

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE BUENOS AIRES  
POSGRADO**

**Rama Perforación y Producción**

**PROYECTO FINAL Postgrado PPG 2010-2011**

# ***Captación y Endulzamiento de Gas***

**Integrantes del Grupo:**

**Ing. Gerardo Condorelli**

**Ing. Agustín Ludevid**

**Ing. Santiago Mendoza**

**Director de Proyecto:**

**Ing. Julio Shiratori**

---

Buenos Aires, Argentina año 2012

## Índice

---

Notas Iniciales

Nomenclatura utilizada

1. Introducción
2. Situación Actual de la Operación del Yacimiento
3. Alcance del Proyecto Final
4. Objetivos del Proyecto
5. Esquema Conceptual de Instalaciones a Futuro
6. INPUT's - Información Utilizada
7. OUTPUT's – Información Obtenida
8. Endulzamiento del Gas: Selección de Tecnología y Predimensionamiento de Planta
9. Redes de Captación: Simulación y Evaluación de Escenarios
  - 9.1 Modelización de ambos anillos (GD y GA) en software
  - 9.2 Casos evaluados
  - 9.3 Análisis económico macro
  - 9.4 Redes de Captación: Simulación y Evaluación de Escenarios
10. Conclusión: Caso Seleccionado

## Notas Iniciales

---

El presente Proyecto está basado en un proyecto real:

- Constituye el Trabajo Final del postgrado de Especialización en Producción de Petróleo y Gas, rama Producción y Perforación, dictado por el ITBA y cursado durante los años 2010 y 2011. Los autores del presente esperamos cumpla con los requisitos y expectativas de la institución.
- Está basado utilizando información de un proyecto privado real que se encuentra actualmente en etapa de estudio. Por ello es que se toman algunos recaudos mínimos necesarios y condicionantes sobre el uso de la información facilitada por la empresa propietaria del proyecto, tales como omisión o modificación de nombre propios de pozos o instalaciones, precisión o grado de detalle en algún dato de producción o eventualmente estratégico, modificaciones (redondeos) en valores de costos de equipamiento y montaje, etc.

## Nomenclatura utilizada

---

A los efectos de simplificar la interpretación y agilizar la lectura del presente Proyecto se utilizarán las siguientes abreviaturas:

- GA = Gas Ácido (rojo)
- GD = Gas Dulce (amarillo)
- AGA = Anillo de Gas Ácido
- AGD = Anillo de Gas Dulce
- FmGA = Formación (reservorio) de Gas Ácido
- FmGD = Formación (reservorio) de Gas Dulce
- PzGA = Pozo/s de Gas Ácido
- PzGD = Pozo/s de Gas Dulce

## 1. Introducción

---

El yacimiento de estudio se encuentra localizado en Ecuador. El mismo es un yacimiento maduro netamente petrolero con producción de gas asociado actualmente aprovechado parcialmente. Sobre esta última parte es donde se enfocará el presente Proyecto.

El bloque en estudio se encuentra ubicado en la cuenca oriental del distrito amazónico ecuatoriano, a más de 200 km de la capital del Ecuador, Quito. La producción neta total supera levemente los 4,000 BPPD, esto representa un valor inferior al 1% de toda la producción nacional en el Ecuador; la productividad por pozo está por debajo de los 100 barriles, lo cual implica un verdadero desafío para llevar adelante su operación.

Más del 50% de los pozos son operados con bombeo mecánico, y el resto con BES. Actualmente el yacimiento produce de 2 formaciones con marcada diferencia en el contenido de CO<sub>2</sub>:

- Pozos de la FmGA (> 70% CO<sub>2</sub>). El gas producido de los PzGA (gas no apto para consumo) es venteado en distintos puntos de captación (estaciones, subestaciones y pozos). El GA no necesita de un AGA ya que actualmente las características del gas no generan un incentivo para su captación y aprovechamiento.
- Pozos de la FmGD (< 22% CO<sub>2</sub>). El gas de los PzGD es aprovechado parcialmente en la actualidad: una parte es utilizada para consumo en el propio yacimiento, otra porción es reinyectado a formación de origen y el resto venteado. Existe actualmente un AGD utilizado su captación, manejo y aprovechamiento.

El gas es de interés únicamente para el propio productor que lo utiliza para auto-generación de energía eléctrica empleada en las distintas instalaciones de producción. No hay clientes externos a los cuales pueda comercializarse el gas ni tampoco el gobierno obliga a no ventearlo (esto último cambiará en los próximos años ya que se estima que entrará en vigencia una nueva legislación ambiental).

Los pronósticos de producción indican que, de seguir con la metodología actual de manejo de gas, en pocos años faltará GD para generación (ver Fig. 1) y quizás antes que ello el aumento de % CO<sub>2</sub> haga imposible su utilización (actualmente se está trabajando al límite de tolerancia de los motores), lo que dificultará sensiblemente la operación.

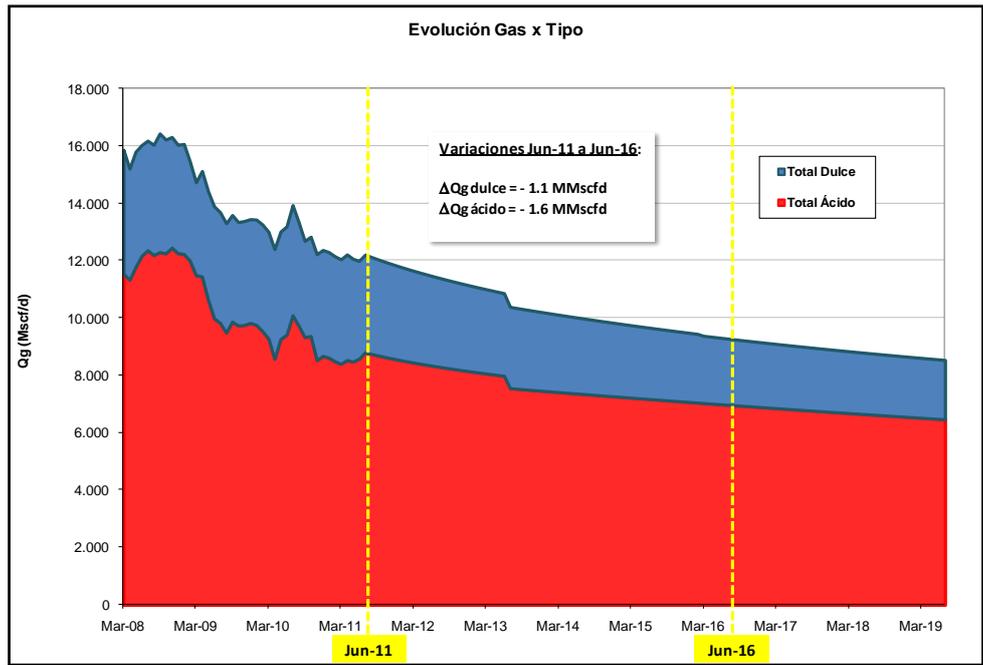


Fig. 1: Pronósticos de Gas Dulce y Ácido

## 2. Situación Actual de la Operación del Yacimiento

De los 44 pozos en operación 19 producen petróleo de la Fm Basaltena (Fm de GD) con un caudal de gas asociado del orden de 3,5 MMpcd (a Junio 2011) con una media ponderada (resultado de la mezcla) de 22% molar de CO<sub>2</sub>. La totalidad de este gas es captado mediante un anillo que recorre todo el yacimiento, pasando por cada estación y subestación, con una extensión de 30km mayormente en 4" de diámetro.

El destino de este caudal de GD es el siguiente:

- *Venteo*: 0,7 MMpcd
- *Consumo para generación*: 1,3 MMpcd (en 9 puntos distintos a lo largo del anillo)
- *Reinyección a formación*: 1,5 MMpcd. La inyección se realiza utilizando un solo compresor y dos pozos inyectoros ubicados en la zona norte del campo. Por cuestiones operativas actualmente se está reinyectando el caudal de un solo pozo próximo a los inyectoros, cuyo gas está contaminado con un 40% de CO<sub>2</sub>, lo que produce una acidificación progresiva del gas de la formación de GD (se genera un "círculo vicioso").

El resto de los pozos, 25 en total, producen de la Fm Hollín que es la de GA, con un caudal de gas asociado total de unos 8,7 MMpcd con una media ponderada de CO<sub>2</sub> mayor al 70% molar. Nada de este gas es captado, venteándose en unos 14 sitios distintos del campo.

La siguiente figura muestra un esquema de la situación actual de producción de gas:

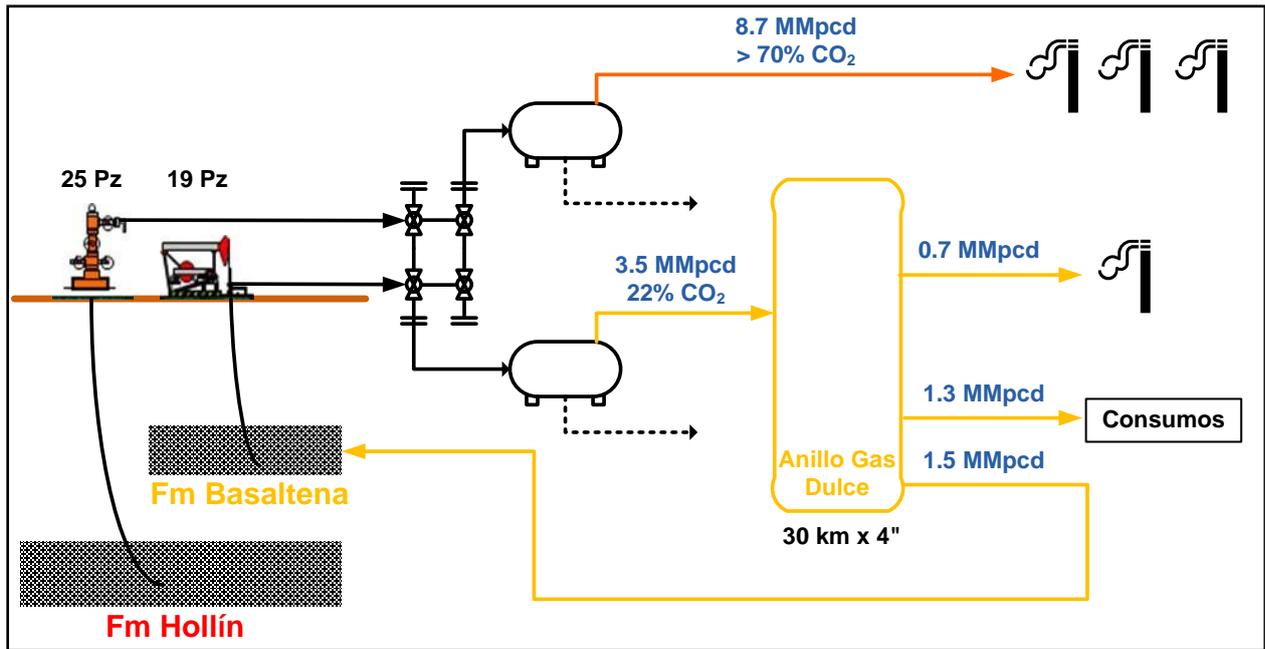


Fig. 2: Esquema de la producción actual de gas

Actualmente se dispone de 2 compresores recíprocos, motor Caterpillar G3512, de 945HP, configurado para  $P_{in} = 55$  psig,  $P_{out} = 1.140$  psig y  $Q_{gas} = 3.800$  Mscfd. Uno está ubicado en zona Norte (EBN), y el otro está en zona Sur (EBS) a disposición (fuera de servicio y en buen estado).

### 3. Alcance del Proyecto Final

El Proyecto que aquí se presenta para aprobación del PPG incluirá el siguiente alcance en la elaboración del mismo:

- Recopilación, interpretación y análisis de información del yacimiento en estudio.
- Investigación, análisis comparativo y selección de tecnología apropiada para endulzamiento de gas.
- Verificación y eventual rediseño de la red de AGD y diseño de la de AGA para captación del gas. Esto incluye la simulación de dichas redes en software comercial (se utilizó Pipesim) para determinación de diámetros más convenientes vs. presiones de trabajo generadas.
- Determinación de mejor ubicación de planta de tratamiento de gas vs. facilidades disponibles, logística y presiones generadas en el sistema.
- Predimensionamiento de capacidad de compresión de reinyección y booster para planta, considerando aprovechar al máximo la capacidad ociosa disponible.

### 4. Objetivos del Proyecto

Los objetivos principales sobre los que se centrará el presente Proyecto son:

- Mejorar la calidad del GD (detener o reducir el incremento de %  $CO_2$ ).
- Recuperación (endulzamiento) de la mayor cantidad posible de GD de la corriente de GA.
- Venteo "0" de GD.
- Reinyección del total de GD remanente.

5. Incrementar la confiabilidad y productividad del sistema de generación eléctrica

Por otro lado los objetivos secundarios son:

1. Reducir el caudal y puntos de venteo de GA con el fin de cumplimentar con los posibles cambios en la legislación ambiental en el futuro.
6. Cumplir con compromisos de inversión.
7. Según las necesidades, buscar soluciones y diseños que aprovechen equipos existentes y materiales de stock.

## 5. Esquema Conceptual de Instalaciones a Futuro

De acuerdo con los objetivos planteados se buscará recuperar parte del GD contenido en el GA producido. Para ello se seleccionará una tecnología y dimensionará una planta de endulzamiento. El GD a ser recuperado de la corriente de GA será incorporado a la corriente de GD (anillo de gas combustible) del que se buscará aprovechar todo el GD: venteo "0" y reinyección de todo el GD excedente, lo que a mediano/largo plazo debería frenar el incremento del % CO<sub>2</sub> para luego irlo reduciendo.

Por último también se buscará minimizar los puntos de venteo de GA, en la medida que se logre una solución de compromiso entre lo técnico-económico-beneficio ambiental.

A continuación se presenta un esquema conceptual de las instalaciones con las modificaciones a ser introducidas para cumplir los objetivos presentados:

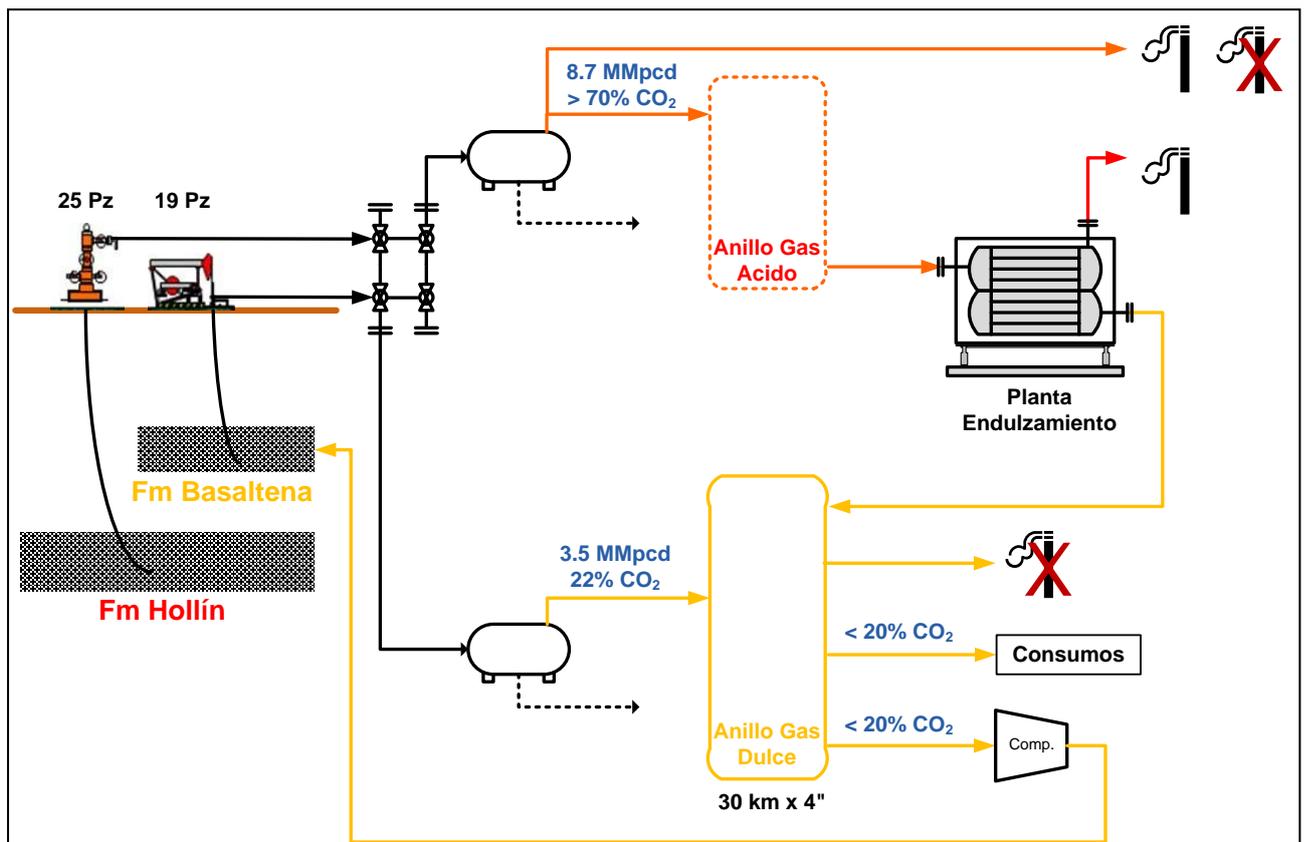


Fig. 3: Esquema conceptual de operación a futuro

## 6. INPUT's – Información Utilizada

---

Considerando que el presente Proyecto abarca dos grandes campos:

1. captación del gas (que básicamente se compone de una red de líneas y “complementos”, como compresores en boca de pozo) y,
2. endulzamiento del gas (descarbonatación),

la información necesaria para un buen análisis, y que fue recopilada abarca los siguientes puntos:

- Mapa del Yacimiento: ubicación en planta de pozos e instalaciones.
- Geometría de líneas de AGD y existentes disponibles (tendidas en campo y de stock en almacén) para eventualmente ser utilizadas para constituir el AGA y/o modificar el AGD: longitudes, cotas s.n.m., diámetros, calidades.
- Producciones por pozo: caudales de petróleo, gas y agua, y la cromatografía de cada pozo para conocer con precisión las concentraciones de CO<sub>2</sub> en las mezclas de cada caso evaluado y en el punto que se desee.
- Manejo de la producción: aspectos de la operatividad del campo, en particular sobre el manejo y destinos del gas (explicado en punto 1). Acá se relevan los consumos de equipos y venteos.
- Caudales y presiones de succión estimados correspondientes a la planta de tratamiento a predimensionar.

Como input al modelo con el fin de parametrizar el yacimiento se cargaron un total de 45 pozos (44 operativos permanentes y 1 eventual), c/u con su cromatografía, 9 puntos de consumos, 19 líneas principales y otras tantas secundarias (necesarias para armar el modelo), todas en 3D.

## 7. OUTPUT's – Información Obtenida

---

La distinta información que compone el Output está formada por los resultados de los diferentes tanteos de las redes realizados con el software, y por el análisis y simulación de las distintas tecnologías de endulzamiento. Cada uno de estos escenarios se valúa y compara contra el presupuesto disponible, confirmando o descartando viabilidad (lo que veremos más adelante).

Los datos principales de salida fueron:

- Diámetros y longitudes de líneas vs. presiones generadas en los anillos.
- Caudal de GA para tratamiento = tamaño de planta.
- Potencia de compresión booster para planta de tratamiento y Potencia para reinyección a formación.
- Mejores ubicaciones para planta de tratamiento y para compresora.
- Composición del gas (mezclas) para cada combinación de pozos a captar y en los nodos de interés.

## 8. Endulzamiento del Gas: Selección de Tecnología y Predimensionamiento de la Planta

---

A continuación se elabora un resumen de tecnologías y proveedores existentes en la actualidad en el mercadoLatinoamericano de tratamiento de gas.

Para cada caso es necesario resaltar que la selección de un proceso de endulzamiento requiere de un minucioso análisis de las características del gas que se quiere tratar y de las condiciones deseadas para el gas tratado. Para ello es imprescindible realizar una evaluación de la composición del gas, su caudal, de las condiciones climáticas, regulaciones ambientales entre otros aspectos. Cada uno de los parámetros señalados interviene directamente en el proceso y afecta de manera diferente a uno u otro tipo de tecnología a utilizar.

La principal restricción de la tecnología a seleccionar es el presupuesto disponible con el cual se evaluó que la capacidad de procesamiento de GA de la planta a construir debe ser de 3.5 MMspcd.

Las tecnologías estudiadas y evaluadas para el proyecto se listan a continuación:

| Tecnología                             | Mecanismo de remoción de CO <sub>2</sub> / Tipo de Proceso | Evaluación técnica preliminar   |
|--|--|---|
| <b>Aminas</b>                          | Absorción química / regenerativo continuo                  | técnicamente inviable. %CO <sub>2</sub> fuera de rango. No se evaluaron proveedores.      |
| <b>Membranas</b>                       | Permeación / continuo                                      | técnicamente viable.  |
| <b>PSA (Pressure Swing Adsorption)</b> | Adsorción / regenerativo continuo                          | técnicamente viable. Variante FAST CYCLE PSA. (Mejor eficiencia que el PSA convencional). |

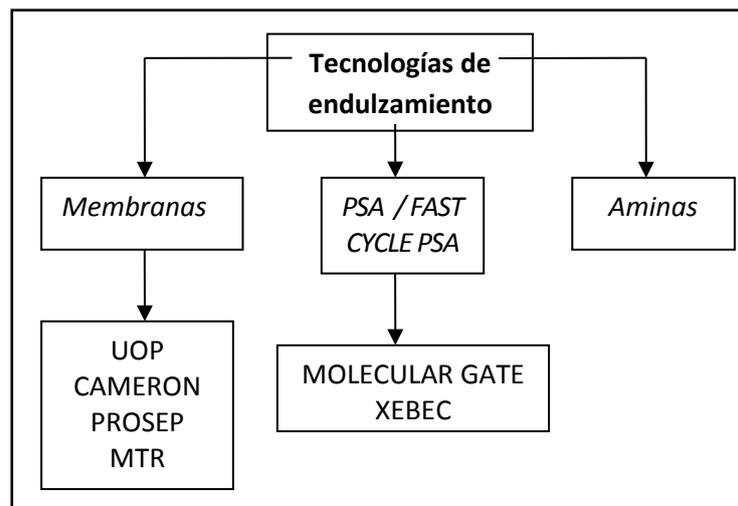


Fig. 4: Tecnologías de endulzamiento evaluadas

## 8.1 Membranas

### Principio de funcionamiento

Las membranas son barreras semipermeables muy delgadas que selectivamente separan algunos compuestos de otros. Esta definición es necesariamente amplia, debido a la gran variedad de materiales de los cuales pueden estar compuestas dichas membranas.

El material más utilizado y probado es el acetato de celulosa que se utiliza en aplicaciones de gran tamaño.

Las membranas utilizadas para la eliminación de CO<sub>2</sub> no funcionan como filtros, donde las pequeñas moléculas se separan de las más grandes a través de un medio poroso. Por el contrario, operan bajo el principio de solución-difusión a través de una membrana porosa. Primeramente el CO<sub>2</sub> se disuelve en la membrana y luego se difunde a través de él. Debido a que la membrana no tiene poros, no se

separan los compuestos función de su tamaño molecular. Más bien, se separa en base a cómo los diferentes compuestos se disuelven en la membrana y luego el modo en que se esparcen en la misma.

Debido a que el dióxido de carbono, hidrógeno, helio, sulfuro de hidrógeno y agua, penetran rápidamente en la membrana, son llamados gases “rápidos”. El monóxido de carbono, nitrógeno, metano, etano y otros hidrocarburos penetran con menos rapidez y se los llama gases “lentos”. Las membranas permiten la eliminación o separación selectiva de gases de efecto rápido de los gases lentos. Por ejemplo, el CO<sub>2</sub> es eliminado de una corriente de gas natural. El agua y H<sub>2</sub>S se eliminan en el mismo instante, pero el metano, etano y los hidrocarburos más pesados son extraídos a una tasa mucho más baja (ver Fig. 5 y 6)

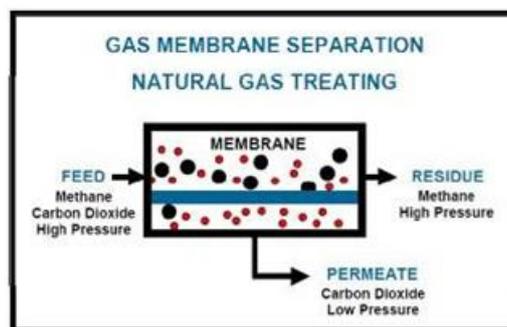


Fig. 5: Principio de funcionamiento de la membrana



Fig. 6: Planta de endulzamiento de membranas

### **Tipos de membranas**

Los cartuchos de membranas en el interior de tubos pueden ser fabricados de 2 formas:

- **Spiral Wound** (enrollada en espiral): pueden manejar una mayor presión, son más resistentes a la suciedad, y tienen una larga historia de servicio en aplicaciones de endulzamiento de gas natural.

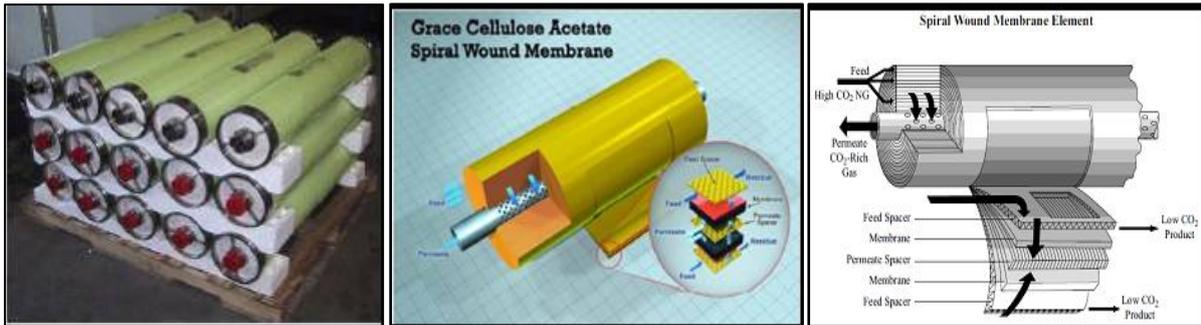


Fig. 7: membranas tipo spiral wound

- **Hollow Fiber** (fibras huecas): Su geometría le confiere una mayor densidad y por lo tanto las dimensiones de las plantas con este tipo de cartucho son más compactas y pequeñas que las plantas con cartuchos en forma de espiral. Los proveedores que suministran los dos tipos de elementos pueden proporcionar razones objetivas para la elección de uno u otro tipo.

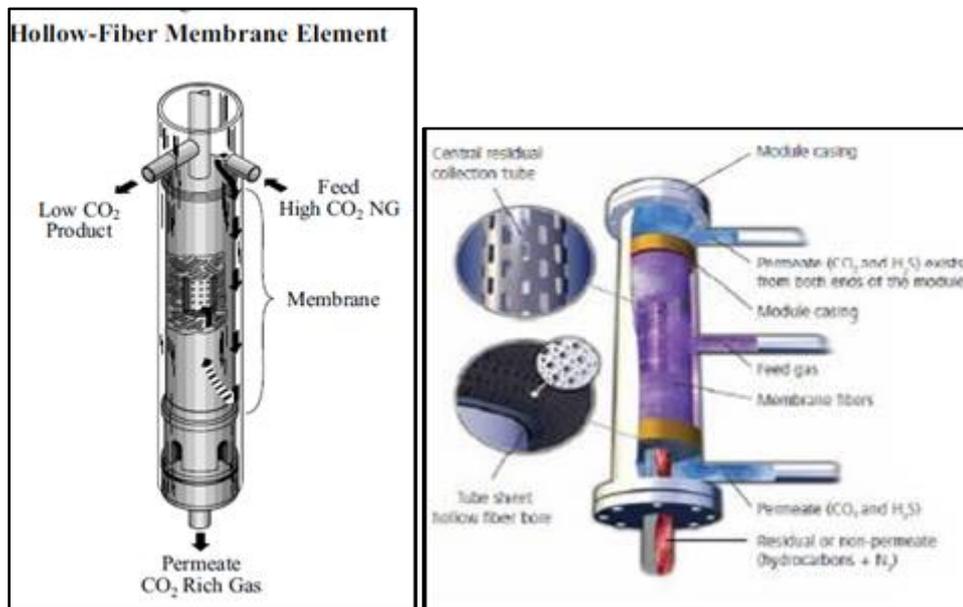


Fig. 8: membranas tipo hollow fiber

### Pre-tratamiento del gas

El diseño adecuado del pre-tratamiento de gas a endulzar es fundamental para el desempeño de todos los sistemas de membranas. La falla en el pre-tratamiento por lo general conduce a la disminución del rendimiento de la permeación.

Las sustancias que comúnmente se encuentran en las corrientes de gas natural que reducen el funcionamiento de las membranas son:

- Líquidos (Puntos de rocío del gas y agua)
- Hidrocarburos pesados
- Partículas solidas
- Ciertos Inhibidores de corrosión y aditivos utilizados en los pozos

El pre-tratamiento incluye las siguientes etapas:

- Filtro coalescente para la eliminación de líquidos y mezclas.
- Lecho protector adsorbente para la eliminación o remoción de trazas contaminantes.
- Filtro de partículas para la remoción de polvos aguas arriba del lecho adsorbente.
- Calentador que provea un suficiente calentamiento del gas a tratar.

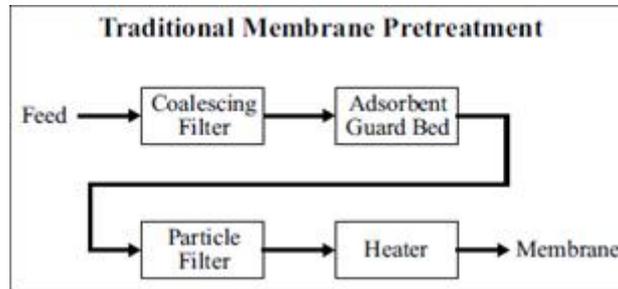


Fig. 9: esquema de pre-tratamiento de gas en planta de membranas

### Permeación diferencial de CO<sub>2</sub> a media-alta presión (30 – 60 kg/cm<sup>2</sup>g).

- Puede permear en forma eficiente gases con porcentajes de CO<sub>2</sub> entre 3.0% a 88% en volumen, siendo esta este tipo de tecnología viable para llevar adelante el endulzamiento del GA, siendo la concentración porcentual de CO<sub>2</sub> a tratar en nuestra planta >70% en volumen.
- Gas no permeado se envía al Anillo de Gas Combustible.
- Gas permeado se envía a Venteo

## 8.2 Plantas PSA (Pressure Swing Adsorption)

### 8.2.1 Convencional

- Adsorción física diferencial de CO<sub>2</sub>: baja presión (3 – 7 kg/cm<sup>2</sup>g)
- Gas no adsorbido se envía al Anillo de gas combustible.
- Gas adsorbido se envía a Venteo.
- Regeneración de adsorbente conlleva una disminución de presión (origen del nombre).
- Lechos adsorbentes en ciclos discontinuos de adsorción / regeneración.
- Pre-tratamiento: filtros coalescentes.

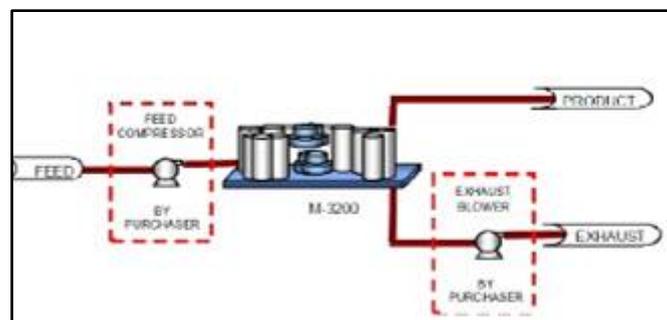


Fig. 10: esquema de planta PSA convencional



Fig. 11: Planta PSA convencional

### 8.2.2 Fast Cycle

- Adsorción física: presión baja-media (15 – 20 kg/cm<sup>2</sup>g).
- Gas no adsorbido se envía al Anillo de gas combustible.
- Gas adsorbido se envía a Venteo.
- Regeneración de adsorbente conlleva una disminución de presión (origen del nombre).
- Lechos adsorbentes en ciclos continuos de adsorción / regeneración.
- Pre-tratamiento: filtros coalescentes.
- Válvulas rotativas para la optimización de ciclos de adsorción / regeneración (menos material).

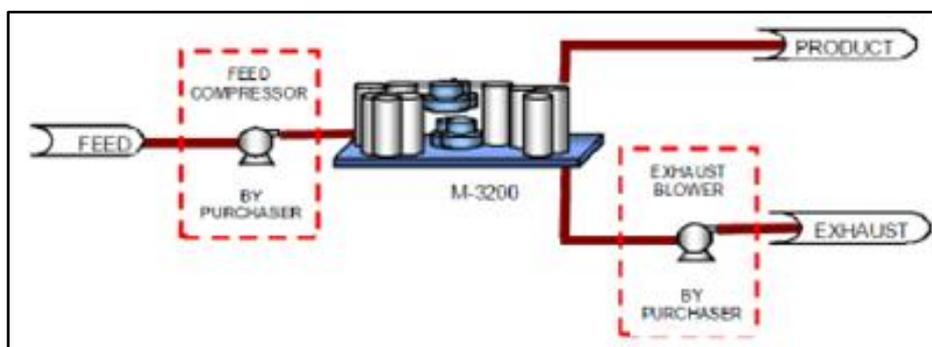


Fig. 12: Esquema de planta PSA Fast Cycle



Fig. 13: Planta PSA Fast Cycle

### 8.3 Comparación Técnico – Económica de las tecnologías evaluadas

Los parámetros principales evaluados para las tecnologías analizadas fueron los siguientes:

- ✓ **Inversión Total**
- ✓ **Costos y consumos de servicios**
- ✓ **Eficiencia de recuperación de hidrocarburos**

A continuación se detallan las alternativas evaluadas según los proveedores disponibles en el mercado latinoamericano:

| Inversiones (MUSD)   |          |             |             |             |            |             |             |
|--|----------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|
| Tecnología   |          | Membranas   |             |             |            | PSA         |             |
| Proveedor  |          | UOP         | Cameron     | Prosep      | MTR        | Xebec       | M. Gate     |
| Precio Ex W.   |          | 1728        | 1688        | 844         | 507        | 1055        | 2744        |
| Importación + Montaje  |          | 1127        | 1103        | 597         | 394        | 929         | 1838        |
| <b>Total Inversiones</b>   |          | <b>2855</b> | <b>2791</b> | <b>1441</b> | <b>900</b> | <b>1985</b> | <b>4582</b> |
| Costos de Mantenimiento / Consumos de servicios / Eficiencia de Recuperación de HC |          |             |             |             |            |             |             |
| Proveedor  |          | UOP         | Cameron     | Prosep      | MTR        | Xebec       | M. Gate     |
| Mantenimiento  | MUSD/año | 164         | 163         | 137         | 127        | 80          | 85          |
| Consumo Gas  | MMBTU/d  | 121         | 96          | 101         | 84         | 122         | 9           |
| Consumo Eléctrico  | kW       | 30          | 30          | 30          | 30         | 30          | 875         |
| Eficiencia de Recuperación   | %MMBTU   | 78          | 54          | 57          | 32         | 29          | 44          |

Fig. 14: evaluación técnico-económica de las tecnologías según distintos proveedores

## 8.4 Conclusiones

De la evaluación de las diversas tecnologías arribas descritas se obtienen las siguientes conclusiones:

- ✗ **Molecular Gate / UOP / Cameron son descartadas por su elevado costo.**
- ✓ **Ventajas Fast Cycle PSA vs Membranas Prosep y MTR:**
  - Pre-tratamiento menos complejo.
  - Durabilidad del adsorbente mayor a la de las membranas.
  - Trabaja a menor presión (20 kg/cm<sup>2</sup>g vs 30 kg/cm<sup>2</sup>g).
- ☞ **Desventajas Fast Cycle PSA vs Membranas Prosep y MTR:**
  - Mayor costo de inversión.
  - Eficiencia de recuperación de hidrocarburos muy baja.
  - Necesita dos máquinas rotantes para su funcionamiento.
- ➔ **Alternativa seleccionada: Planta de Membranas de Prosep, la cual tiene siguientes características principales:**
  - Qgas ácido a tratar por las membranas: 3,5 MMspcd
  - Eficiencia en recuperación de HC: 57%

## 9. Redes de Captación: Simulación y Evaluación de Escenarios

---

El análisis de simulación y evaluación de los distintos escenarios fue realizado mediante tanteos, es decir se hicieron distintos planteos de soluciones, se las procesó e interpretó y finalmente se evaluaron en cuanto a costo-beneficio contrarrestándolas con el presupuesto disponible para el proyecto.

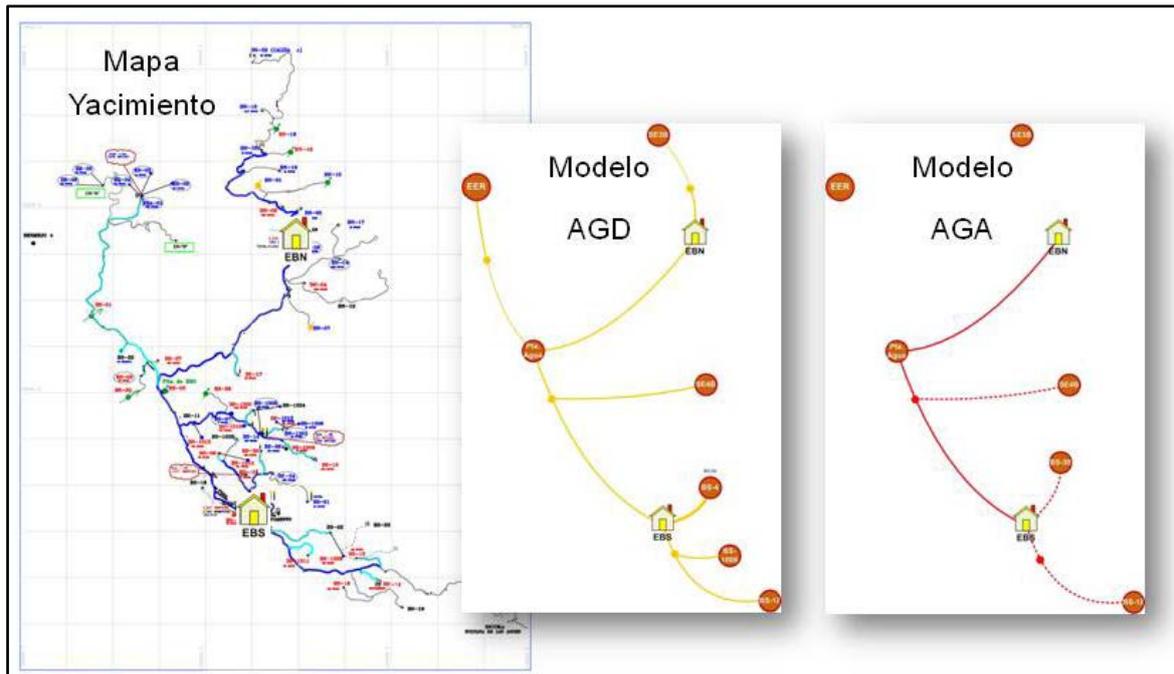
Los pasos seguidos en esta etapa fueron los siguientes:

### 9.1. Modelización de ambos anillos (GD y GA) en software.

En esta etapa se buscó llevar la realidad del campo a un modelo simple, no solo de entender sino también para que simplifique la carga de datos, su revisión e interpretación. En general es posible optar por dos modelos distintos: uno esquemático siguiendo una forma tipo “organigrama” o bien aquel que busca seguir la misma distribución y escalas tal cual se dan en la realidad, tal cual (parecido) se puede apreciar en un mapa de líneas del campo. Se optó por este último.

En este caso, debido a la geografía accidentada de la zona donde se ubica el yacimiento y las normativas que exigen minimizar impactos negativos al ambiente, todas las líneas/ductos tendidos sigue las mismas trazas de los caminos, de manera que el plano vial representa bastante bien, al menos para las líneas que nos interesan analizar, la distribución y trazado de las cañerías.

Entonces, tomando como base el plano vial se diseña el modelo resultando así:



**Fig. 15:** Esquema digital del modelo adoptado

Como se observa el modelo respeta la distribución y geometría del mapa del yacimiento en estudio. Esto suele colaborar en pos de una mejor comprensión de la operación, facilitando el análisis y evitando perder el foco de “la realidad” del asunto. Es fácil, cuando se hace ingeniería de gabinete, caer en soluciones teóricas que son poco más que utopías al momento de querer materializarlas.

Los dos elementos básicos de estos modelos son las líneas y los nodos, los que están elegidos estratégicamente en ubicaciones de estaciones y subestaciones, empalmes, cambios de diámetros, puntos de consumos, por nombrar los principales. Los dos nodos cuyo gráfico son como una casa, representan a las dos estaciones del campo: la Norte (EBN) y la Sur (EBS).

En cuanto a las líneas del AGD en la actualidad son las que existen en el campo y están conectadas conformando tal anillo. Respecto a las líneas del AGA las mostradas en línea continua son las que existen en el campo y están disponibles para ser utilizadas como parte de este anillo (que aún no existe y hay que diseñar), y en contrapartida las de línea punteada son las que no existen, y que de requerirse habría que montar ya sea con cañería por comprar o aprovechando lo que haya de stock (que es una de las premisas). Por último, en este anillo, figuran los 2 nodos superiores sin línea, “desconectados”: esto es así porque en esos sitios todo el gas que se produce es combustible, o sea dulce.

Por supuesto que las longitudes de las líneas son las reales medidas en 3D, o sea “copiando” la topografía. Por otro lado No se simulan las líneas de producción de cada pozo, sino solo a partir de los nodos que es donde ya se dispone del gas luego de separación primaria.

En la captura de pantalla del software Pipesim se observa el modelo completo detallándose cada pozo vinculado a su correspondiente nodo (de distintos colores dependiendo de si está activado o no), los consumos y reinyecciones (caudales de salida) y la succión y descarga de la planta. Hay varios de estos modelos en función del input utilizado y del output buscado. Un ejemplo real simulado se aprecia en la siguiente imagen:

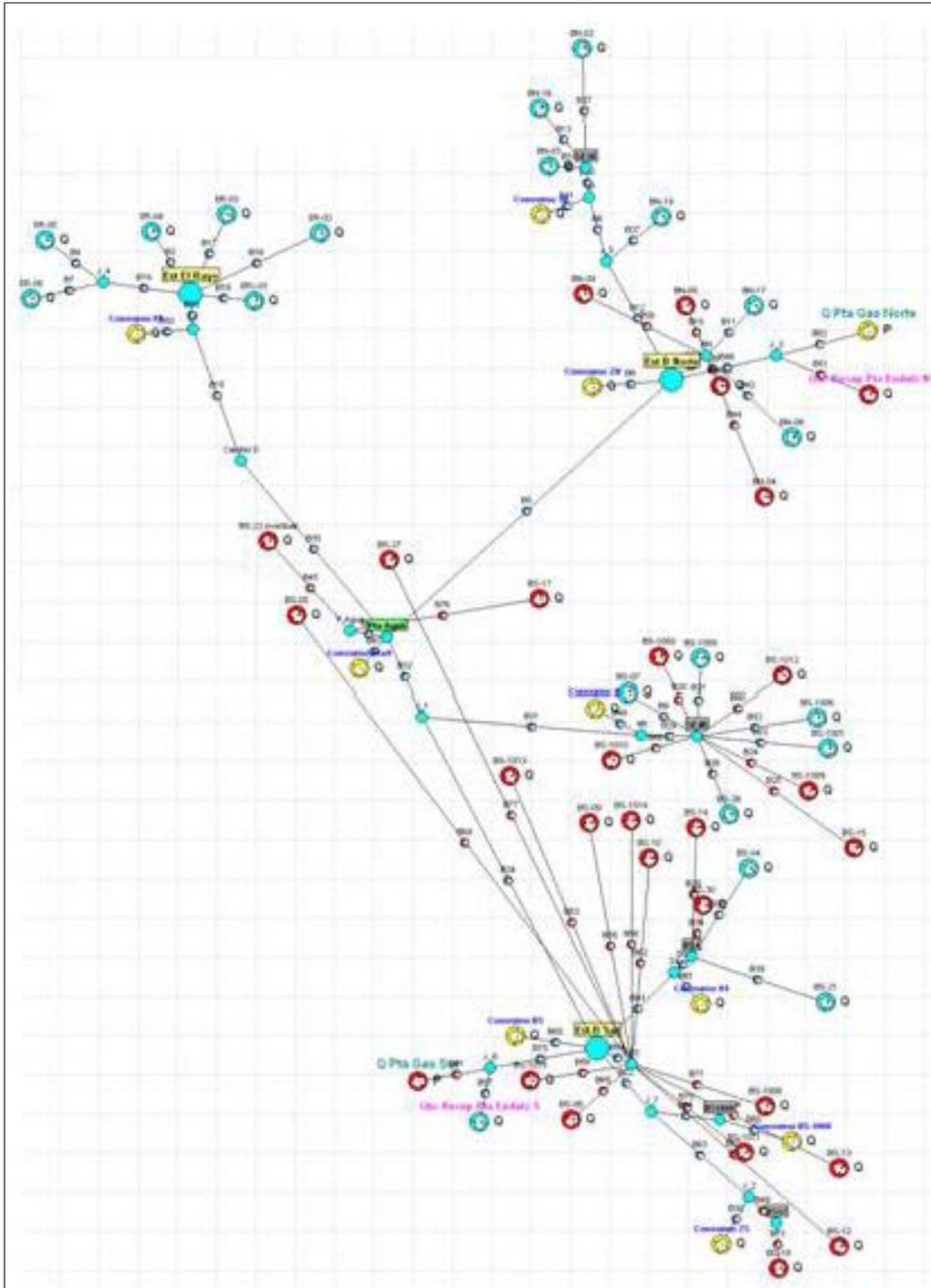


Fig. 16: Ejemplo de vista de pantalla de software de simulación de redes (anillos).

## 9.2. Casos evaluados

Cada caso evaluado está compuesto de dos corridas del modelo: una con una determinada hipótesis del AGD y otra para el AGA. Esto es así ya que del AGA se toma un determinado caudal que es procesado en la planta de tratamiento y de la que obtenemos dos corrientes, una de las cuales es de GD que es inyectada al AGD (ver Fig. 3).

A su vez cada uno de estos casos se plantea en paralelo de un predimensionamiento de la planta básicamente determinado por el costo de la misma, por ser el presupuesto disponible un cuello de botella. Se trata de una primera etapa donde solo se podrá tratar una parte del GA, dejando eventualmente para una segunda y quizás tercera el restante. De todos modos, muy rápidamente fue fácil acotar el orden del tamaño de la planta a 3,5 MMpcd.

En total se plantearon y evaluaron 11 escenarios, del A al K los cuales fueron formados combinando las siguientes variables en juego:

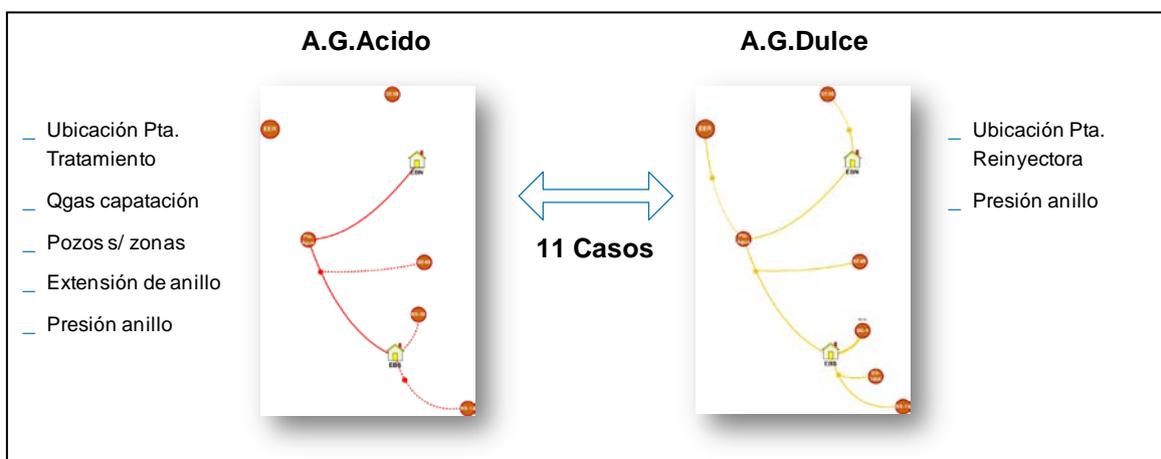
**Variables del AGD:**

- ☞ Ubicación planta reinjectora: se consideran dos, al Norte en EBN y al Sur en EBS, que es donde hoy se encuentran los 2 compresores disponibles y todos los servicios necesarios que hace que estas sean prácticamente las únicas ubicaciones viables.
- ☞ Presión del anillo: más allá de los requerimientos de presión propios de este proyecto, hay necesidades operativas para el mismo parámetro, por lo cual se plantean dos rangos, de 120 a 150psig, y de 70 a 90psig.

**Variables del AGA:**

- ☞ Ubicación planta endulzamiento: también se consideran dos, al Norte en EBN y al Sur en EBS.
- ☞ Presión del anillo: el que resulta de variar la presión de succión de la compresión booster de la planta, aunque casi todos los casos se hicieron con 60 psig.
- ☞ Caudal de gas a procesar por la planta: ya se mencionó que está fuertemente ligado al costo, y que el valor nominal predimensionado fue de 3,5 MMpcd.
- ☞ Caudal a captar en el anillo: este caudal es mayor al anterior, ya que tiene que ver con el total de pozos/caudal que se incorporan al anillo con la finalidad de eliminar puntos de venteos (obj. secundario).
- ☞ Pozos a captar: en función al gas necesario, se realizan distintos agrupamientos de pozos regidos mayormente por la ubicación geográfica, facilidades disponibles y concentración de CO<sub>2</sub>.
- ☞ Extensión del anillo: se plantean distintas configuraciones del anillo, agregando y quitando ramales y cambiando sus diámetros.

Gráficamente lo arriba explicado puede ser representarlo la siguiente manera:



**Fig. 17:** Variables combinadas para formar los distintos escenarios evaluados

| Simulación y evaluación de escenarios de tratamiento (endulzamiento) de gas ácido y captación de gas combustible |                  |                  |                               |   |   |  |  |   |                            |                                     |                             |                             |
|--|------------------|------------------|-------------------------------|---|---|--|--|---|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Casos  | Esquemas         |                  | Anillo Gas ACIDO              |   |   |  | Anillo Gas DULCE   | Ubicación de Planta de Endulzamiento a BT   |                            | Ubicación de Planta Compresora a BT |                             |                             |
|  | Anillo Gas ACIDO | Anillo Gas DULCE | Captación de TODOS los pozos. | Captación de TODOS o CASI TODOS los pozos. Planta = 3,5 MMscfd. | Captación de TODOS los pozos con existencia de línea de anillo que llega a todos los nodos. | Captación de 3,5 MMscfd en el Norte: de pozos con existencia de línea de anillo que llega a los nodos respectivos. | Captación de 3,5 MMscfd en el Sur: de pozos con existencia de línea de anillo que llega a los nodos respectivos. | Captación de TODOS los pozos (cuentan con línea de anillo que llega a todos los nodos). | EBN                        | EBS                                 | EBN                         | EBS                         |
|  |                  |                  |                               | Q = 3,5 MMscfd aprox. + Veniteo                                 |   | Q = 3,5 MMscfd aprox.  | Q = 3,5 MMscfd aprox.  |   | P <sub>cap</sub> = 60 psig | P <sub>cap</sub> = 60 psig          | P <sub>cap</sub> = 140 psig | P <sub>cap</sub> = 120 psig |
| NOTA: se asume que TODOS los pozos poseen línea de producción.   |                  |                  |                               |   |   |  |  |   |                            |                                     |                             |                             |
| <b>A</b>   |                  |                  | TODOS                         |   |   |  |  | TODOS CON Línea   | N                          |                                     | N                           |                             |
| <b>B</b>   |                  |                  | TODOS                         |   |   |  |  | TODOS CON Línea   |                            | S                                   |                             | S                           |
| <b>C</b>   |                  |                  |                               |   | TODOS CON Línea   |  |  | TODOS CON Línea   | N                          |                                     | N                           |                             |
| <b>D</b>   |                  |                  |                               |   | TODOS CON Línea   |  |  | TODOS CON Línea   |                            | S                                   |                             | S                           |
| <b>E</b>   |                  |                  |                               |   |   | NORTE CON Línea 3,5 MMscfd   |  | TODOS CON Línea   | N                          |                                     | N                           |                             |
| <b>F</b>   |                  |                  |                               |   |   |  | SUR CON Línea 3,5 MMscfd   | TODOS CON Línea   |                            | S                                   |                             | S                           |
| <b>G</b>   |                  |                  |                               |   |   |  | SUR CON Línea 3,5 MMscfd   | TODOS CON Línea   |                            | S                                   | N                           |                             |

En la siguiente tabla, a modo simplificado, se resumen los casos evaluados:

|   |  |  |  |  | Q = 3,5 MMscfd aprox.      | Q = 3,5 MMscfd aprox.    |                 | P <sub>op</sub> = 60 psig | P <sub>op</sub> = 60 psig | P <sub>op</sub> = 80 psig | P <sub>op</sub> = 70 psig |
|---|--|--|--|--|----------------------------|--------------------------|-----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| H |  |  |  |  | NORTE CON Línea 3,5 MMscfd |                          | TODOS CON Línea | N                         |                           | N                         |                           |
| I |  |  |  |  |                            | SUR CON Línea 3,5 MMscfd | TODOS CON Línea |                           | S                         | N                         |                           |
| J |  |  |  | SUR CON Línea Pta = 3,5 MMscfd + 2 Venteos             |                            |                          | TODOS CON Línea |                           | S                         | N                         |                           |
| K |  |  |  | CASI TODOS. SUR CON Línea Pta = 3,5 MMscfd + 4 Venteos |                            |                          | TODOS CON Línea |                           | S                         | N                         |                           |

**Tabla 1:** Detalle de Escenarios Evaluado

#### Descripción breve de los casos evaluados:

- Casos A y B: se captan todos los PzGA y PzGD, variando de ubicación las plantas (endulzamiento y compresora). Escenario de máxima.
- Casos C y D: se captan todos los PzGA que llegan a uno de los nodos conectados a una línea existente en campo. Ídem casos A y B para AGD y variación de ubicación de plantas.
- Casos E y F: Ídem C y D pero solo se captan 3,5 MMpcd de GA, que es lo que admite la planta preseleccionada.
- Caso G: Ídem E y F aunque sin trasladar los compresores existentes (descrito en detalle más adelante)
- Casos H e I: Ídem E y G pero trabajando los anillos a menor presión.
- Caso J: versión de máxima con la disposición de plantas del G, pero buscando agregar todas las líneas que sean necesarias en el AGA para llevar al mínimo los puntos de venteo (se llega a 2 de 14 actuales).
- Caso K: Ídem G pero agregando una línea más en el AGA, solo con el fin de disminuir puntos de venteo (se llega a unos 6 de 14 actuales).

#### Ejemplo detallado del escenario "G":

Para cada uno de los casos propuestos se realizó el registro que a continuación se muestra a través del escenario "G", que es el que se optó como el más adecuado y lo cual será justificado más adelante.

La planilla adjunta a continuación (tabla 2) muestra dos campos, izquierda y derecha, que no son más que las dos simulaciones necesarias para componer un caso: una para el AGA y otra para el AGD. Cada una con su diagrama el que muestra valores de presión en psig junto a cada nodo que son los que resultan de la corrida a las condiciones dadas: presión de succión de compresión booster de planta de endulzamiento y caudal de captación en AGA, y presión de succión de compresión de

reinyección en AGD. Con un rombo se identifica la ubicación de la planta de tratamiento (para AGA) y la de reinyección (para AGD).

Se acota la cantidad de pozos que se captan para cada anillo: todos para el AGD y para el AGA solo los que corresponden a los nodos encerrados en el cuadro de trazo punteado.

Primero se procedió a simular el AGA a la presión y caudal mencionados, de la que se obtuvo una cromatografía de mezcla y por lo tanto un valor de % CO<sub>2</sub>. Según la planta de endulzamiento preseleccionada el factor de recuperación de hidrocarburo (en adelante HC) es del 20%. Con lo cual el 20% del caudal de entrada a la planta se transforma en GD con 15% de CO<sub>2</sub> (también de especificación de planta al igual que la croma mostrada en azul), a éste se le resta el consumo de compresión booster, y el restante es inyectado al AGD (representado con línea punteada azul) y el restante ácido se ventea por completo.

El AGD recibe el gas de todos los pozos que aportan este gas más el recuperado del 20% mencionado. El caudal total, su cromatografía (de la mezcla), la presión de trabajo, el consumo aproximado de compresión y el remanente a reinyectar a FmGD son detallados en planilla.

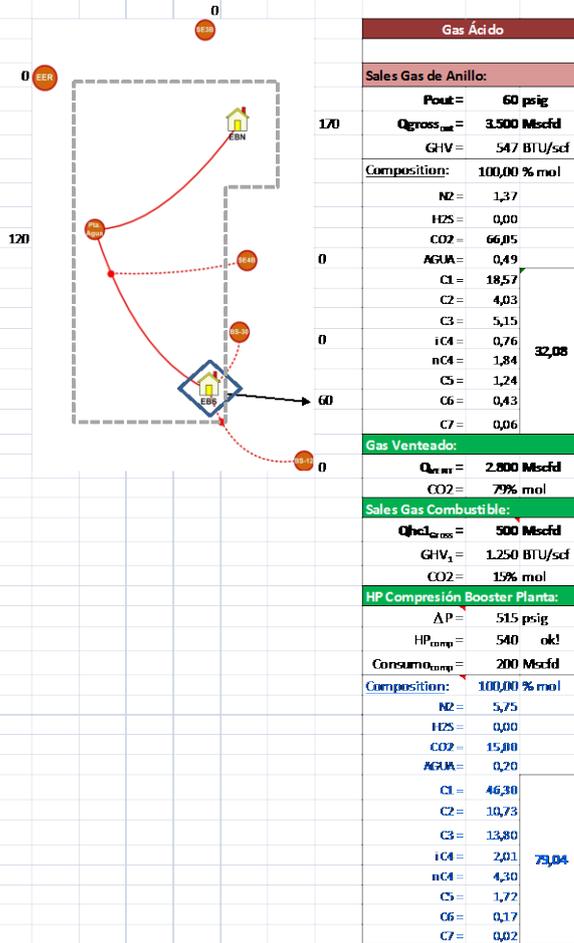
De esta manera se tiene toda la información técnica necesaria para evaluar los anillos, para cada caso.

Casos G

Anillo de Gas **ÁCIDO** (CO<sub>2</sub> > 70%)

**G.1** Planta (endulzamiento) en EBSur:

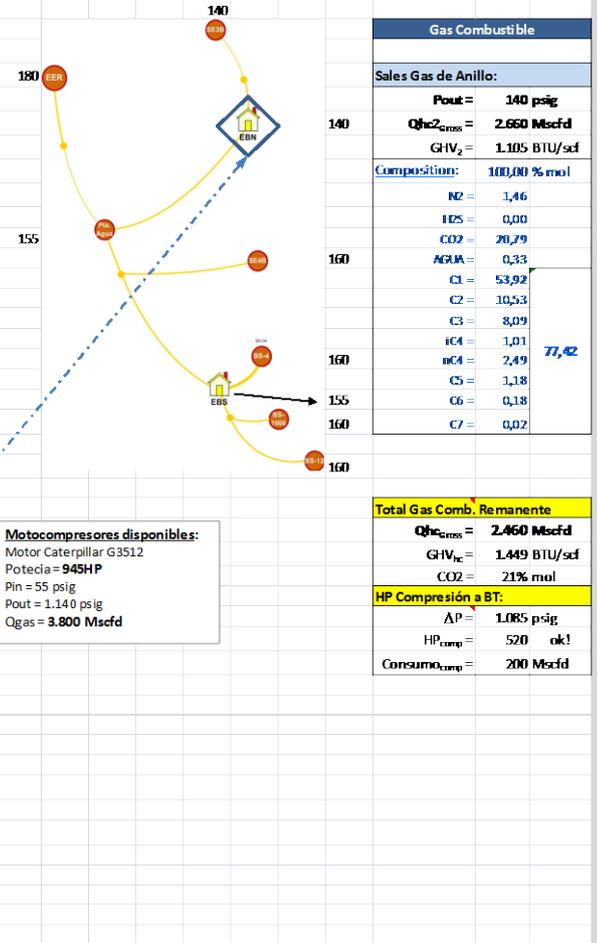
- Valores de presiones en [psig] junto al nodo respectivo.
- Recuperación de HC: 20%
- Captación de 3,5 MMscfd en el SUR, CON LINEA de anillo **EXISTENTE**.
- Se inyecta al anillo de gas combustible para llevarlo hasta el Norte.



Anillo de Gas **DULCE** (CO<sub>2</sub> < 20%)

**G.2** Planta (compresión) en EBNorte:

- Valores de presiones en [psig] junto al nodo respectivo.
- Captación de **TODOS** los POZOS de gas dulce.



**Motocompresores disponibles:**  
 Motor Caterpillar G3512  
 Potencia = 945HP  
 Pin = 55 psig  
 Pout = 1.140 psig  
 Qgas = 3.800 Mscfd

Tabla 2: Ejemplo de análisis, caso G.

Para cada uno de los casos, y en base a la información ya obtenida más la relevada de campo, se elabora un registro-resumen con los parámetros característicos que los definen y, en esta etapa, adicionando un primer presupuesto, que se detallará a continuación en el punto 9.3.

| Parámetros Caso G                                    |  |               |     |
|--|--|---------------|-----|
| <b>Planta de Endulzamiento de Gas</b>                |  |               |     |
| <b>INLET</b>   |  |               |     |
| Q <sub>in</sub>                                      |  | 3.500 Mscfd   |     |
| CO <sub>2</sub> <sub>in</sub>                        |  | 66 %mol       |     |
| GVH <sub>in</sub>                                    |  | 547 BTU/scf   |     |
| P <sub>in</sub>                                      |  | 60 psig       |     |
| Comp. Booster 55 a 570 psig                          |  | 540 HP        | ok! |
| <b>OUTLET</b>  |  |               |     |
| Q <sub>comb</sub> <sub>out</sub>                     |  | 500 Mscfd     |     |
| CO <sub>2</sub> <sub>Comb out</sub>                  |  | 15 %mol       |     |
| GVH <sub>Comb out</sub>                              |  | 1.250 BTU/scf |     |
| Q <sub>vent</sub> <sub>out</sub>                     |  | 2.800 Mscfd   |     |
| CO <sub>2</sub> <sub>vent out</sub>                  |  | 79 %mol       |     |
| Q <sub>comb</sub> <sub>out</sub> / Q <sub>in</sub>   |  | 14 %          |     |
| P <sub>out</sub>                                     |  | 570 psig      |     |
| <b>Captación Gas Combustible de Anillo</b>           |  |               |     |
| Q  |  | 2.660 Mscfd   |     |
| CO <sub>2</sub>                                      |  | 21 %mol       |     |
| GVH  |  | 1.105 BTU/scf |     |
| P  |  | 140 psig      |     |
| <b>Planta Compresora Gas Remanente - Reinyección</b> |  |               |     |
| Q  |  | 2.460 Mscfd   |     |
| Comp. Booster 55 a 1140 psig                         |  | 520 HP        | ok! |
| CO <sub>2</sub>                                      |  | 21 %mol       |     |

Tabla 3: Consolidado de parámetros técnicos, caso G

### 9.3. Análisis económico macro

Cada escenario se evaluó económicamente a un nivel “macro”, esto quiere decir que el grado de precisión es el necesario para una evaluación del tipo *Pasa-No Pasa*, o lo que sería un Tipo IV según la clasificación de la AACE International.

A tal efecto se tomaron valores de referencia de mercado y se armó un presupuesto comparativo entre los distintos escenarios. Este costeo se dividió en tres grandes campos:

Planta de remoción de CO<sub>2</sub>: incluye el valor escalado de la planta propiamente dicha de acuerdo al caudal considerado y entregada en sitio, más el correspondiente montaje.

Planta reinyectora: ídem anterior, con la diferencia que el valor de compra es “cero” porque se aprovechan equipos existentes, uno fuera de servicio y el otro cumpliendo actualmente la función de reinyección a formación pero con capacidad obsoleta. Solo se presupuestan costos de adecuación de piping y/o reubicación de equipos si correspondiere.

Completación de anillos, flowlines y compresores en bdp: incluye el costo del agregado de líneas para completar los anillos y un estimado menor respecto a flowlines (no relevado para esta etapa y considerando que mayormente están en buenas condiciones ya que los pozos se encuentran en operación). También se agregan montajes de compresores en boca de pozo (tipo de viga; BGC) en aquellos casos en que la simulación muestra elevadas presiones (> a presión media de operación) en algún nodo. Es una manera de “castigar” unos casos respecto a otros. Para esto se considera que c/BGC puede comprimir 300 Mpcd a un DP = 120 a 200 psig.

Finalmente el CAPEX estimado para cada caso se comparó con el disponible en presupuesto para cerrar el análisis técnico-económico y tomar una decisión.

| CAPEX   |      |               |               |              |               |              |              |              |               |              |              |              |
|---|------|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| <b>Planta de remoción de CO2:</b>                 | MUSD | 3,090         | 2,840         | 2,230        | 1,980         | 1,750        | 1,500        | 1,500        | 1,500         | 1,500        | 1,750        | 1,500        |
| Planta paquetizada en sitio                       | MUSD | 2,370         | 2,370         | 1,650        | 1,650         | 1,250        | 1,250        | 1,250        | 1,250         | 1,250        | 1,250        | 1,250        |
| Montaje + piping                                  | MUSD | 720           | 470           | 580          | 330           | 500          | 250          | 250          | 250           | 250          | 500          | 250          |
| <b>Planta reinjectora:</b>                        | MUSD | 280           | 330           | 280          | 330           | 280          | 330          | 280          | 280           | 280          | 280          | 280          |
| Motocompresor (2 equipos; existentes x 94)        | MUSD | 0             | 0             | 0            | 0             | 0            | 0            | 0            | 0             | 0            | 0            | 0            |
| Montaje + piping                                  | MUSD | 280           | 330           | 280          | 330           | 280          | 330          | 280          | 280           | 280          | 280          | 280          |
| <b>Completación anillos, flowlines y comp. Bc</b> | MUSD | 2,235         | 2,545         | 345          | 1,115         | 275          | 635          | 415          | 2,655         | 755          | 335          | 475          |
| Dulce (4")  | MUSD | 45            | 45            | 45           | 45            | 45           | 45           | 45           | 45            | 45           | 45           | 45           |
| Acido (4")  | MUSD | 1,140         | 1,140         | 20           | 20            | 20           | 20           | 20           | 2,400         | 500          | 20           | 20           |
| Flowlines pozos gas comb. (4")                    | MUSD | 140           | 140           | 140          | 140           | 140          | 140          | 140          | 140           | 140          | 140          | 140          |
| Flowlines pozos gas ácido (4")                    | MUSD | 140           | 140           | 140          | 140           | 70           | 70           | 70           | 70            | 70           | 70           | 70           |
| Comp. booster en bdp (BGC's)                      |      | 770           | 1,080         | 0            | 770           | 0            | 360          | 140          | 0             | 0            | 0            | 140          |
| Cambio PCV's gas comb. en equipos                 | MUSD | 0             | 0             | 0            | 0             | 0            | 0            | 0            | 0             | 0            | 60           | 60           |
| Misceláneos (15%)                                 | MUSD | 835           | 855           | 435          | 515           | 345          | 365          | 330          | 665           | 375          | 355          | 340          |
| <b>Total CAPEX =</b>                              | MUSD | <b>6,440</b>  | <b>6,570</b>  | <b>3,290</b> | <b>3,940</b>  | <b>2,650</b> | <b>2,830</b> | <b>2,525</b> | <b>5,100</b>  | <b>2,910</b> | <b>2,720</b> | <b>2,595</b> |
| <b>Total Budget (Anexo B)=</b>                    | MUSD | <b>2,450</b>  | <b>2,450</b>  | <b>2,450</b> | <b>2,450</b>  | <b>2,450</b> | <b>2,450</b> | <b>2,450</b> | <b>2,450</b>  | <b>2,450</b> | <b>2,450</b> | <b>2,450</b> |
| <b>Saldo Budget vs. CAPEX =</b>                   | MUSD | <b>-3,990</b> | <b>-4,120</b> | <b>-840</b>  | <b>-1,490</b> | <b>-200</b>  | <b>-380</b>  | <b>-75</b>   | <b>-2,650</b> | <b>-460</b>  | <b>-270</b>  | <b>-145</b>  |
| <b>Ranking</b>                                    |      | <b>9°</b>     | <b>10°</b>    | <b>6°</b>    | <b>7°</b>     | <b>2°</b>    | <b>4°</b>    | <b>1°</b>    | <b>8°</b>     | <b>5°</b>    | <b>3°</b>    | <b>1°bis</b> |

Tabla 4: Comparativa de inversión de CAPEX.

La fila denominada Ranking categoriza preferencia respecto a cuánto se ajustan al presupuesto.

## 10. Conclusión: Selección de alternativa

**El Caso "G" resultó la mejor alternativa:** satisface los objetivos principales planteados inicialmente con una inversión en el orden de los montos disponibles. El excedente de 75 MUSD mostrado está dentro del margen de error del tipo de presupuesto realizado.

Para validar la factibilidad financiera de la alternativa seleccionada se realizó una evaluación mediante el valor presente del flujo de caja futuro a raíz de la inversión a realizar. Para la evaluación se tomó como parámetro el costo de la energía, que en la actualidad representa gran relevancia en la toma de decisiones de inversiones. Considerando que uno de los principales objetivos del proyecto es la recuperación de GD proveniente de la corriente de GA es posible considerar, a los efectos de evaluación del proyecto, como un ingreso para la empresa el diferencial de GD disponible para consumo (que podría ser vendido en un caso teórico en el mercado) a raíz de realizar el tratamiento de endulzamiento y recuperación de gas combustible.

La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos en el análisis de valor actual neto (VAN) donde se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

- **CAPEX:** inversión en instalaciones a realizar.
- **OPEX:** costos operativos estimados a lo largo de 8 años de producción (incluye el recambio de membranas cuya vida útil se calcula en 5 años de acuerdo a datos del fabricante)
- **INGRESOS:** se considera un precio del gas de 4 U\$D/MMBTU.
- **WACC (tasa de descuento):** 13.05%

Se observa que el VAN del proyecto es positivo en U\$D 0.9 MM con una TIR del 30%. Asimismo se realizó un análisis de sensibilidad considerando como variable el precio del gas. Del análisis de la Fig. 17 se observa que si el precio del gas desciende un 25% (a 3 U\$D/MMBTU) el proyecto comienza a otorgar un VAN negativo.

| Flujo de Fondos                 |                 |              |
|---------------------------------|-----------------|--------------|
| EBITDA                          | MM\$            | 6.8          |
| CAPEX                           | MM\$            | (2.5)        |
| <u>Impuesto a las Ganancias</u> | <u>MM\$</u>     | <u>(1.5)</u> |
| Flujo de Fondos                 | MM\$            | 2.8          |
| Flujo de Fondos Descontado      | MM\$            | 0.9          |
| <b>VAN</b>                      | <b>0.9 MM\$</b> |              |
| <b>TIR</b>                      | <b>30%</b>      |              |

Tabla 5: VAN del caso G

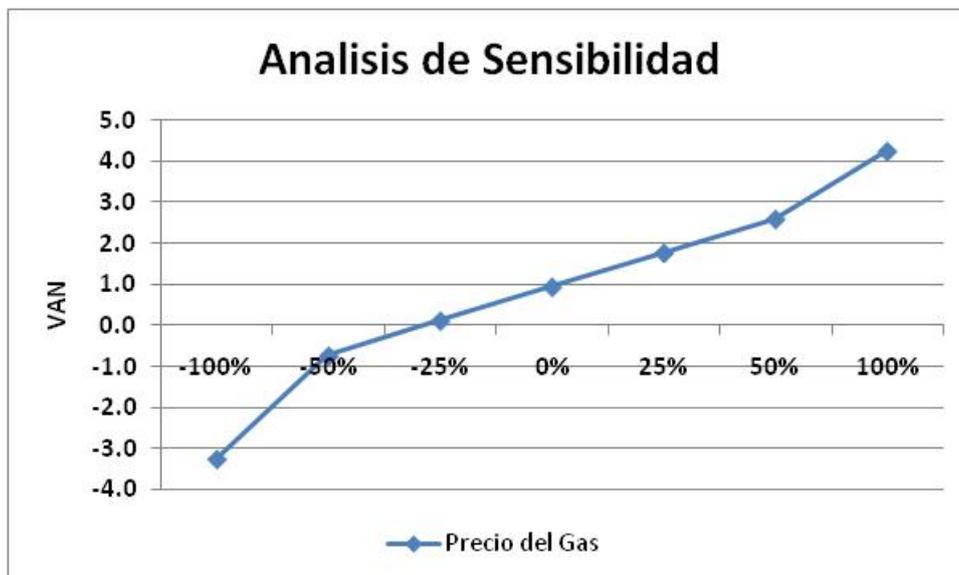


Fig. 17: Análisis de sensibilidad del caso G.

La alternativa "I" es también una interesante opción, ya que es la misma que la alternativa "G" pero operando el AGD a menor presión, lo que es siempre un beneficio ya que, dependiendo el caso, o bien permiten operar los separadores a menor presión, o bien necesitan menos potencia de compresión o, cuando el gas es tomado directamente del anular (que actúa como separador de fondo en el caso de bombeo mecánico y BES) mejorar la eficiencia. Conviene aclarar que el hecho de reducir la presión de operación del anillo no genera problemas en los motores que consumen de él, ya que entre anillo y motores existen reguladoras de presión que la reducen a cuestión de unas pocas psig.

En todos estos casos conviene aclarar que son claros beneficios que redundarían en mayor producción o ahorro de compra de gas para generación de energía pero que no están análisis con un grado de detalle elevado. Consideramos que estos aspectos son para una evaluación más detallada y posterior a la realizada para esta etapa.

De cualquier manera, el caso "I" tiene una gran contra operativa y es que al trabajar a menor presión el anillo "almacena" menor cantidad de gas, y ante cualquier problema operativo (p.e. caída de algunos pozos, roturas en anillo, etc.) se reduce su capacidad de "pulmón" y por tanto el tiempo disponible para dar solución al inconveniente. De ahí que queda como segunda mejor opción.

Fig. 18 y Fig. 19 muestran de distinta manera cómo quedarían las instalaciones luego de implementar las conclusiones de este estudio, según el caso G.

La planta de endulzamiento se montará en la EBS, utilizando el compresor disponible en dicha locación como booster comprimiendo 3,5 MMpcd a  $> 70\%$   $\text{CO}_2$  y del cual la planta recupera un 0,7 MMpcd con  $< 15\%$  de  $\text{CO}_2$  el que es inyectado al AGD, logrando un total de GD disponible de 4,7 MMpcd a  $22\%$  de  $\text{CO}_2$  aprox. Este anillo no sufre modificaciones estructurales respecto al actual.

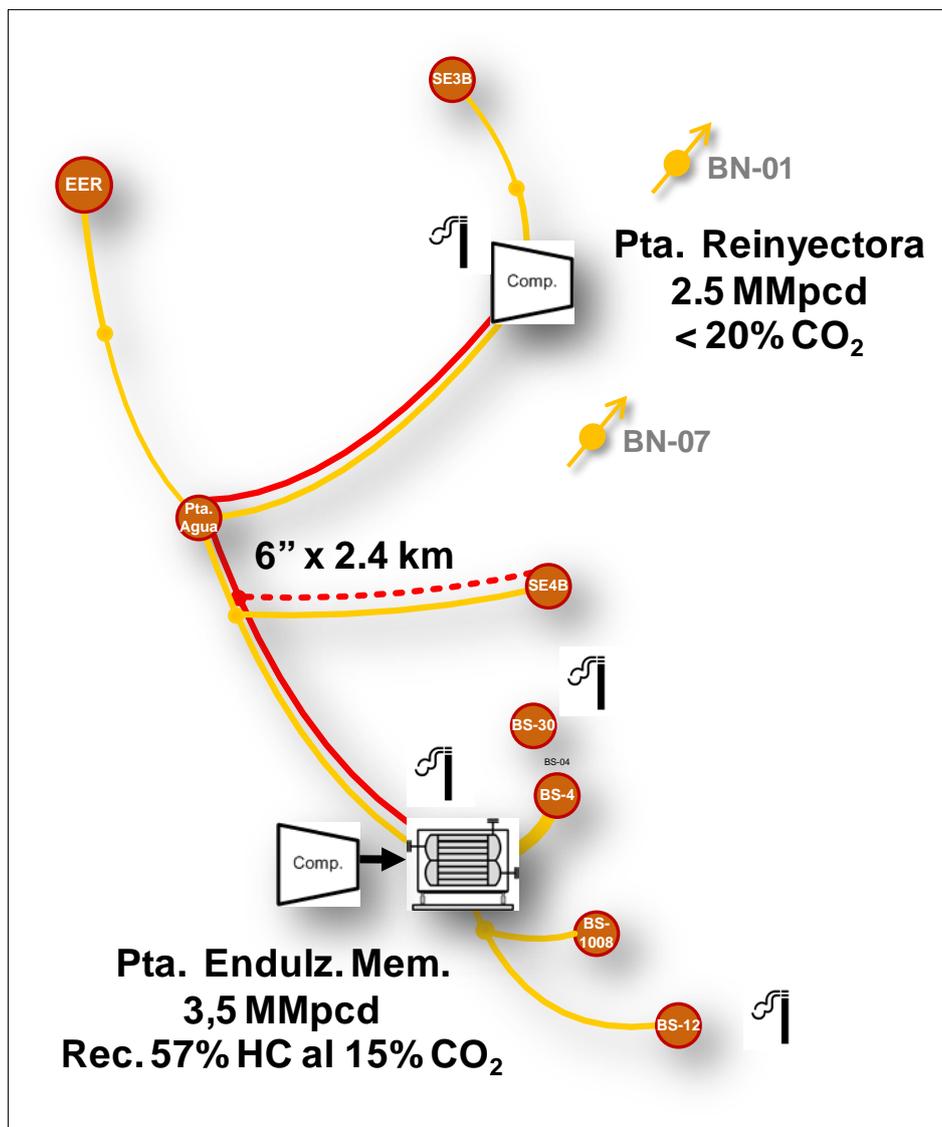


Fig. 18: Esquema final resultante. Caso G.

Se eliminan los venteos de GD, de manera que del total mencionado son consumidos en generación y compresión, reinyectando a formación los restantes 2,5 MMpcd con compresor disponible en su ubicación actual (EBN) y utilizando los mismos pozos inyectoros vigentes.

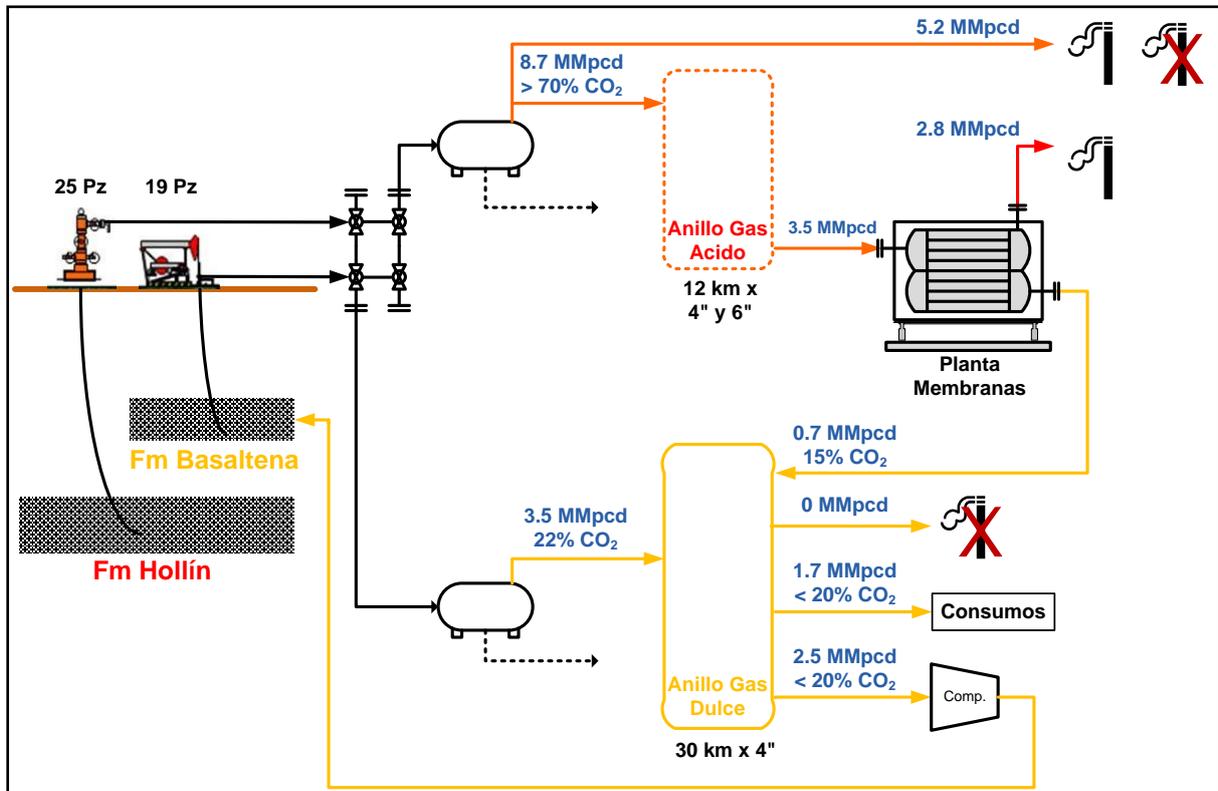


Fig. 19: Esquema final resultante. Caso G.