
Inhibidor de formación de hidratos - Metanol	220 galones/3 años
Tamiz molecular	16,66 m3/5 años
<b>Productos</b>	
Producción de gas seco	11,8 MMSCFD
Gasolina Natural - Apiasol	300 BPD
GLP	800 BPD
Condensado liviano	400 BPD
Gas seco para venta	8,2 MMSCFD

\* FUENTE: Información de Ecopetrol, Julio de 2010.

### 5.2 COMPOSICIÓN DEL GAS

En la Tabla 4 se presenta la cromatografía C6+ del gas de carga actual y del gas de Cupiagua correspondiente a la salida de gas de un separador trifásico posterior al sistema Joule-Thompson en la CPF Cupiagua.

**Tabla 4. Composición en fracción molar de la mezcla de gas de los campos Apiay - Suria - Reforma y del gas de la CPF Cupiagua de la etapa Joule-Thompson\***

<b>Componente</b>	<b>Gas de carga</b>	<b>Gas de Cupiagua</b>
Nitrógeno	0,0194	0,0002
CO2	0,0327	0,0371
Metano	0,6312	0,1874
Etano	0,1402	0,1947
Propano	0,0649	0,2457
i-Butano	0,0182	0,0931
n-Butano	0,0282	0,1222
i-Pentano	0,0262	0,0524
n-Pentano	0,0268	0,0495
n-Hexano+	0,0122	0,0177
Total	1,0000	1,0000

\* FUENTE: Información de Ecopetrol, Mayo de 2010.

### **5.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN**

En la Tabla 5 se muestran las condiciones de temperatura y presión del gas rico Cupiagua a la cual se entregaría para ser enviado a Apiay. En la Tabla 6 se presentan las condiciones de operación, temperatura y presión, en las principales etapas de procesamiento de gas en la Planta de Gas de Apiay.

**Tabla 5. Condiciones de entrega de gas rico Cupiagua\***

Presión	600 psig
Temperatura	69 °F

\* FUENTE: Información de Ecopetrol, Mayo de 2010.

**Tabla 6. Condiciones de operación en la Planta de Gas Apiay\***

<b>Etapa</b>	<b>Descripción</b>	<b>Temperatura (°F)</b>	<b>Presión (psig)</b>
Compresores de carga	Succión primera etapa – carga a la Planta	100	5
	Descarga primera etapa	232	70
	Descarga segunda etapa	250	300
	Descarga tercera etapa	183	660
Deshidratación	Gas entrada	115	660
	Gas deshidratado	110	640
	Gas de regeneración	550	-
Refrigeración y ajuste de punto de Rocío	Propano refrigerante	-40	-
	Gas refrigerado	-18	630
	Gas seco	105	620
	Condensados expandidos – Joule-Thompson	-50	380
	Condensados a fraccionamiento	70	370
Fraccionamiento	Tope torre deetanizadora	-10	360
	Fondo torre deetanizadora	218	360
	Fondo torre depropanizadora	56	90
	Tope torre debutanizadora	150	180
	Fondo torre debutanizadora	285	180
Compresores de venta	Succión		620
	Descarga – Gas de ventas		2010

\*FUENTE: Manual de Operaciones Planta de Gas Apiay, Septiembre de 2005.

#### **5.4 PERFIL TOPOGRÁFICO LÍNEA CUIAGUA - APIAY**

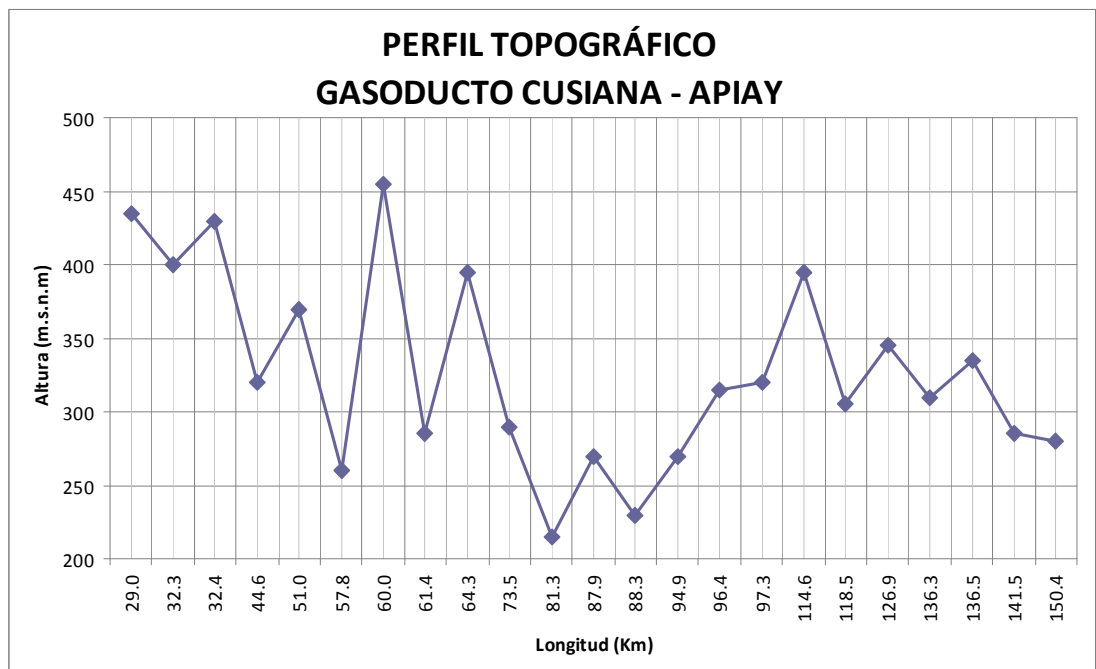
Para el desarrollo de la simulación hidráulica del envío de gas del CPF Cupiyagua a la Planta de Gas Apiay, se tendrá en cuenta el perfil de elevaciones del gasoducto que lleva el gas de Cusiana a Apiay, el cual se presenta en la Tabla 7 y la Figura 1.

**Tabla 7. Perfil de elevaciones Gasoducto Cusiana – Apiay\***

ABSCISADO	ALTURA (m.s.n.m)	ABSCISADO	ALTURA (m.s.n.m)
K29+000	435	K87+875	270
K32+250	400	K94+875	230
K32+375	430	K96+375	270
K44+625	320	K97+250	315
K51+000	370	K114+625	320
K57+750	260	K118+500	395
K60+000	455	K126+875	305
K61+375	285	K136+250	345
K64+250	395	K136+500	310
K73+500	290	K141+500	335
K81+250	215	K150+368	285

\* FUENTE: Información de Ecopetrol, Mayo de 2010.

**Figura 1. Perfil de elevaciones gasoducto Cusiana-Apiay\***



\* FUENTE: Información de Ecopetrol, Mayo de 2010.

## **5.5 CAUDALES**

Se tienen los siguientes casos de caudales a utilizar en los distintos cálculos:

- Flujo a manejar en la línea de transferencia de gas de Cupiagua a la Planta de Gas Apiay. La línea se dimensiona para manejar un caudal correspondiente a la capacidad de gas de la PGA de 20 MMSCFD.
- Flujo de Gas a ingresar en la PGA. Considerando que la producción de los campos de Apiay, Suria y Reforma decline hasta los 12 MMSCFD, se evalúa el incremento en la producción de GLP, Apiasol y condensados de la Planta de Gas de Apiay completando los 20 MMSCFD de carga, es decir, 8 MMSCFD adicionales de Cupiagua.
- Para la evaluación del desecante a utilizar en la deshidratación de gas, se evaluarán los casos de 8, 12 y 20 MMSCFD de gas de carga.

## **5.6 CONDICIONES DEL GAS DE VENTA**

Debido a que el gas obtenido en la Planta de Gas Apiay es introducido al Sistema Nacional de Transporte, este debe cumplir con las especificaciones de calidad definidas en la Resolución CREG 071 de 1999 complementadas en la Resolución CREG 054 de 2007. Estas se indican en la Tabla 8.

## **5.7 CONDICIONES DEL LUGAR**

En la Tabla 9 se presentan las condiciones ambientales típicas del área de influencia.

**Tabla 8. Especificaciones de calidad del gas natural\***

<b>Especificaciones</b>	<b>Sistema Internacional</b>	<b>Sistema Inglés</b>
Máximo poder calorífico bruto (GNV) (Nota 1)	42,8 MJ/m <sup>3</sup>	1150 BTU/pie <sup>3</sup>
Mínimo poder calorífico bruto (GNV) (Nota 1)	35,4 MJ/m <sup>3</sup>	950 BTU/pie <sup>3</sup>
Contenido de líquido (Nota 2)	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H <sub>2</sub> S máximo	6 mg/m <sup>3</sup>	0,25 grano/100PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/m <sup>3</sup>	1,0 grano/100PCS
Contenido CO <sub>2</sub> , máximo en % volumen	2%	2%
Contenido N <sub>2</sub> , máximo en % volumen	3%	3%
Contenido de inertes máximo en % volumen (Nota 3)	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0,1%	0,1%
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg/m <sup>3</sup>	6,0 lb/MMSCFD
Temperatura de entrega máximo	49°C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	7,2 °C	45°F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión (Nota 4)	1,6 mg/m <sup>3</sup>	0,7 lb/1000PC
Punto de Rocío de Hidrocarburos	7,2 °C	45°F

\*FUENTE: Resolución CREG 054 de 2007. Op. cit.

Nota 1: Todos los datos sobre metro cúbico o pie cúbico de gas están referidos a Condiciones Estándar.

Nota 2: Los líquidos pueden ser hidrocarburos, agua y otros contaminantes en estado líquido.

Nota 3: Se considera como contenido de inertes la suma de los contenidos de CO<sub>2</sub>, nitrógeno y oxígeno.

Nota 4: El máximo tamaño de las partículas debe ser de 15 micrones.

**Tabla 9. Condiciones ambientales Apiay\***

Elevación	278 m.s.n.m.
Presión barométrica	14.3 psia
Temperatura ambiente	
Máxima	104 °F (40°C)
Media	78.2 °F (25.7°C)
Mínima	63 °F (17.2°C)

\* FUENTE: Información de Ecopetrol, Mayo de 2010.

## 6. CÁLCULOS

### 6.1 USO DE SÍLICA GEL COMO DESECANTE

Este cálculo consiste en determinar el tiempo requerido para deshidratar el gas con sílica gel y con tamiz molecular, y los requerimientos energéticos para la regeneración de los lechos de secado. La metodología de cálculo utilizada es la presentada en las referencias [2] y [4] .

#### 6.1.1 Cálculo del tiempo de secado

En la Tabla 10 se presentan las condiciones de operación y propiedades del gas a la entrada del sistema de deshidratación.

**Tabla 10. Condiciones y propiedades del gas a deshidratar\***

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Presión de operación	$P_o$	650	psig
Temperatura de operación	$T_o$	110	°F
Saturación relativa del gas	SR	100	%
Masa molar del gas	MW	26,22	-
Factor de compresibilidad	Z	0,99	-
Densidad @ P y T	$\rho$	2,9	lb/pe <sup>3</sup>

\*FUENTE: Presión y temperatura tomados del Manual de Operaciones Planta de Gas Apiay, Septiembre de 2005. Propiedades restantes: EL AUTOR.

Se determina la cantidad de agua a remover del gas, mediante la Ecuación 1:

$$\hat{w} = F_{gs} \times \omega / 24$$

**Ecuación 1**

Donde:

$\hat{w}$ : Flujo másico de agua a remover (lb/h)

$F_{gs}$ : Flujo volumétrico de gas a condiciones estándar (MMSCFD)

$\omega$ : Contenido de agua en el gas (lbH<sub>2</sub>O/MMSCF)

De la figura 20-4 de la referencia [4] se tiene que a 650 psig y 110°F el contenido de agua a saturación es de  $\omega = 115$  lbH<sub>2</sub>O/MMSCF. Para los distintos caudales a evaluar, se tiene los resultados mostrados en la Tabla 11.

**Tabla 11. Flujo másico de agua a remover\***

$F_{gs}$ (MMSCFD)	$\hat{w}$ (lb/h)
8	38
12	58
20	96

\*FUENTE: EL AUTOR.

La masa de lecho desecante está dada por las dimensiones de los tambores que contienen el tamiz molecular actualmente y de la densidad (Bulk Density) de los desecantes. Esta se calcula mediante la Ecuación 2 a partir de la información presentada en la Tabla 12.

$$S = (\pi/4) \times \phi^2 \times H_B \times BD$$

**Ecuación 2**

Donde:

S: Masa de desecante (lb)

$\phi$ : Diámetro de la vasija (pies)

$H_B$ : Altura del lecho (pies)

BD: Densidad del tamiz molecular (lb/pie<sup>3</sup>)

**Tabla 12. Información de los lechos de secado\***

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad	Observación
Densidad de tamiz molecular	$BD_{TM}$	44	lb/pie <sup>3</sup>	UOP 4A-DG. Pellets de 1/8" y 1/16"
Densidad de sílica gel	$BD_{SG}$	49	lb/pie <sup>3</sup>	Soarbed ® -R. 5x8 Mesh
Diámetro de vasija	$\phi$	4,5	pies	
Altura de vasija	H	20	pies	
Altura del lecho	$H_B$	16	pies	Asumiendo un 80% de altura útil, debido al espacio utilizado para soportes, boquillas y otros rellenos.

\*FUENTE: Densidad de los desecantes tomados de CAMPBELL, John. Gas Conditioning and Processing. Campbell Petroleum Series, Séptima Edición, Julio 1992, página 374. Dimensiones de la vasija tomadas del Manual de Operaciones Planta de Gas Apiay, Septiembre de 2005.

Se obtienen los siguientes valores:

**Tabla 13. Masa de desecantes requerida para la deshidratación\***

Desecante	S (lb)
Tamiz molecular	11.197
Sílica gel	12.469

\*FUENTE: EL AUTOR.

A continuación se determina la velocidad superficial del gas y el flux de agua, mediante las siguientes ecuaciones:

$$v_g = 4 F_{ga} / \pi \phi^2 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\hat{W} = 4 \hat{w} / \pi \phi^2 \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$v_g$ : Velocidad del gas (pie/min)

$F_{ga}$ : Flujo volumétrico del gas a condiciones reales (pie<sup>3</sup>/min)

$\phi$ : Diámetro del recipiente (pies)

$\hat{w}$ : Flujo másico de agua a remover (lb/h)

$\hat{W}$ : Flux de agua a través del lecho (lb/h pie<sup>2</sup>)

Con estos dos valores, junto con la Saturación Relativa, se determina la altura de lecho disponible para la zona de transferencia de masa. Para sílica gel, este se calcula mediante la Ecuación 5:

$$H_{MTZ} = (375/12) \hat{W}^{0,7895} / v_g^{0,5506} SR^{0,2646} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$H_{MTZ}$ : Altura del lecho disponible para transferencia de masa (pies)

$\hat{W}$ : Flux de agua a través del lecho (lb/h pie<sup>2</sup>)

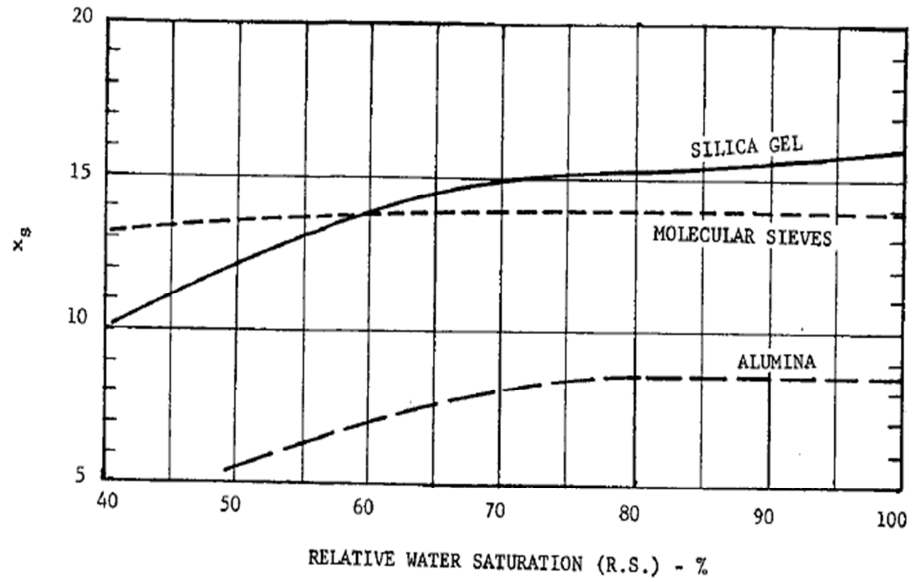
$v_g$ : Velocidad del gas (pie/min)

SR: Saturación relativa del agua en el gas (%)

El resultado obtenido mediante la anterior ecuación, se multiplica por 0,6 para obtener el valor correspondiente para tamiz molecular.

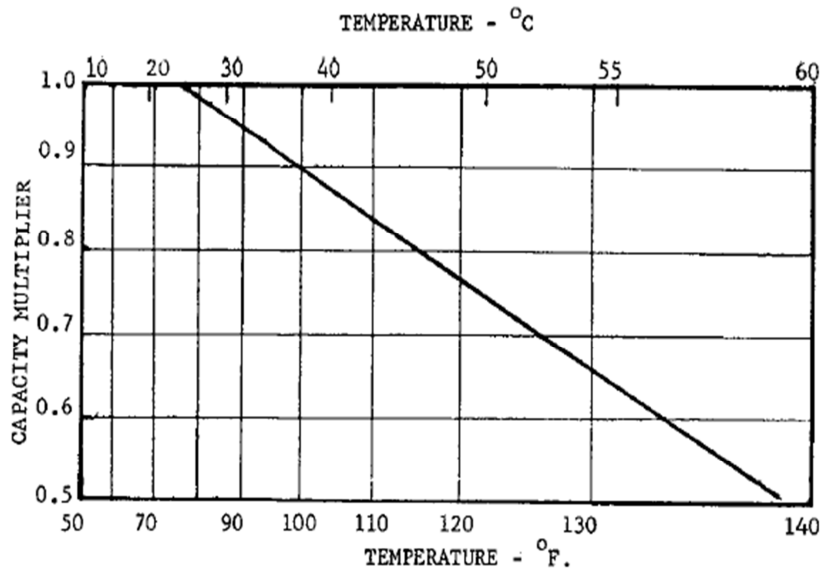
A partir de la Figura 2 y la Figura 3 se determina la capacidad de adsorción dinámica del lecho hasta saturación y el factor de corrección por temperatura. Mediante el producto de estos dos se obtiene la capacidad de adsorción dinámica corregida (x).

**Figura 2. Capacidad de adsorción de desecantes vs saturación relativa del gas\***



\*FUENTE: CAMPBELL, John. Gas Conditioning and Processing. Campbell Petroleum Series, Séptima Edición, Julio 1992. Figura 19,7

**Figura 3. Efecto de la temperatura del gas en la capacidad de adsorción del desecante\***



\*FUENTE: Ibid., Figura 19,7

Finalmente, la capacidad máxima útil de desecante se calcula mediante la Ecuación 6. Los resultados se resumen en las Tablas 14 a 16.

$$x = (x_s/H_B) \cdot (H_B - 0,45 H_{MTZ})$$

**Ecuación 6**

Donde:

x: Capacidad de adsorción corregida (lb H<sub>2</sub>O/lb desecante)

x<sub>s</sub>: capacidad de adsorción dinámica sin corrección (lb H<sub>2</sub>O/lb desecante)

H<sub>B</sub>: Altura del lecho (pies)

H<sub>MTZ</sub>: Altura del lecho disponible para transferencia de masa (pies)

**Tabla 14. Resultados del cálculo de la velocidad superficial del gas y el flux de agua\***

<b>F<sub>gs</sub> (MMSCFD)</b>	<b>M (lb/h)</b>	<b>F<sub>ga</sub> (pie<sup>3</sup>/min)</b>	<b>v<sub>g</sub> (pie/min)</b>	<b>Ŵ (lb/h pie<sup>2</sup>)</b>
8	23035	133	8,4	2,4
12	34553	200	12,6	3,6
20	57588	333	21,0	6,0

\*FUENTE: EL AUTOR.

**Tabla 15. Capacidad de adsorción de los desecantes - sin corrección\***

<b>Desecante</b>	<b>x<sub>s</sub> (lb H<sub>2</sub>O/lb desecante)</b>
Tamiz molecular	0,116
Sílica gel	0,133

\*FUENTE: EL AUTOR.

**Tabla 16. Altura de lecho disponible para transferencia de masa y capacidad de adsorción de los desecantes corregidos\***

<b>F<sub>gs</sub> (MMSCFD)</b>	<b>H<sub>MTZ</sub> (pie)</b>		<b>x (lb H<sub>2</sub>O/lb desecante)</b>	
	<b>Tamiz molecular</b>	<b>Sílica gel</b>	<b>Tamiz molecular</b>	<b>Sílica gel</b>
8	3,4	5,7	0,105	0,097
12	3,8	6,3	0,104	0,096
20	4,3	7,1	0,102	0,093

\*FUENTE: EL AUTOR.

El tiempo de secado requerido para los distintos caudales se calcula de la siguiente manera:

$$\theta_s = S \cdot x / \hat{w}$$

**Ecuación 7**

Donde:

$\theta_s$ : Tiempo de secado (h)

S: Masa de desecante (lb)

x: Capacidad de adsorción corregida (lb H<sub>2</sub>O/lb desecante)

$\hat{w}$ : Flujo másico de agua a remover (lb/h)

Los resultados obtenidos se presentan a continuación:

**Tabla 17. Tiempos de secado de los desecantes para los distintos flujos\***

<b>F<sub>gs</sub> (MMSCFD)</b>	<b><math>\theta_s</math> (h)</b>	
	<b>Tamiz molecular</b>	<b>Sílica gel</b>
8	30,7	31,7
12	20,2	20,7
20	11,9	12,1

\*FUENTE: EL AUTOR.

### 6.1.2 Cálculos de regeneración

Se determina la cantidad de energía requerida para regenerar los lechos de secado, el tiempo de regeneración y la carga del horno que calienta el gas de regeneración.

La cantidad de energía requerida para la regeneración del lecho se realiza para dos etapas de este proceso: la primera para desorción del agua y la segunda para calentamiento del lecho y remoción final del agua adherida.

En la primera etapa la energía se utiliza en calentamiento del lecho, recipiente e internos y del agua adsorbida, hasta la temperatura de desorción (la cual es característica del desecante) y para evaporar el agua adsorbida. Lo anterior se expresa en la Ecuación 1.

$$Q_{1-2} = (m_d \cdot c_{p,d} + m_w \cdot c_{p,w} + m_v \cdot c_{p,v}) \cdot (T_2 - T_1) + m_v \cdot \lambda_w \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

$Q_{1-2}$ : Calor requerido para primera etapa de regeneración del lecho (BTU)

$m_d$ : Masa del desecante (lb)

$C_{p,d}$ : Calor específico del desecante (BTU/lb<sub>m</sub>°F)

$m_w$ : Masa de agua adsorbida (lb)

$C_{p,w}$ : Calor específico del agua (BTU/lb<sub>m</sub>°F)

$m_v$ : Masa de la vasija (lb)

$C_{p,v}$ : Calor específico de la vasija (BTU/lb<sub>m</sub>°F)

$T_2$ : Temperatura de desorción del agua (°F)

$T_1$ : Temperatura de operación de secado (°F)

$\lambda_w$ : Calor de desorción del agua (BTU/lb<sub>m</sub>)

En la segunda etapa termina de calentarse el lecho, el recipiente y los internos, hasta la temperatura máxima de calentamiento del lecho. Lo anterior se expresa mediante la Ecuación 9.

$$Q_{2-3} = (m_d \cdot c_{p,d} + m_v \cdot c_{p,v}) \cdot (T_3 - T_2) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

$Q_{2-3}$ : Calor requerido para segunda etapa de regeneración del lecho (BTU)

$m_d$ : Masa del desecante (lb)

$C_{p,d}$ : Calor específico del desecante (BTU/lb<sub>m</sub>°F)

$m_v$ : Masa de la vasija (lb)

$C_{p,v}$ : Calor específico de la vasija (BTU/lb<sub>m</sub>°F)

$T_3$ : Temperatura máxima de regeneración del desecante (°F)

$T_2$ : Temperatura de desorción del agua (°F)

El calor total de regeneración es la suma de las dos cantidades de energía calculadas arriba más un 10% supuesto como pérdidas.

$$Q_{TC} = 1,1 \cdot (Q_{1-2} + Q_{2-3}) \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

$Q_{TC}$ : Calor total de regeneración (BTU)

$Q_{1-2}$ : Calor requerido para primera etapa de regeneración del lecho (BTU)

$Q_{2-3}$ : Calor requerido para segunda etapa de regeneración del lecho (BTU)

Adicional a la energía para el calentamiento del lecho, se utiliza el gas de regeneración para enfriar el lecho. El cálculo de la energía requerida para esto se expresa mediante la Ecuación 11.

$$Q_{3-4} = (m_d \cdot c_{p,d} + m_v \cdot c_{p,v}) \cdot (T_4 - T_3)$$

**Ecuación 11**

Donde:

$Q_{3-4}$ : Calor requerido para enfriamiento del lecho (BTU)

$m_d$ : Masa del desecante (lb)

$C_{p,d}$ : Calor específico del desecante (BTU/lb<sub>m</sub>°F)

$m_v$ : Masa de la vasija (lb)

$C_{p,v}$ : Calor específico de la vasija (BTU/lb<sub>m</sub>°F)

$T_4$ : Temperatura a enfriar el lecho después de regeneración (°F)

$T_3$ : Temperatura máxima de regeneración del desecante (°F)

A continuación se presentan las variables utilizadas para el cálculo de la energía requerida para regeneración, junto con los resultados obtenidos.

**Tabla 18. Parámetros utilizados para determinar la energía requerida para regeneración\***

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Masa de desecante – Tamiz molecular	$m_{d, TM}$	11197	lb
Masa de desecante – Sílica gel	$m_{d, SG}$	12469	lb
Masa de la vasija	$m_v$	39192	lb
Calor específico del desecante – Tamiz molecular	$C_{p,d, TM}$	0,2304	BTU/(lb <sub>m</sub> °F)
Calor específico del desecante – Sílica gel	$C_{p,d, SG}$	0,2208	BTU/(lb <sub>m</sub> °F)
Calor específico del agua	$C_{p,w}$	1	BTU/(lb <sub>m</sub> °F)
Calor específico de la vasija – acero	$C_{p,v}$	0,12	BTU/(lb <sub>m</sub> °F)
Temperatura de desorción del agua	$T_2$	240	°F
Temperatura de operación de secado	$T_1$	110	°F
Temperatura máxima de regeneración del desecante – Tamiz molecular	$T_{3, TM}$	415	°F
Temperatura máxima de regeneración del desecante – Sílica gel	$T_{3, SG}$	325	°F

<b>Variable</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Calor de desorción del agua – Tamiz molecular	$\lambda_{w, TM}$	1800	BTU/lb <sub>m</sub>
Calor de desorción del agua – Sílica gel	$\lambda_{w, SG}$	1400	BTU/lb <sub>m</sub>
Temperatura a enfriar el lecho después de regeneración	$T_4$	135	°F

\*FUENTE: Propiedades tomadas de GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION. Engineering Data Book. 12<sup>va</sup> Edición, 2004. Sección 20.

La cantidad de agua adsorbida es igual a la masa de desecante por la capacidad de adsorción del mismo, la cual fue obtenida para diferentes caudales en la Tabla 16.

**Tabla 19. Masa de agua adsorbida por los desecantes\***

<b>F<sub>gs</sub> (MMSCFD)</b>	<b>m<sub>w</sub> (lb)</b>	
	<b>Tamiz molecular</b>	<b>Sílica gel</b>
8	1.175	1.215
12	1.162	1.191
20	1.144	1.158
Promedio	1.161	1.188

\*FUENTE: EL AUTOR.

En la Tabla 19 se muestra la cantidad de agua adsorbida por los desecantes para distintos flujos de gas a deshidratar. Se observa que la cantidad es similar, por lo que se utilizará el promedio para continuar con los cálculos.

**Tabla 20. Calor total de regeneración requerido\***

	<b>Tamiz molecular</b>	<b>Sílica gel</b>
Q <sub>1-2</sub> (BTU)	3.186.562	2.787.047
Q <sub>2-3</sub> (BTU)	1.274.480	633.776
Q <sub>TC</sub> (BTU)	4.907.147	3.762.906
Q <sub>3-4</sub> (BTU)	2.039.169	1.416.676

\*FUENTE: EL AUTOR.

Para la regeneración del tamiz molecular se utiliza actualmente gas etano a 300 psi y 550°F, a un flujo de 2,4 MMSCFD. Para el caso de la sílica gel, esta temperatura deberá ser máximo de 375 °F.

**Tabla 21. Condiciones de operación y propiedades del gas de regeneración\***

<b>Parámetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Presión	P <sub>rg</sub>	300	psig
Temperatura utilizando Tamiz molecular	T <sub>H, TM</sub>	550	°F
Temperatura utilizando Sílica gel	T <sub>H, SG</sub>	375	°F
Factor de compresibilidad	Z <sub>rg</sub>	0,9944	-
Masa molar	MW <sub>rg</sub>	26,34	-
Flujo a condiciones estándar	F <sub>rgs</sub>	2,4	MMSCFD
Densidad @ P <sub>rg</sub> y T <sub>H</sub> utilizando Tamiz molecular	ρ <sub>TM</sub>	0,77	lb/pie <sup>3</sup>
Densidad @ P <sub>rg</sub> y T <sub>H</sub> utilizando Sílica gel	ρ <sub>TM</sub>	0,93	lb/pie <sup>3</sup>
Flujo másico	M <sub>rg</sub>	6942	lb/h

\*FUENTE: Condiciones de operación tomadas del Manual de Operaciones Planta de Gas Apiay, Septiembre de 2005. Propiedades restantes: EL AUTOR.

La energía disponible para cada una de las etapas de regeneración, está dada por la entalpía del gas de regeneración y el tiempo que durará cada etapa. Lo anterior se expresa mediante las siguientes ecuaciones.

$$Q_{1-2} = M_{rg} \cdot (h_H - h_B) \cdot \theta_B \quad \text{Ecuación 12}$$

$$Q_{2-3} = M_{rg} \cdot (h_H - h_C) \cdot \theta_C \quad \text{Ecuación 13}$$

$$Q_{3-4} = M_{rg} \cdot (h_D - h_1) \cdot \theta_D \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

$Q_{1-2}$ : Calor requerido para primera etapa de regeneración del lecho (BTU)

$Q_{2-3}$ : Calor requerido para segunda etapa de regeneración del lecho (BTU)

$Q_{3-4}$ : Calor requerido para enfriamiento del lecho (BTU)

$M_{rg}$ : Flujo másico del gas de regeneración (lb/h)

$h_B$ : Entalpía del gas de regeneración a la temperatura de desorción del agua,  $T_B$  (BTU/lb)

$h_C$ : Entalpía del gas de regeneración a la temperatura media de la etapa 2 – 3 (segunda) de regeneración,  $T_C$  (BTU/lb)

$h_H$ : Entalpía del gas de regeneración a la temperatura del gas de regeneración,  $T_H$  (BTU/lb)

$h_D$ : Entalpía del gas de regeneración a la temperatura media de la etapa de enfriamiento 3 – 4,  $T_D$  (BTU/lb)

$h_1$ : Entalpía del gas de regeneración @  $T_1$  (BTU/lb)

$\theta_B$ : Tiempo de etapa de regeneración 1 -2 (h)

$\theta_C$ : Tiempo de etapa de regeneración 2 - 3 (h)

$\theta_D$ : Tiempo de etapa de regeneración 3 - 4 (h)

Debido a que ya se conoce el calor de cada una de las etapas de regeneración, se determinará el tiempo que dura cada una de estas etapas y el tiempo total de regeneración. Esto se muestra en la Tabla 22.

**Tabla 22. Cálculo del tiempo de regeneración\***

Parámetro	Símbolo y unidad	Valor	
		Tamiz molecular	Sílica Gel
Temperatura de desorción del agua	$T_B$ (°F)	240	240
Temperatura media de la etapa 2 – 3 de regeneración	$T_C$ (°F)	328	283
Temperatura del gas de regeneración (pasando por el horno)	$T_H$ (°F)	550	375
Temperatura media de la etapa de enfriamiento 3 - 4	$T_D$ (°F)	275	230
Temperatura del gas de regeneración antes de calentamiento (sin pasar por el horno)	$T_1$ (°F)	100	100
Entalpía del gas de regeneración @ $T_B$	$h_B$ (BTU/lb)	275	275
Entalpía del gas de regeneración @ $T_C$	$h_C$ (BTU/lb)	320	295
Entalpía del gas de regeneración @ $T_H$	$h_H$ (BTU/lb)	470	350
Entalpía del gas de regeneración @ $T_D$	$h_D$ (BTU/lb)	290	270
Entalpía del gas de regeneración @ $T_1$	$h_1$ (BTU/lb)	200	200
Tiempo de etapa de regeneración 1 -2	$\theta_B$ (h)	2,4	5,4
Tiempo de etapa de regeneración 2 - 3	$\theta_C$ (h)	1,2	1,7
Tiempo de etapa de regeneración 3 - 4	$\theta_D$ (h)	3,3	2,9
Tiempo total de regeneración	$\theta_T$ (h)	6,8	9,9

\*FUENTE: Entalpías del gas tomadas de CAMPBELL, John. Gas Conditioning and Processing. Campbell Petroleum Series, Séptima Edición, Julio 1992. Figura 20-10.

La carga de calor requerida en el horno para calentar el gas etano de regeneración se determina mediante la Ecuación 15. Los resultados se presentan en la Tabla 23..

$$Q_H = M_{rg} \cdot (h_H - h_1) \cdot (\theta_B + \theta_C) \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

$Q_H$ : Carga de calor requerida en el horno para calentamiento del gas de regeneración (BTU)

$M_{rg}$ : Flujo másico del gas de regeneración (lb/h)

$h_H$ : Entalpía del gas de regeneración a la temperatura del gas de regeneración,  $T_H$  (BTU/lb)

$h_1$ : Entalpía del gas de regeneración @  $T_1$  (BTU/lb)

$\theta_B$ : Tiempo de etapa de regeneración 1 -2 (h)

$\theta_C$ : Tiempo de etapa de regeneración 2 - 3 (h)

**Tabla 23. Carga de calor del horno de calentamiento de gas de regeneración\***

	<b>Tamiz molecular</b>	<b>Sílica gel</b>
BTU/h	1.874.387	1.041.326
MMBTU	6,7	7,3

\*FUENTE: EL AUTOR.

## 6.2 USO DE ETILEN GLICOL COMO INHIBIDOR DE FORMACIÓN DE HIDRATOS

Se determina la cantidad teórica de metanol y etilenglicol que debe inyectarse para la inhibición de formación de hidratos en la corriente de gas proveniente de la deshidratación, hacia la caja fría. Se utiliza la metodología presentada en la referencia [4] .

Las condiciones de operación se presentan en la Tabla 24. Debido a que el punto de inyección de inhibidor se encuentra aguas abajo de la etapa de secado por adsorción, el contenido de agua en este punto es de partes por millón (0,1 ppm para tamiz molecular y 5 a 10 ppm para sílica gel), para el cálculo se asume que la corriente contiene la máxima cantidad de agua según la Tabla 8, esto es 6 lb/MMSCF.

**Tabla 24. Condiciones de operación a utilizar para el cálculo\***

Variable	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura de gas seco	$T_{in}$	110	°F
Temperatura de gas frío	$T_{out}$	-18	°F
Temperatura de formación de hidratos	$T_h$	60	°F
Presión de operación	$P_o$	630	psig

\*FUENTE: Condiciones de operación tomadas del Manual de Operaciones Planta de Gas Apiay, Septiembre de 2005.

Para determinar la cantidad de inhibidor requerida, se determina primero la concentración de inhibidor en la corriente de agua líquida resultante luego de la inhibición. Para esto se pueden utilizar las siguientes ecuaciones:

$$\Delta T = \frac{K \cdot w_i}{(1 - w_i) \cdot MW_i} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\Delta T = -129,6 \ln(x_{H_2O})$$

**Ecuación 17**

Donde:

$\Delta T$ : Depresión en la temperatura de formación de hidratos (°F)

K: Relación de equilibrio

$w_i$ : Fracción másica de inhibidor en agua líquida luego de inhibición

$MW_i$ : Masa molar

$x_{H_2O}$ : Fracción molar del agua luego de inhibición

La Ecuación 16 es la relación de *Hammerschmidt*, la cual es recomendada para concentraciones de 20 a 25 por ciento de Metanol y de 60 a 70 por ciento de glicol [10] . La Ecuación 17 es la relación de *Nielsen y Bucklin*, la cual es utilizada para metanol en concentraciones entre 25 y 50 por ciento [10] .

En la Tabla 25 se presentan los parámetros utilizados y los resultados del cálculo del porcentaje en peso del inhibidor en la corriente acuosa final mediante la relación de *Hammerschmidt*. En la Tabla 26 se muestran los resultados para el caso del metanol con la relación de *Nielsen y Bucklin*.

**Tabla 25. Cálculo de fracción en peso del inhibidor en corriente acuosa final mediante la Ecuación 16\***

Variable	Símbolo	Metanol	Etilenglicol	Observación
Masa molar	MW	32,04	62,07	-
Relación de equilibrio	K	2335	2200	Tomado de la tabla 3 – 6 de [10]
Depresión en la temperatura de formación de hidratos	$\Delta T$	83°F		$T_h - T_{out} + 5°F$ (margen de seguridad)
Fracción másica de inhibidor en agua final	$w_i$	0,53	0,70	-

\*FUENTE: EL AUTOR.

**Tabla 26. Cálculo de fracción en peso de metanol en corriente acuosa final mediante la Ecuación 17\***

Variable	Símbolo	Valor
Fracción molar del agua	$x_{H_2O}$	0,53
Fracción másica de metanol	$w_i$	0,61

\*FUENTE: EL AUTOR.

Para el caso del metanol, se toma el resultado obtenido en la Tabla 26, debido a que este presenta una concentración mayor.

A partir de estos resultados, se determina la cantidad de inhibidor requerida, para lo cual se utiliza la Ecuación 18.

$$\dot{m}_i = \frac{w_{i,R} \cdot \dot{m}_{H_2O}}{w_{i,L} - w_{i,R}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

$\dot{m}_i$ : Flujo másico de inhibidor requerido (lb/h)

$\dot{m}_{H_2O}$ : Flujo másico de agua a retirar (lb/h)

$w_{i,R}$ : Fracción másica de inhibidor en agua líquida luego de inhibición

$w_{i,L}$ : Fracción másica de inhibidor en la corriente de inhibidor a inyectar

Teniendo en cuenta una cantidad de 6 lb/MMSCF a retirar, en la Tabla 27 se presentan los flujos de agua en la corriente a aplicar el inhibidor, para los distintos caudales de gas.

**Tabla 27. Flujo de agua a retirar para distintos flujos de gas\***

$F_{gs}$ (MMSCFD)	$\dot{m}_{H_2O}$ (lb/h)
8	2
12	3
20	5

\*FUENTE: EL AUTOR.

Debido a que las cantidades son relativamente bajas, se realizará el cálculo para el caso de 5 lb/h. En la Tabla 28 se presenta finalmente el cálculo de la cantidad de inhibidor de formación de hidratos a inyectar.

**Tabla 28. Cálculo de la cantidad de inhibidor a inyectar\***

Inhibidor	Metanol	Etilen glicol	Observación
$w_{i,R}$	0,61	0,70	
$w_{i,L}$	1,0	0,8	Solución de 100% metanol a inyectar Solución de 80% etilenglicol a inyectar
$\dot{m}_{H_2O}$ (lb/h)	7,99	35,30	

\*FUENTE: EL AUTOR.

Para el caso del metanol, se deberán prever adicionalmente pérdidas del mismo por evaporación en la corriente gaseosa y por solubilidad en la corriente de hidrocarburos.

Para las pérdidas por evaporación, se toma como referencia la Figura 20 – 65 de la referencia [4] . A 600 psia y 20°F se presentan unas pérdidas de 0,8 libras de metanol por millón de pies cúbicos a condiciones estándar por porcentaje en peso de metanol en la corriente acuosa final. Se toma este valor como referencia, debido a que no se presentan valores a temperaturas menores. En la Tabla 29 se presentan estos cálculos.

**Tabla 29. Cálculo de las pérdidas de metanol por evaporación\***

lb Metanol/(MMSCF x %wt metanol)	0,8
lb/h	41

\*FUENTE: EL AUTOR.

Para las pérdidas de metanol en la corriente de hidrocarburo, se toma como referencia la Figura 20 – 66 de la referencia [4] . A -20°F y 60 por ciento de metanol en la fase acuosa final, se tiene una solubilidad de metanol en la corriente de hidrocarburos líquidos de 0,2 por ciento molar.

En la Tabla 30 se presenta la cantidad de hidrocarburos líquidos generados en la operación de control de punto de rocío y las propiedades del mismo.

**Tabla 30. Propiedades del hidrocarburo líquido generado en el enfriamiento\***

Masa molar	50
Gravedad específica	0,54
Líquidos generados	1200 Bbl/MMSCF

\*FUENTE: EL AUTOR.

El flujo molar de condensados es el siguiente:

$$\left(\frac{20 \text{ MMSCF}}{\text{día}}\right) \left(\frac{10 \text{ bbl}}{\text{MMSCF}}\right) \left(\frac{350 \text{ lb } H_2O}{1 \text{ bbl}}\right) \left(\frac{0,52 \text{ lb Condensados}}{1 \text{ lb } H_2O}\right) \left(\frac{1 \text{ lb}_{mol}}{140 \text{ lb}}\right)$$

$$= 7560 \frac{\text{lb}_{mol}}{\text{día}}$$

El flujo de metanol en esta corriente es el siguiente:

$$7560 \frac{\text{lb}_{mol}}{\text{día}} \cdot 0,002 \cdot \frac{32}{24} = 20 \frac{\text{lb}}{\text{h}}$$

En la Tabla 31 se resume la cantidad de inhibidor requerida por hora y la proporción de etilenglicol a metanol a utilizar.

**Tabla 31. Cantidad de inhibidores requerida\***

Total	Glicol	Metanol
lb/h	36,1	69
Gal/h*	4,0	10,5
Volumen glicol a volumen de metanol	0,38	

\*Calculado con una densidad de 0,79 g/cc para el metanol y de 1,085 g/cc para el etilenglicol.

### 6.3 LÍNEA PARA ENVÍO DE GAS DE CUPIAGUA A APIAY

La línea de transferencia de gas de las facilidades de producción de Cupiagua a Apiay, se dimensiona para manejar 20 MMSCFD, para lo cual se toma como base el trazado de la línea existente de envío de Gas de Cusiana a Apiay.

Para esta estimación, se tiene en cuenta que el flujo en la línea debe cumplir con los criterios de diseño presentados en la Tabla 32.

**Tabla 32. Criterios de diseño para dimensionamiento de la línea de envío de gas de Cupiagua a Apiay\***

<b>Servicio</b>	<b>Velocidad (ft/s)</b>	<b><math>\Delta P</math> (psi/100ft)</b>
Gases en general	Mínima = 10 a 15 Máxima = 60 a 80	0,5
Gas húmedo	60	0,5

\* FUENTE: Información Ecopetrol, mayo 2010; ARNOLD, Ken y STEWART Maurice. Surface Production Operation. Houston TX: Gulf Publishing Company, Segunda Edición, 1999.

Utilizando una tubería de 8 pulgadas, se tiene que la caída de presión por cada 100 pies es de 0,06 psi, con lo cual se cumple con el criterio establecido en la Tabla 32. Se obtiene adicionalmente una velocidad máxima de cerca de 9 pies por segundo, la cual es inferior a la máxima indicada en la Tabla 32.

Finalmente, las condiciones de la corriente de llegada a la Planta de gas de Apiay son las mostradas en la Tabla 33.

**Tabla 33. Condiciones de la corriente de llegada a Apiay\***

<b>Parámetro</b>	<b>Total</b>	<b>Fase vapor</b>	<b>Fase Líquida</b>
Fracción de la fase vapor	0,29	0,29	0,71
Temperatura (°F)	53,69	53,69	53,69

<b>Parámetro</b>	<b>Total</b>	<b>Fase vapor</b>	<b>Fase Líquida</b>
Presión (psig)	265	265	265
Flujo molar (MMSCFD)	20	5,7	14,3
Flujo másico (lb/h)	93829,6	17380,8	76448,8
Flujo líquido a condiciones estándar (BPD)	12889,4	2944,6	9944,8

\*FUENTE: EL AUTOR.

Tomando como base la cromatografía del gas de los campos de Apiay, Suria y Reforma, se calcula la cantidad de líquidos que puede ser recuperada de una corriente de alimentación a la planta de gas de 12 MMSCFD. Esto se muestra en la Tabla 34.

**Tabla 34. Cálculo de cantidad de líquidos recuperables en corriente actual de alimentación a la Planta de Gas de Apiay\***

<b>Componente</b>	<b>%Molar</b>	<b>gal/lb<sub>mol</sub></b>	<b>GPM</b>	<b>Gal/día</b>	<b>% Recuperación</b>	<b>Gal/día NETO</b>
Nitrógeno	1,939	-	-	-	-	-
Dióxido de Carbono	3,270	-	-	-	-	-
Metano	63,116	-	-	-	-	-
Etano	14,021	-	-	-	-	-
Propano	6,491	10,424	1,783	21.399	98	20.970
Isobutano	1,821	12,384	0,594	7.133	99	7.062
Normal Butano	2,823	11,936	0,888	10.656	99	10.549
Isopentano	2,617	13,855	0,956	11.468	100	11.467
Normal Pentano	2,685	13,712	0,970	11.642	100	11.641
Hexanos	1,217	15,566	0,499	5.991	100	5.991
<b>TOTAL</b>	<b>100,00</b>		<b>5,691</b>	<b>68.289</b>		<b>67.683</b>

\*FUENTE: EL AUTOR.

Estos 67.683 galones corresponden a 1.612 barriles por día de líquidos recuperables, de los cuales 919 barriles corresponden a GLP (C3 y C4) y 693 barriles a gasolina natural y condensado liviano (C5 y C6+).

Al complementar la carga de la planta de gas con 8 MMSCFD de gas de Cupiagua, se tiene el incremento en la cantidad de líquidos recuperables indicado en la Tabla 35.

**Tabla 35. Cálculo de la cantidad de líquidos recuperables al complementar la carga de alimentación a la planta de gas con 8 MMSCFD de gas de Cupiagua\***

Componente	%Molar	gal/lb <sub>mol</sub>	GPM	Gal/día	% Recuperación	Gal/día NETO
Nitrógeno	1,172	-	-	-	-	-
Dióxido de Carbono	3,446	-	-	-	-	-
Metano	45,366	-	-	-	-	-
Etano	16,201	-	-	-	-	-
Propano	13,722	10,424	3,770	75.400	98	73.892
Isobutano	4,817	12,384	1,572	31.443	99	31.129
Normal Butano	6,582	11,936	2,071	41.410	99	40.996
Isopentano	3,666	13,855	1,339	26.775	100	26.775
Normal Pentano	3,591	13,712	1,298	25.953	100	25.953
Hexanos	1,438	15,566	0,590	11.801	100	11.801
TOTAL	100,00		10,639	212.783		210.546

\*FUENTE: EL AUTOR.

Estos 210.546 galones corresponden a 5.013 barriles por día de líquidos recuperables, de los cuales 3.477 barriles corresponden a GLP y 1.536 barriles a gasolina natural y condensado liviano. Estos resultados se resumen en la Tabla 36.

**Tabla 36. Comparación de cantidad de líquidos recuperables con alimentación actual y con la carga complementada en BPD\***

<b>Líquido</b>	<b>Carga actual 12 MMSCFD gas Apiay</b>	<b>Carga complementada con 8 MMSCFD de Cupiagua</b>	<b>Incremento</b>
GLP	919	3.477	2.558
Gasolina natural y condensados	693	1.536	843
Total	1.612	5.013	3.401

\*FUENTE: EL AUTOR.

## 7. RESULTADOS

### 7.1 USO DE SÍLICA GEL

Los costos que permitirán comparar económicamente entre el uso de sílica gel o el uso del tamiz molecular son el costo de suministro y el costo equivalente de la energía utilizada para la regeneración del lecho.

En la Tabla 37 se presenta la comparación entre estos costos, a un horizonte de 5 años, tiempo en el cual es reemplazado el lecho.

**Tabla 37. Comparación económica entre el uso de sílica gel y tamiz molecular\***

Rubro/Costo	Tamiz molecular	Sílica gel
Volumen total del lecho (m <sup>3</sup> )	16,66	16,66
Precio (\$/m <sup>3</sup> )	10'961.432	35'000.000
Costo suministro (\$)	182'617.450	583'100.000
<b>Ahorro en insumo por cambio de tamiz molecular a sílica gel (\$)</b>	<b>-400'482.550</b>	
Calor para regeneración diaria (MMBTU)	6,7	7,3
Costo equivalente de energía (\$/MMBTU)	5.680	5.680
Costo total por regeneración diaria durante 5 años (\$)	69'452.200	75'671.800
<b>Ahorro en consumo energético por cambio de tamiz molecular a sílica gel (\$)</b>	<b>-6'219.600</b>	
<b>Ahorro total por cambio de uso de tamiz molecular a sílica gel (\$)</b>	<b>-406'702.150</b>	

\*FUENTE: EL AUTOR.

## 7.2 USO DE ETILEN GLICOL COMO INHIBIDOR DE FORMACIÓN DE HIDRATOS

Teniendo en cuenta que el uso de inhibidor de formación de hidratos en la Planta de Gas Apiay es puntual, se realiza la comparación del insumo de etilenglicol tomando como base la relación obtenida en la Tabla 31. Adicionalmente, para el etilenglicol se contempla el costo de inversión inicial de una unidad de recuperación de glicol la cual estaría compuesta por un separador trifásico, bombas dosificadoras de glicol, regenerador de glicol, filtro de carbón activado, separador “flash” bifásico, intercambiador glicol rico/glicol pobre y sistema de reposición de glicol.

En la Tabla 38 se presenta la comparación económica al realizar el cambio de inhibidor de formación de hidratos de metanol a etilenglicol.

**Tabla 38. Comparación económica entre el uso de metanol y etilenglicol para la inhibición de formación de hidratos\***

Rubro/Costo	Metanol	Etilenglicol
Consumo estimado cada 3 años (galones)	220	84
Precio (\$/55 galones)	681.843	819.500
Costo de suministro (\$)	2'727.372	1'251.600
<b>Ahorro en insumo por cambio de suministro de metanol a etilenglicol</b>	<b>1'475.772</b>	
Suministro de sistema de recuperación de glicol	-	700'000.000
<b>Ahorro en instalación de equipos por cambio de metanol a etilenglicol</b>	<b>-700'000.000</b>	
<b>Ahorro total por cambio de metanol a etilenglicol (\$)</b>	<b>-698'524.228</b>	

\*FUENTE: EL AUTOR.

### 7.3 COMPLEMENTO DE CARGA CON GAS DE CUPIAGUA

Para complementar la carga a la planta de gas de Apiay, se requiere una línea de 8 pulgadas de diámetro de 160 km aproximadamente, con lo cual se tendrá el incremento en líquidos recuperables mostrado en la Tabla 36.

**Tabla 39. Costo de inversión para complementar la carga de gas a en comparación con la rentabilidad obtenida\***

Cantidad de tubería de 8" (m)	160.000
Costo unitario de suministro (\$/m)	125.810
Costo unitario por montaje (\$/m)	343.066
Total suministro (\$)	20.129'600.000
Total montaje (\$)	54.890'560.000
<b>Total suministro y montaje (\$)</b>	<b>75.020'160.000</b>
Incremento en GLP (galón)	107.436
Precio venta GLP (\$/galón)	5.666
<b>Ingresos por GLP incremental (\$/día)</b>	<b>608'732.376</b>
Incremento en gasolina natural y condensados (galón)	35.406
Precio venta gasolina natural (\$/galón)	2.262
<b>Ingresos por gasolina natural y condensados incrementales (\$/día)</b>	<b>80'088.372</b>

\*FUENTE: EL AUTOR.

## 8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Inicialmente se espera que el tamiz molecular cuente con una capacidad de adsorción, definida como la masa de agua que puede adsorberse por libra de desecante, mayor que la de la sílica gel. Los cálculos realizados para las condiciones de operación en la Planta de Gas Apiay lo confirman.

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 16, al utilizar sílica gel se requiere una mayor altura del lecho para la zona de transferencia de masa que para el tamiz molecular. Esto significa que para retener la misma cantidad de agua, la sílica gel requerirá un mayor volumen que el tamiz molecular.

Lo anterior se verifica con la capacidad de adsorción obtenida en la misma tabla, esta es mayor en una pequeña proporción, para el tamiz molecular que para la sílica gel. Al utilizar sílica gel, la capacidad de adsorción se reducirá en un 8 por ciento aproximadamente.

El presentar una capacidad de adsorción menor implicaría en un diseño inicial, utilizar una mayor cantidad de desecante para retener la misma cantidad de agua. Sin embargo, como en este caso se cuenta con un volumen fijo, dado por los recipientes existentes en los cuales se tienen los lechos de secado, la capacidad de adsorción menor de la sílica gel se reflejará en tiempos de secado mayores.

Comparando los tiempos de secado requeridos por los dos desecantes, mostrados en la Tabla 17, para el tamiz molecular estos son menores en máximo una hora.

Si bien al utilizar sílica gel no se alcanzará el mismo contenido de agua que con el tamiz molecular (mientras que con la sílica gel se alcanzan de 5 a 10 ppm de agua en el gas deshidratado, con el tamiz molecular se obtiene 0,1 ppm), esta

proporcionará un gas con la calidad requerida para las temperaturas de operación manejadas en la Planta. Esto es, la sílica gel proporcionará un punto de rocío de agua de  $-60^{\circ}\text{F}$ , mientras que la temperatura mínima alcanzada aguas abajo de la operación de deshidratación será de  $-50^{\circ}\text{F}$ , por lo que se esperaría que no se presente condensación de agua a estas condiciones de operación utilizando sílica gel.

Sin embargo, debido a que la sílica gel requiere una temperatura máxima de regeneración de  $375^{\circ}\text{F}$ , menor que la del tamiz molecular correspondiente a  $550^{\circ}\text{F}$ , lo cual en principio se vería como una ventaja, en realidad se requiere un mayor tiempo para regenerarse (9,9 horas de sílica gel y 6,8 horas para el tamiz molecular), puesto que la energía requerida se transfiere a una tasa más lenta.

Lo anterior es una desventaja en el uso de la sílica gel debido a que se requerirán cerca de 0,6 MMBTU más para regenerar el lecho en comparación con el tamiz molecular, lo cual equivale a cerca de \$6 millones a cinco años de operación.

Para el mismo volumen requerido para deshidratación ( $16,66 \text{ m}^3$ ), el precio de la sílica gel es mayor que el del tamiz molecular, diferente a lo que se esperaba de acuerdo con lo mencionado en el marco teórico. Esto hace que, aunque sea viable técnicamente el reemplazo del tamiz molecular por sílica gel, no lo sea económicamente.

Por otro lado, se tiene de la Tabla 17 que a medida que el caudal de gas a deshidratar es menor, el tiempo para dicha operación es menor. Para el caudal de diseño de la planta de gas de 20 MMSCFD, este tiempo es de 12 horas, sin embargo, para los caudales manejados actualmente de 12 MMSCFD el tiempo es de 20 horas. Esto significa que los lechos de secado no deben continuarse regenerando cuando se tengan 12 horas de operación, sino que puede mantenerse el secado hasta 20 horas. Esto se verá reflejado en una menor

frecuencia de regeneración de los lechos y por tanto mayor vida útil de los mismos.

De acuerdo con los cálculos teóricos realizados, para una inyección continua de inhibidor de formación de hidratos, para un contenido de agua de 6 lb/MMSCFD, se requiere menor cantidad de etilenglicol que de metanol. Sin embargo, la operación en la Planta de Gas de Apiay no mantiene una inyección continua de metanol, sino para casos puntuales en los que se presentan taponamientos o en paradas de plantas, lo cual equivale a un consumo cada tres años de 220 galones, con un costo de \$2,7 millones.

Al implementar la inyección de etilenglicol, la principal ventaja estaría en su recuperación, pero esto aplica para un caso en que se tiene una inyección continua de inhibidor. Para mantener esta recuperación, se requiere suministrar e instalar un sistema de recuperación de glicol, el cual contaría con los equipos mencionados en el numeral 7.2, cuyo costo únicamente de suministro no se ve recompensado por el ahorro operativo al implementar la inhibición con etilenglicol.

Por otro lado, complementar la carga de la planta de gas a su máxima capacidad operativa con gas proveniente del sistema Joule Thompson de la Planta de Gas de Cupiagua, parece ser atractivo, puesto que se incrementarían los ingresos en \$689 millones diarios solo por venta de GLP y gasolina natural, con los cuales se cubriría el costo estimado de suministro y montaje de la tubería para el envío de gas de Cupiagua a Apiay en cerca de tres meses.

Bajo este primer resultado, se debe revisar más a fondo esta alternativa, realizando un presupuesto más detallado de los requerimientos para complementar la carga de la Planta de Gas de Apiay con gas proveniente de Cupiagua.

Los requerimientos no son solo de la tubería para el envío de gas, sino de la adecuación de las instalaciones existentes en la planta de gas para tratar estos fluidos.

En principio, tomando como referencia el almacenamiento de GLP, se tienen actualmente dos esferas cada una con capacidad para máximo 4.034 barriles. Al complementar la carga, se tendrían diariamente 3.477 barriles por día, con lo cual se tendría capacidad de almacenamiento de 2 días.

Adicionalmente, se debe revisar a nivel corporativo de Ecopetrol S.A., debido a que el gas utilizado provendrá de otro campo de la misma compañía, es decir, los ingresos adicionales que tenga la Planta de Gas de Apiay serán ingresos que no tendrá la operación del campo Cupiagua.

## 9. CONCLUSIONES

1. Se exploró el uso de sílica gel como alternativa a la deshidratación de gas con tamiz molecular en la Planta de Gas Apiay, así como el uso de etilenglicol como alternativa a la inhibición de formación de hidratos con metanol.
2. Se evaluó la factibilidad de utilizar gas de Cupiagua como insumo para la planta de gas de Apiay, como complemento a la carga actual.
3. El consumo de etilenglicol como alternativo a la inhibición de formación de hidratos, corresponde a un 38% de la cantidad de metanol requerida. Esto equivale a 84 galones cada tres años.
4. No es rentable implementar etilenglicol a cambio de metanol para la inhibición de formación de hidratos, debido a las modificaciones que requerirían hacerse al proceso que no se ven compensadas por el ahorro obtenido al realizar este cambio.
5. Se puede utilizar sílica gel para la deshidratación de gas en la planta de gas de Apiay, la cual aunque dará una calidad de gas inferior al utilizar tamiz molecular, cumplirá con los requerimientos de proceso en la planta al proporcionar un punto de rocío de agua de -60°F.
6. El uso de sílica gel es una alternativa técnicamente factible frente al uso de tamiz molecular en la planta de gas de Apiay, por cuanto se podría utilizar la infraestructura existente. Sin embargo, no es técnicamente rentable.

7. El diámetro del gasoducto requerido para llevar a Apiay 20 MMSCFD de Cupiagua es de 8 pulgadas, con una presión de entrada de 600 psig y llegando a la Planta de Gas de Apiay a 265 psig.
8. Al complementar la carga a la Planta de Gas de Apiay con 8 MMSCFD de gas de Cupiagua, se tiene un incremento en productos blancos de 2.558 barriles de GLP y 843 barriles de gasolina natural y condensados.
9. Como evaluación inicial, la inversión requerida para el suministro y la instalación de la tubería para envío de 20 MMSCFD de gas de Cupiagua a Apiay puede recuperarse en cerca de 3 meses por la venta de los productos blancos incrementales al complementar la carga a la Planta de Gas con 8 MMSCFD.
10. Debe evaluarse a un nivel más detallado y corporativo de Ecopetrol S.A., la alternativa de envío de gas de Cupiagua a Apiay.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] ARNOLD, Ken y STEWART Maurice. Surface Production Operation. Houston TX: Gulf Publishing Company, Segunda Edición, 1999.
- [2] CAMPBELL, John. Gas Conditioning and Processing. Campbell Petroleum Series, Séptima Edición, Julio 1992.
- [3] CARROLL, John. Natural Gas Hydrates, a Guide for Engineers. Elsevier Science & Technology Books, Octubre 2002.
- [4] GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION. Engineering Data Book. 12<sup>va</sup> Edición, 2004.
- [5] GUO, Boyun y GHALAMBOR, Ali. Natural Gas Engineering Handbook. Houston TX: Gulf Publishing Company, 2005.
- [6] IKOKU, Chi. Natural Gas Production Engineering. Florida: John Wiley and Sons, 1984.
- [7] KIDNAY, Arthur y PARRISH, William. Fundamental of Natural Gas Processing. Taylor and Francis Group, 2006.
- [8] SANTOS, Nicolas. Módulo Operaciones Básicas de Procesos Condensados y Rehervidores – Destilación – Absorción – Adsorción. Bogotá: Especialización en Ingeniería del Gas, Universidad Industrial de Santander, Agosto 2009.

- [9] SANTOS, Nicolas. Módulo Operaciones Básicas de Procesos Transferencia e Intercambiadores de Calor. Bogotá: Especialización en Ingeniería del Gas, Universidad Industrial de Santander, Julio 2009.
- [10] SAIED, Mokhatab y otros. Handbook of Natural Gas Transmission and Processig. Burlington: Elsevier, 2006.
- [11] TREYBAL, Robert. Operaciones de Transferencia de Masa. Segunda Edición, Mc Graw Hill, 2003.