

ANÁLISIS TÉCNICO DEL TRATAMIENTO DE UN GAS POBRE EN PLANTA EN  
FUNCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL GAS DE ENTRADA

FERNANDO PAVA SAAVEDRA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS  
BUCARAMANGA

2018

ANÁLISIS TÉCNICO DEL TRATAMIENTO DE UN GAS POBRE EN PLANTA EN  
FUNCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL GAS DE ENTRADA

FERNANDO PAVA SAAVEDRA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS

DIRECTOR

GERMÁN GONZÁLEZ SILVA

DOCTOR OF CHEMICAL ENGINEERING

CODIRECTOR

NATALIA PRIETO JIMÉNEZ

MASTER OF CHEMICAL ENGINEERING

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
MAGÍSTER EN INGENIERÍA DE PETRÓLEOS Y GAS  
BUCARAMANGA

2018

## **AGRADECIMIENTOS**

Expreso mis agradecimientos:

Al Doctor Emiliano Ariza León coordinador del programa de Maestría en Ingeniería de Petróleos y Gas, a la Ingeniera Helena Margarita Ribon Barrios; por la orientación, constante seguimiento, aportes e ideas que contribuyeron a la realización de este proyecto.

Al Doctor Germán González Silva y a la Ingeniera Natalia Prieto Jiménez por el apoyo continuo durante la elaboración y desarrollo del trabajo.

Al Grupo de profesionales de la Segunda cohorte del programa académico de la Maestría en Ingeniería de Petróleos y Gas de la Escuela de Ingeniería de Petróleos, por sus críticas constructivas, colaboración, profesionalismo y excelente calidad humana.

A la Universidad Industrial de Santander, la Escuela de Ingeniería de Petróleos y grupo de docentes por la formación académica, humana y profesional a lo largo del programa de Maestría.

## DEDICATORIA

A Dios todo poderoso por cada una de las bendiciones recibidas durante este proceso de formación.

A mis padres y hermano, por su amor incondicional, por hacerme mejor persona día a día, por cada uno de sus consejos, frases y palabras de aliento en los momentos difíciles.

A todas las personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este objetivo, amigos, familiares, compañeros de trabajo, gracias por las opiniones, sugerencias y críticas constructivas, gracias, por tanto.

A mis amigos y compañeros: Vladimir C, Hugo L, Erick T, Reynaldo, excelentes personas y seres humanos, gracias por cada uno de los aportes técnicos y humanos.

*Fernando Dava Saavedra*

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	14
1. OBJETIVOS .....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL .....	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
2 MARCO REFERENCIAL.....	18
2.1 ANTECEDENTES.....	18
2.2 MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL .....	19
2.3 MARCO LEGAL .....	23
3 DESCRIPCIÓN BÁSICA DE LA PLANTA.....	26
3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO.....	26
3.2 GENERALIDADES DEL GAS DE ALIMENTACIÓN. ....	28
3.3 ENDULZAMIENTO. ....	29
3.3.1 Modelo matemático de la planta de endulzamiento .....	32
3.4 DESHIDRATACIÓN.....	36
3.4.1 Modelo matemático de la planta de deshidratación .....	37
4 DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL.....	40
4.1 VARIABLES DE RESPUESTA.....	40
4.2 FACTORES EXPERIMENTALES .....	41
4.3 MATRICES PARA LAS UNIDADES DE ANALISIS.....	43
4.4 ANÁLISIS DE LAS MATRICES.....	45
5 SIMULACION EN SOFTWARE HYSYS .....	49

5.1	DEFINICION DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO .....	49
5.2	SIMULACIÓN DEL ENDULZAMIENTO .....	50
5.3	SIMULACIÓN DESHIDRATACIÓN.....	56
6	ANALISIS DISEÑO EXPERIMENTAL.....	61
6.1	OBTENCIÓN DE DATOS UNIDAD ENDULZAMIENTO .....	61
6.2	OBTENCIÓN DE DATOS UNIDAD DESHIDRATACIÓN.....	72
7	CONCLUSIONES .....	77
	BIBLIOGRAFÍA.....	80

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de Planta de Endulzamiento de Gas Natural.....	22
Figura 2. Absorción con Glicol. ....	23
Figura 3. Esquema básico del funcionamiento de la planta.....	27
Figura 4 Diagrama de Flujo para Remoción de Gases Ácidos con Amina utilizando el software hysys. ....	31
Figura 5. Simulación en hysys del proceso de deshidratación .....	37
Figura 6. Diagrama general del tratamiento de gas .....	50
Figura 7. Diagrama de proceso de endulzamiento. ....	52
Figura 8. Diagrama de la simulación de deshidratación. ....	58
Figura 9. Diagrama de Pareto para contenido de H <sub>2</sub> S. ....	65
Figura 10. Efectos principales para el contenido de H <sub>2</sub> S. ....	67
Figura 11. Diagrama de Pareto para la concentración de CO <sub>2</sub> (%volumen) .....	71
Figura 12. Efectos principales para Porcentaje de CO <sub>2</sub> (%volumen) .....	72
Figura 13. Interacción entre los factores principales.....	76

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones Gas natural numeral 6.3 Resolución 071 de CREG 1999 .....	24
Tabla 2. Condiciones de las corrientes de entrada a las plantas de tratamiento. ...	28
Tabla 3. Composición del gas de alimentación.....	29
Tabla 4. temperatura de degradación para algunos glicoles. ....	38
Tabla 5. Factores y respectivos niveles diseño experimental factorial.....	43
Tabla 6. Matriz de combinaciones para la primera unidad.....	44
Tabla 7. Matriz de combinaciones para la segunda unidad .....	44
Tabla 8. Parámetros a estimar .....	45
Tabla 9. ANOVA para análisis factorial con tres factores. ....	47
Tabla 10. Condiciones de operación de equipos planta de endulzamiento. ....	54
Tabla 11. Características de diseño de los equipos principales de la planta de endulzamiento.....	55
Tabla 12. Características de diseño de los equipos principales de la planta de deshidratación.....	59
Tabla 13. Características de diseño de los equipos principales de la planta de deshidratación.....	60
Tabla 14. Composiciones de análisis en la corriente de entrada caso amina.....	62
Tabla 15. Datos obtenidos simulación hysys contenido de H <sub>2</sub> S. ....	62
Tabla 15. (Continuación) Datos obtenidos simulación hysys contenido de H <sub>2</sub> S. ...	63
Tabla 17. Definición de la variable de respuesta. ....	63
Tabla 18. Definición de variables. ....	63
Tabla 19. Resumen de análisis ANOVA H <sub>2</sub> S.....	64
Tabla 20. Medias para contenido H <sub>2</sub> S con 95% Intervalos de confianza.....	65
Tabla 20. (continuación) Medias para contenido H <sub>2</sub> S con 95% Intervalos de confianza. ....	66

Tabla 22. Composiciones de análisis en la corriente de entrada caso amina retiro CO <sub>2</sub> .	67
Tabla 23. Datos obtenidos simulación hysys contenido de CO <sub>2</sub> .	68
Tabla 24. Definición de la variable de respuesta caso CO <sub>2</sub> .	69
Tabla 25. Definición de los factores experimentales caso CO <sub>2</sub> .	69
Tabla 26. Resumen ANOVA caso CO <sub>2</sub> .	69
Tabla 27. Medias para Porcentaje CO <sub>2</sub> (volumen%) con 95% Intervalos de confianza.	70
Tabla 27. (continuación) Medias para Porcentaje CO <sub>2</sub> (volumen%) con 95% Intervalos de confianza.	71
Tabla 29. Datos obtenidos simulación hysys contenido de H <sub>2</sub> O.	72
Tabla 30. Definición variable de respuesta caso Glicol.	73
Tabla 31. Definición de los factores experimentales caso Glicol.	73
Tabla 32. Resumen ANOVA contenido de H <sub>2</sub> O en Gas seco.	74
Tabla 33. Resultados de las medias obtenidas en el software de simulación.	75

## RESUMEN

**TITULO DEL PROYECTO: ANÁLISIS TÉCNICO DEL TRATAMIENTO DE UN GAS POBRE EN PLANTA EN FUNCIÓN DE LA VARIACIÓN DEL GAS DE ENTRADA\*.**

**AUTOR:** Fernando Pava Saavedra\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Gas natural, Aspen Hysys, endulzamiento, deshidratación, gases ácidos, análisis estadístico.

Frente a las variaciones de las concentraciones de gases ácidos en el gas de alimentación de una planta de tratamiento de gas, se analizaron diferentes escenarios que indicaran las variables que comprometían el funcionamiento de las plantas de tratamientos (endulzamiento con aminas y deshidratación con glicoles) y así poder determinar una estrategia que contrarrestara dichos cambios desde el diseño inicial, este se apoyó de un análisis estadístico para determinar con más severidad la interacción de dichas variables entre si y así determinar las más significativas con el fin de encontrar mejores condiciones con el objetivo de cumplir con las condiciones RUT (Reglamento Único de Transporte de Gas Natural) respecto al contenido de humedad (máximo 6.0 Lb/MPCS) y contenido de gases ácidos (2% volumen de CO<sub>2</sub> y de H<sub>2</sub>S 0.25 grano/100PCS).

Se encuentra que por medio de modificaciones como disminución en la temperatura de la amina pobre, disminución en el flujo de glicol, cambio en el tipo de amina; se puede cumplir con los parámetros de calidad sin incurrir en el sobre costo de diseñar una planta para una composición máxima de gases ácidos teniendo presente esta condición desde el diseño, además el análisis estadístico permite evaluar escenarios que antes no estaban en consideración de una manera más sencilla.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Maestría ingeniería de petróleo y gas  
Director(a): Germán González Silva Codirector: Natalia Pietro Jiménez

## ABSTRACT

**PROJECT:** TECHNICAL ANALYSIS OF THE TREATMENT OF A POOR GAS IN PLANT IN FUNCTION OF THE VARIATION OF THE GAS OF ENTRY.\*.

**AUTOR:** Fernando Pava Saavedra\*\*

**KEYWORDS:** Natural gas, Aspen Hysys, sweetening, dehydration, acid gases, statistical analysis.

In front of the fluctuations of acid gases concentrations in the gas, of a gas treatment plant, different scenes were analyzed to indicate the variables that compromise the performance of the treatment plants (sweetening with amines and dehydration with glycols). Develop a strategy that counteracts these changes from the initial design. It was supported by a statistical analysis to determine severely the interaction of these variables among themselves and establish the most significant in order to find better conditions with the objective to accomplish the RUT (Sole Transport Natural Gas Regulation) conditions regarding moisture content (maximum 6 lbm) and acid gas content (2% CO<sub>2</sub> volume and H<sub>2</sub>S 0.25 grain / 100PCS) Colombian regulation base for the national transport of the country in the field of oil and gas.

It is found that whith some modifications such as decrease in the temperature of the poor amine, decrease in the glycol flow, change in the type of amine; It is possible to have the quality parameters without incurring in the overcharge of design a plant for a maximum composition of acid gases keep the initial condition of design, In addition, statistical analysis allows the evaluation of scenarios that were not previously considered in a simpler way.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Physicochemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School. Oil and gas Engineering Magister. Director: Germán González Silva. Codirector: Natalia Pietro Jiménez.

## INTRODUCCIÓN

Inicialmente las plantas son diseñadas bajo ciertas características con el fin de garantizar el tratamiento del gas proveniente de los pozos productores, sin embargo, en el transcurrir del tiempo, la demanda de gas ha venido en aumento, por lo que se ha hecho necesario buscar alternativas que pudiesen cumplir dichos requerimientos, enfocados principalmente en perforar y/o recuperar pozos en pro de aumentar la producción.

La entrada en servicio de pozos productores podría aumentar significativamente el flujo de alimentación en las plantas de tratamiento, incluso encontrando corrientes de gas con variaciones apreciables en su composición, especialmente en las fracciones ácidas ( $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ) a pesar de provenir del mismo yacimiento; estos eventos traen como consecuencia posibles limitaciones en la infraestructura de la planta a la hora de tratar dicho hidrocarburo, minimizando su capacidad de respuesta y realizando procesos poco eficientes. Adicionalmente genera corrosión, daños, subdimensionamiento y/o sobredimensionamiento en los equipos, proporcionando así pérdidas económicas apreciables que golpean fuertemente la sostenibilidad de una compañía.

Por tal motivo se hace necesario estudiar el aumento de flujo de gas de alimentación de la planta, analizando la variación o similitud en los componentes de las nuevas corrientes de gas y las condiciones actuales del proceso, contemplando posibles cambios en la infraestructura de la planta, siempre y cuando sea económicamente viable.

El gas natural es una fuente de energía fósil que ha representado una gran cantidad de avances tecnológicos en los últimos tiempos, actualmente refleja un gran porcentaje del consumo energético mundial, utilizado como materia prima o combustible en el sector industrial, petroquímico, termoeléctrico, doméstico, comercial y de transporte terrestre. La demanda de gas natural está creciendo a nivel nacional e internacional, por ser un combustible económico y ambientalmente limpio.

En las plantas de tratamiento de gas, ocasionalmente se presentan problemas que alteran las condiciones a las que se debe entregar el gas para venta, las cuales debe cumplir parámetros de calidad establecidos por el Reglamento Único de transporte (RUT) estipulado por la Comisión Reguladora de Energía y Gas, para hacer posible su comercialización y distribución; es por eso que se hace necesario el estudio detallado de los equipos que componen la planta de tratamiento, con el fin de evaluar el comportamiento de la misma, cuando se presentan variaciones de las condiciones iniciales de diseño.

El déficit de gas que se avecina por falta de hallazgos de yacimientos de gas y el incremento del consumo energético, puede traer pérdidas económicas, atrasos en el desarrollo industrial de una nación y afectación a comunidades que utilizan diariamente este recurso. Lo anterior ha llevado a empresas del sector a aumentar su capacidad de producción de gas, perforando pozos nuevos o reacondicionando pozos ya existentes para suplir dicha necesidad.

Este trabajo ofrece información técnica que se debe contemplar en el diseño de una planta de tratamiento de gas, cuando es sometida a cambios en la variación de la cantidad y calidad de sus corrientes de entrada, con el fin de entregar un producto que cumpla con las especificaciones de ventas, amigable con el medio ambiente y económicamente viable. Se espera generar recomendaciones que contemplen

posibles cambios o no en la infraestructura de la planta, basados en la capacidad de diseño original.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Analizar técnicamente el tratamiento de un gas pobre en planta, basados en la variación del gas de entrada.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Plantear el caso base de la planta de tratamiento para un gas pobre, bajo endulzamiento usando amina y deshidratación con glicol.
- ✓ Estructurar un diseño experimental factorial fijando las diferentes variables, niveles y unidades requeridas para el análisis de la planta.
- ✓ Ejecutar el diseño experimental mediante simulaciones en la herramienta Hysys.
- ✓ Realizar el análisis de resultados mediante un software estadístico que permita identificar patrones de comportamiento y variables sensibles, para generar recomendaciones y planes de acción.

## 2 MARCO REFERENCIAL

### 2.1 ANTECEDENTES

El tratamiento del gas natural implica el acondicionamiento del gas bruto con el fin de transformarlo en energía útil para las diferentes aplicaciones, se realiza para eliminar impurezas que trae el gas natural, como agua, dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S)<sup>1</sup>.

El análisis de los procesos conlleva a optimizar recursos y asegurar la integridad de los equipos cuando éstos son sometidos a cambios inminentes provocados por la declinación de pozos abastecedores de gas; se han llevado a cabo una serie de investigaciones basadas en simulaciones y procedimientos metodológicos, que al final generan recomendaciones operacionales.

Se realizó un estudio siguiendo una metodología que permitió en primer lugar determinar el comportamiento del proceso y las dificultades presentadas a nivel operacional en planta por el manejo de baja calidad del gas de entrada, y en segundo lugar se propusieron las condiciones operacionales que permitan a la Planta de Extracción Jusepín operar en forma adecuada garantizando calidad e integridad mecánica de los equipos y sistemas que la conforman<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> PEREZ PLATA, Henry Mauricio y HERNÁNDEZ TAMAYO, Watson Marcelo. Optimización de los procesos de fraccionamiento en la planta de gas del Centro a partir del uso de la herramienta Hysys. Colombia: Bucaramanga, 2010.

<sup>2</sup> BENITEZ M. Carlos J. Evaluación de las variables operacionales de la planta de extracción de gas Jusepín en función de la variación en la calidad del gas de alimentación. Caracas, Julio 2006.

Para el montaje de la simulación, fue necesario seguir una serie de pasos que permitieran reproducir un modelo que se ajustara al funcionamiento actual de la planta, y a partir de allí, hacer las evaluaciones de los distintos escenarios como resultado de las variaciones en la calidad del gas de proceso.

Se analizó el comportamiento termodinámico del gas, seguido de la verificación de los equipos y sistemas existentes actualmente en planta, ante las nuevas condiciones operacionales.

## **2.2 MARCO TEÓRICO – CONCEPTUAL**

Usos Del Gas Natural: El gas natural se utiliza como combustible en los sectores industrial, petroquímico, termoeléctrico, doméstico, comercial y de transporte terrestre. Sus principales usos por sector son:

El uso del gas natural como combustible sustituye energéticos como la electricidad, el gas licuado de petróleo (GLP), ACPM, queroseno, fuel oil, crudos pesados y carbón en el área industrial; y electricidad, GLP, queroseno en el sector doméstico y comercial; y gasolina y diésel en el transporte.

Usos Del GLP<sup>3</sup>: El GLP, al ser más pesado que el aire hace que la diferencia de densidad con el aire lo haga descender en vez de ascender como el aire, por lo cual una fuga de GLP, solo se detecta por el olor y, si se acumula en el suelo, presenta un peligro potencial. Al no estar a alta presión, el GLP, se almacena en tanques relativamente livianos, de diversos tamaños y formas, de acuerdo al uso, relativamente fáciles de manipular, se pueden utilizar como:

---

<sup>3</sup> PÉREZ AGUDELO, Helí y POTOSÍ HERNÁNDEZ, Oscar. Estudio técnico para optimizar la producción de condensados de las plantas de gas ventas en el CPF Cusiana, Bucaramanga, 2014.

**Residencial:** Como combustible a través de cilindros de 3/10/15/45 kg o redes de distribución.

**Comercial:** Similar al residencial, pero a mayor escala, para restaurantes, hostelería etc.

**Agropecuaria:** Control de plagas, Secadores de cultivos, Invernaderos, Bombas de riego.

**Industrial:** Industria Alimentaria Electricidad y Energía térmica, Crematorios.

**Petroquímica:** Propileno, Butilenos.

**Transporte:** Vehículos, Buses, Transmilenio etc.

El objetivo del tratamiento del gas producido es alcanzar los requerimientos de calidad exigidos en el reglamento único de transporte de gas natural en Colombia (RUT) para ser comercializado.

El tratamiento de gas para venta, conlleva un proceso de endulzamiento y deshidratación. En ocasiones es necesario el pre tratamiento del gas que entra a la torre contactora de glicol, con el fin de reducir el punto de rocío, incrementar el recobro de condensado en los trenes de crudo y asegurar un gas limpio, libre de partículas ingresando a la torre contactora. El secado de gas es utilizado para: el control de corrosión en el sistema de gas de alta presión, la prevención de formación de hidratos en la corriente de proceso, o cuando ocurra el desfogue del gas de proceso.

Generalmente el gas natural que se produce a nivel mundial contiene  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ <sup>4</sup>, compuestos ligeramente solubles en agua, que cuando se disuelven forman una solución medianamente acidificada, razón por la cual estos compuestos son llamados gases ácidos. Cuando un gas natural excede las especificaciones se

---

<sup>4</sup> BP Statistical Review of World Energy, 2015.

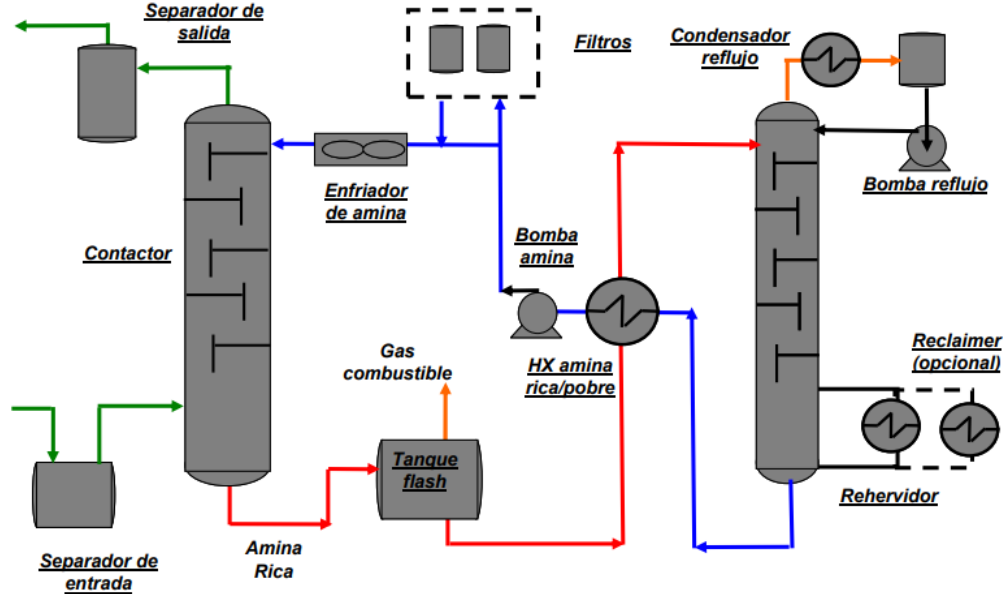
denomina un gas agrio; por el contrario, cuando el contenido de estos compuestos en el gas natural está por debajo de los límites especificados para gas de ventas, se dice que es un gas dulce.

El gas del separador de alta presión se mezcla con la descarga del compresor de gas de proceso y es deshidratado (control de punto de rocío del agua) en las torres contactoras de Trietilenglicol (TEG). El gas entra por el fondo de la columna y luego fluye desde el distribuidor, pasando a través de un lecho de empaque estructural donde en contracorriente, interactúa con el glicol, el cual desciende por la columna a través de la empaquetadura con el fin de alcanzar el contenido de agua que define el RUT: máximo 6 libras de agua por cada millón de pies cúbicos de gas natural requerido para evitar la formación de hidratos dentro del gasoducto.

El proceso de endulzamiento de gas natural consiste en remover los contaminantes ácidos, H<sub>2</sub>S (ácido sulfhídrico) y CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), de una corriente de gas recibido de los pozos productores. Este proceso consiste en la absorción selectiva de los contaminantes, mediante una solución acuosa a base de una formulación de amina, la cual circula en un circuito cerrado donde es regenerada para su continua utilización.

La Figura 3 presenta el proceso de endulzamiento del gas natural. El gas dulce es el producto principal de entrada a las fraccionadoras. Adicionalmente se obtiene una corriente compuesta por el H<sub>2</sub>S (ácido sulfhídrico) y CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), la cual se llama gas ácido, subproducto que serviría para la carga en el proceso para la recuperación de azufre.

Figura 1. Diagrama de Planta de Endulzamiento de Gas Natural.



Fuente: PINO, Fernando. Endulzamiento del gas natural. Universidad de oriente. Monagas, Venezuela. 2011.

La corriente de gas natural contiene agua asociada que se presenta en forma libre (como una fase separada) y en forma de vapor de agua (en solución con el gas). El agua libre puede ser removida mediante métodos de separación simples. El agua en forma de vapor puede ser removida por operaciones de deshidratación. La deshidratación de gas natural es el proceso de remoción de vapor de agua de una corriente de gas para reducir la temperatura de condensación del agua en la corriente (punto de rocío de agua)<sup>5</sup>. En los contratos de ventas de gas natural se debe establecer el valor máximo de contenido de vapor de agua en el gas, bien sea mediante la aplicación de la regulación local, o por común acuerdo entre las partes involucradas.

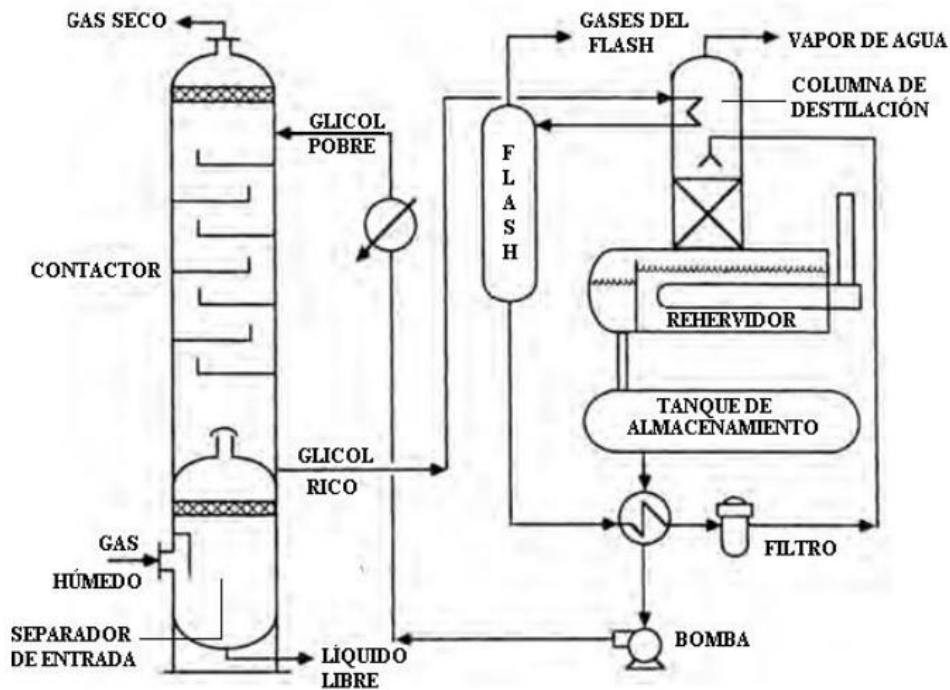
La disminución del punto de rocío del agua hasta valores por debajo de las temperaturas a las cuales estará sometida la corriente de gas natural (durante su

<sup>5</sup> ARNOLD, Ken y STEWART, Maurice. Design of Gas-Handling Systems and Facilities. 2 ed. Houston (TX). Gulf Publishing Company, 1999. 569 p. (Surface Production Operations; v. 2). ISBN 0-88415-822 5.

transporte) previene la formación de hidratos o el riesgo de corrosión en las líneas de transporte<sup>6</sup>.

Los dos métodos más comunes para la deshidratación del gas natural son: absorción con glicol mostrado en la Figura 2 (desecantes líquidos) y adsorción con lechos sólidos (desecantes sólidos).

Figura 2. Absorción con Glicol.



Fuente: Adaptado de GPSA<sup>7</sup>

## 2.3 MARCO LEGAL

El Ministerio de Minas y energías de la República de Colombia, a través de la Comisión de Regulación de Energía y Gas y mediante la resolución CREG 071 de 1999<sup>8</sup>, adoptó el Registro Único de Transporte de Gas Natural – RUT – donde se establecen las 31 especificaciones de calidad (se muestran en la Tabla 1 ) que

<sup>6</sup> CARROLL, John. Natural Gas Hydrates - A Guide for Engineers. 2 ed. Houston (TX). Gulf Publishing Company, 2009. 276 p. ISBN 978-0-7506- 8490-3.

<sup>7</sup> GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION - GPSA. Engineering Databook. 12 ed., Tulsa, 2004.

<sup>8</sup> [goo.gl/MSW8ke](http://goo.gl/MSW8ke)

debe cumplir el gas para ser inyectado al sistema nacional de transporte. Las especificaciones de calidad hacen referencia a propiedades físicas y su establecimiento obedece a consideraciones de confiabilidad de la infraestructura de transporte y suministro a consumidores y usuarios finales, que permitan su transporte por tuberías a alta presión y grandes distancias a temperatura ambiente, sin que se formen líquidos, los cuales pueden causar corrosión, formación de hidratos o baches de líquido (*slugs*).

Tabla 1. Especificaciones Gas natural numeral 6.3 Resolución 071 de CREG 1999

ESPECIFICACIONES	SISTEMA INTERNACIONAL	SISTEMA INGLÉS
Máximo poder calorífico bruto (GHV) (Nota 1)	42.8 MJ/m <sup>3</sup>	1.150 BTU/ft <sup>3</sup>
Mínimo poder calorífico bruto (GHV) (Nota 1)	35.4 MJ/m <sup>3</sup>	950 BTU/ft <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 de 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/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49 °C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	7.2 °C	40 °F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión (Nota 4)	1.6 mg/m <sup>3</sup>	0.7 grano/1000 pc

El RUT no estableció originalmente, en forma explícita, un valor para el parámetro de temperatura del punto de rocío hidrocarburo (HCDP), pero definió la temperatura mínima de entrega en 40°F (la mínima temperatura a la cual el transportador puede entregar el gas a los usuarios finales) y adicionalmente se debe garantizar que el gas no debe formar líquidos bajo las condiciones de operación críticas del sistema nacional de transporte. Estas dos especificaciones establecían en forma implícita

que la temperatura cricondentérmica (Temperatura del gas a cualquier presión donde no existe fase líquida) del gas natural no debería exceder los 40°F.

### **3 DESCRIPCIÓN BÁSICA DE LA PLANTA BASE DE ESTUDIO**

Este capítulo contiene la identificación de la planta para la simulación estacionaria del tratamiento del gas, con el fin de tener a la salida, un gas de venta en condiciones normativas que permita ser inyectado a los gasoductos de distribución en Colombia. Se caracteriza el gas de alimentación y se definen las plantas de endulzamiento y deshidratación.

#### **3.1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO.**

Como supuestos generales para la implementación de los equipos y procesos, se tuvieron en cuenta las siguientes condiciones:

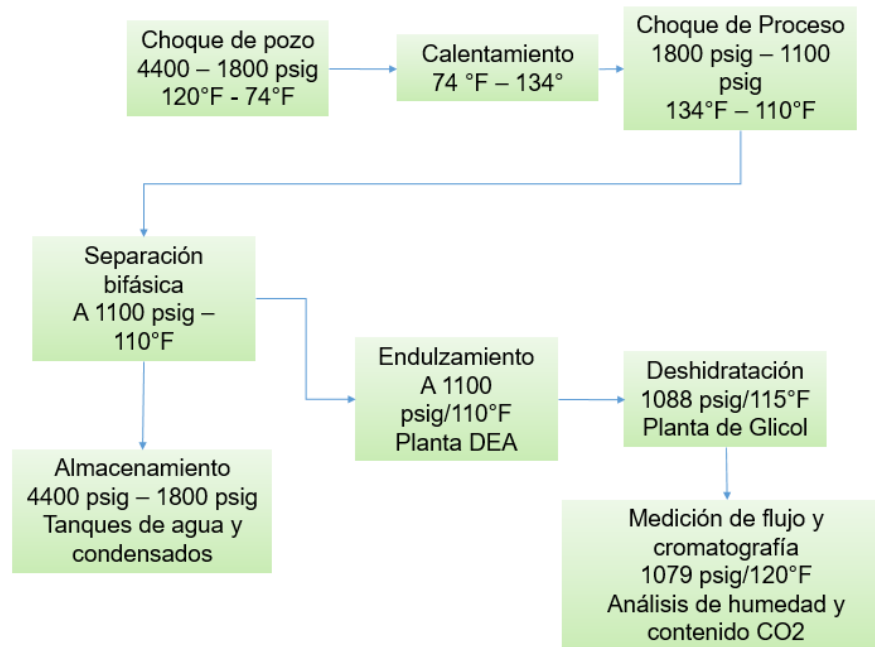
- Temperatura ambiente: 25°C.
- Temperatura del aire para Aero-enfriadores: 25 °C.
- Eficiencia en equipos rotativos (bombas) 75%.
- La presión de trabajo de las torres de absorción y deshidratación estará entre 1100 y 1150 psia.
- La presión de trabajo de las torres de regeneración de amina y Glicol se establece entre 80 y 14 psi.
- Máxima caída de presión en intercambiadores: 10 psi.

El funcionamiento de la planta base se puede simular mediante la recolección de datos operacionales (presión, temperatura, flujo y composición) de algunas corrientes típicas encontradas en la literatura, además de la recolección de datos técnicos de los equipos que intervienen en el proceso. Esto con el fin de reproducir un modelo que se ajuste a dichos equipos y obtener resultados que puedan verificarse con casos reales. Una vez el modelo se ajuste a la realidad, se pueden variar las condiciones del gas de alimentación, ajustando los parámetros

operacionales de los equipos y sistemas que permitan el análisis de diferentes opciones frente a estos cambios en la corriente alimentación.

En la Figura 3 muestra el esquema de funcionamiento de la planta, se observa que el gas de alimentación se extrae del pozo a una presión de 4000 psig y se reduce su presión a 1800 psig lo que produce una reducción abrupta de la temperatura, luego se hace un proceso de calentamiento para que el gas no se condense y pueda tratarse de mejor manera, posteriormente se repite el proceso de reducción de presión de 1800 psig a 1100 psig con el objetivo que entre a la planta de tratamiento con la presión adecuada para no generar daños en la infraestructura, se realiza la separación bifásica del gas a 1100 psig y 110 °F con el fin de tratar solo el gas en las plantas de endulzamiento y deshidratación.

Figura 3. Esquema básico del funcionamiento de la planta.



Los tratamientos de la planta analizada se realizaron de la siguiente manera, el endulzamiento se realiza con DEA (Dietanolamina) en contacto a contracorriente y

la deshidratación se plantea realizar con TEG, para así cumplir las especificaciones RUT para gas de venta.

Este trabajo se desarrolló para tres variaciones de flujos de operación, con el objetivo de comparar los resultados obtenidos en cada uno de éstos y establecer criterios unidos o extrapolables a otras condiciones de diseño. En la Tabla 2 se presentan las condiciones de entrada del gas natural, a la planta de tratamiento.

Tabla 2. Condiciones de las corrientes de entrada a las plantas de tratamiento.

Condición	Unidades	Flujo bajo	Flujo medio	Flujo alto
Flujo a la entrada	MMSCFD	5	10	15
Presión	Psia	1100		
Temperatura	°F	110°		

### 3.2 GENERALIDADES DEL GAS DE ALIMENTACIÓN.

Los fluidos de producción procedentes del pozo ingresan a la planta a través de una línea de 3 in; se requiere realizar un calentamiento previo para evitar la formación de hidratos, para esto se conduce el gas hacia el calentador para elevar su temperatura a 134 °F, lo que evita la formación debida a la disminución de presión en los choques, posteriormente pasa al *scrubber* en el que se realiza la separación del gas y los líquidos asociados, a continuación el proceso lleva su recorrido por la planta de endulzamiento donde se retira el contenido de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S hasta cumplir con las especificaciones del RUT por último se deshidrata; finalmente se envía al gasoducto como gas de venta.

Para el desarrollo de este proyecto se definió la composición de un gas de entrada que se muestra en Tabla 3, a la planta de tratamiento: con una concentración de contaminantes e hidrocarburos que se encuentran en el intervalo normal de un gas a tratar y con un contenido de agua que permita tener un gas natural saturado.

Tabla 3. Composición del gas de alimentación.

Componentes	Descripción	Fracción Molar
N <sub>2</sub>	NITROGENO	0.0089
CO <sub>2</sub>	DIOXIDO DE CARBONO	0.0948
H <sub>2</sub> S	ACIDO SULFIHIDRICO	0.067
C1	METANO	0.816
C2	ETANO	0.0061
C3	PROPANO	0.0012
i-C4	I-BUTANO	0.0004
n-C4	n-BUTANO	0.0002
i-C5	i-PENTANO	0.0002
n-C5	n-PENTANO	0.0001
C6	HEXANO	0.0001
C7	HEPTANO	0.0001
H <sub>2</sub> O	AGUA	0.0049
TOTAL		1

Se identifica la corriente de gas de alimentación como una corriente de gas amargo y pobre, el cual fluirá por la planta de tratamiento de gas con un caudal base de 10 MMSCFD, además se mantiene la presión y la temperatura de 1100 psig y 110 F a lo largo del proceso.

### 3.3 ENDULZAMIENTO.

La primera etapa se da después de pasar por el *scrubber* El gas libre de condensados a alta presión ingresa a una torre de absorción donde se pone en contacto a contracorriente con una solución de Dietanolamina (DEA) que ingresa por la cima para retirar los gases ácidos CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S. El gas dulce debe salir a

condiciones RUT:  $\text{CO}_2 < 2\%$  en volumen y  $\text{H}_2\text{S} < 0,25$  grano/100 PCS. La remoción de estos gases presentes en el gas de proceso puede realizarse de las siguientes maneras:

- Procesos con solventes químicos.
- Procesos con solventes físicos.
- Procesos con solventes híbridos o mixtos.
- Procesos de conversión directa.
- Procesos de lecho sólido o seco.

El proceso que se trabajó en el proyecto fue con Solventes Químicos<sub>1</sub>, en estos procesos, el gas que se va a tratar se pone en contacto en contracorriente con una solución de un componente activo que reacciona con los gases ácidos para formar compuestos inestables, solubles en el solvente. El componente activo de la solución puede ser una alcaolamina o una solución básica, con o sin aditivos. El contacto se realiza en una torre conocida como contactora en la cual la solución ingresa por la parte superior y el gas por la parte inferior. Las reacciones que se presentan entre la solución y los gases ácidos son reversibles; por lo tanto, la solución al salir de la torre se envía a regeneración. Los procesos con aminas son los más conocidos de esta categoría y en segundo lugar los procesos con carbonato. En este proceso, la torre contactora debe trabajar en condiciones de baja temperatura y alta presión de manera que se favorezca la reacción entre el gas y el solvente químico. Por otro lado, en la regeneración se debe trabajar en condiciones contrarias a las mencionadas, o sea a alta temperatura y baja presión, de manera de favorecer la liberación de los gases ácidos<sup>9</sup>.

Las principales desventajas de este método son: la demanda de energía, la naturaleza corrosiva de las soluciones y la limitada carga de gas ácido en la solución, debido a la estequiometría de las reacciones. Los principales procesos con

---

<sup>9</sup> ERDMANN, Eleonora, RUIZ, Liliana Ale, MARTINEZ, Julieta. Endulzamiento de gas natural con aminas. Simulación del proceso y análisis de sensibilidad paramétrico. Argentina: Instituto Tecnológico de Buenos Aires- ITBA, 2012.



**3.3.1 Modelo matemático de la planta de endulzamiento:** Debido a que la remoción de gases ácidos involucra reacciones entre el  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  con la solución de amina, la ecuación de estado de Peng Robinson no es apropiada para estas simulaciones. Aspen Hysys tiene un paquete especializado que contiene los datos químicos y físicos requeridos para el modelamiento de este tipo de procesos con gas ácido.

Se trabajó en los siguientes módulos de la suite de simulación *Aspen One Engineering Suite* versión 8,8 y versión 9,1 licenciada por *AspenTech*:

- Aspen Hysys: simulaciones en estado estable.

Dimensionamiento de equipos por medio de las herramientas que incluye el simulador.

Se utilizó el paquete termodinámico Acid Gas que incluye modelos de ecuaciones de estado (Peng Robinson) para el manejo de gas y modelos de actividad (Electrolitos) para el manejo de líquidos, ya que éste mejora las características de modelación y simulación de cada una de las corrientes y unidades del proceso de endulzamiento. Al trabajar con este modelo termodinámico, automáticamente se generan todas las reacciones que pueden ocurrir en las torres de absorción y regeneración y se aplican a los modelos de equilibrio de la separación. Este modelo termodinámico incluye el modelamiento de:

- Remoción de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ .
- Manejo de trazas de componentes con azufre y mercaptanos.
- Utilización de las aminas más comúnmente usadas: MDEA, DEA, MEA, PZ, PZ+MDEA, DGA, DIPA, DIPA sulfonada, MDEA sulfonada y TEA.
- Manejo de sales termoestables en la torre de regeneración de la amina.

Si bien el software de simulación es una herramienta especializada en estos tratamientos, lo recomendable es realizar una comprobación de los dimensionamientos de los equipos, para así trabajar sobre un modelo base justificado, para esto se basa la selección de los parámetros de dimensionamiento

en las ecuaciones para tratamiento de gas natural como indican Makhatab, Poe y Speight<sup>10</sup> que competen al tratamiento de gas con aminas.

La bomba de aminas se diferencia en cada proceso, se usan en su mayoría bombas centrífugas en línea u horizontales. La selección de la bomba de circulación depende de la presión en la torre contactora y la tasa de circulación de amina. Normalmente las bombas reciprocantes son preferidas si la presión del absorbente es muy alta, sin embargo, las bombas centrífugas se utilizan para bajas presiones (100 psig) y bombas centrífugas horizontales multietapa para altas presiones (700 psig o altas recirculaciones 300 gal/min).

Las tasas de flujo de circulación para los sistemas de amina se pueden determinar a partir de los índices de flujo de gas ácido al seleccionar una concentración de solución y la carga acida del gas. Para este propósito, se puede usar la siguiente ecuación<sup>11</sup>.

$$Q = \frac{k(Q_c)(MF)}{\rho(WF)(AG)}$$

Donde Q es la tasa de recirculación para el sistema de aminas, gal/min; k es una constante (112 para MEA y 192 para DEA); Qc es la tasa de flujo de gas, MMSCFD; MF Reducción requerida en la fracción total de gas ácido, moles de gas acido removido / moles de gas de entrada; WF es la fracción en peso de amina, lb amina/lb solución; y  $\rho$  es la densidad de la solución, lb/gal a 60°F; y AG es la carga acida, moles acidas/mole amina.

La carga de gas ácido en la solución rica depende de la presión parcial de gas acido de la solución. Los rangos normales de este parámetro son 0.45 a 0.52 lbmol de

---

<sup>10</sup> MAKHATAB, Saeid; POE William; SPEIGHT James. Handbook of natural gas transmission and processing. USA: ELSEIVER, 2006, Capitulo 7. p. 261-294.

<sup>11</sup> Arnold, K., and Stewart, M., "Surface Production Operations: Vol. 2: Design of Gas-Handling systems and Facilities," 2nd Ed. Gulf Professional Publishing, Houston, TX (1999).

gas ácido / lbmole amina para MEA y 0.43 a 0.73 lbmole de gas ácido / lbmole amina para los sistemas DEA. Para el diseño, se recomiendan las siguientes cargas para proporcionar un sistema efectivo sin exceso de corrosión<sup>12</sup>:

MEA: WF = 20 wt. %

AG = 0.33 mole ácido gas/mole MEA

DEA: WF = 35 wt. %

AG = 0.5 mole ácido gas/mole DEA

Para las concentraciones recomendadas las densidades a 60°F son:

20% MEA = 8.41 lb/gal = 0.028 mole MEA/gal

35% DEA = 8.71 lb/gal = 0.029 mole DEA/gal

La tasa de recirculación determinada debe incrementarse con un 10-15% de exceso. Con estas ecuaciones se determinó un flujo para las condiciones base de 160 GPM el cual no variará en el proyecto.

**Mínimo diámetro para torres de platos:** Para los separadores verticales, se debe mantener un diámetro mínimo que permita que las gotas de líquido se separen del gas que se mueve verticalmente. el requisito de tiempo de retención de líquido especifica una combinación de diámetro y altura de volumen de líquido. cualquier diámetro mayor que el mínimo requerido que cumpla para la capacidad del gas podrá ser escogido. La ecuación que se utiliza para seleccionar el diámetro mínimo es la siguiente<sup>13</sup>:

---

<sup>12</sup> GPSA Engineering Data Book, 11th Ed. Gas Processors Suppliers Association, Tulsa, OK (1998).

<sup>13</sup> Arnold, K., and Stewart, M., "Surface Production Operations: Vol. 1: Design of Oil-Handling systems and Facilities," 2nd Ed. Gulf Professional Publishing, Houston, TX (1991).

$$d^2 = 5040 * \frac{T * Z * Q_g}{P} * \left[ \frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g} * \frac{C_D}{C_m} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Donde:

$T$  = Temperatura de operación del contactor, °R

$Q_g$  = flujo de gas, MMSCFD

$Z$  = factor de compresibilidad del gas.

$\rho_g$  = densidad del gas,  $\frac{lb}{ft^3}$

$\rho_l$  = densidad de liquido,  $\frac{lb}{ft^3}$

$C_D$  = coeficiente de arrastre.

$C_m$  = diametro de gotas (120 a 125 micras), micras

$d$  = diametro minimo de la torre, ft

El rehervidor proporciona la entrada de calor al separador de aminas, que revierte las reacciones químicas y expulsa los gases ácidos. Los hervidores de amina pueden ser un hervidor de agua o un calentador indirecto.

La carga térmica del rehervidor de amina varía según el diseño del sistema. cuanto mayor sea el trabajo del hervidor, mayor será el trabajo del condensador, mayor será la relación de reflujo, y por lo tanto, menor será el número de bandejas requeridas. cuanto más bajo sea la carga del rehervidor, menor será la relación de reflujo y más bandejas deberá tener la torre.

típicamente para un separador con 20 bandejas, las cargas térmicas del rehervidor serán los siguientes:

Sistema con MEA - 1,000 to 1,200 Btu/gal solución pobre.

Sistema con DEA - 900 to 1,000 Btu/gal solución pobre.

Para diseño, la temperatura del rehervidor con una presión de operación de 10 psig puede asumirse como 245°F para 20% MEA y 250°F para 35% DEA.

### 3.4 DESHIDRATACIÓN.

La planta de deshidratación tiene como función reducir el contenido de agua en el gas hasta una concentración máximo de 6 lb/MMSCFD (según reglamento único de transporte)<sup>14</sup>.

El gas dulce que sale de la etapa de endulzamiento tiene que pasar por un último proceso de deshidratación porque, aunque el gas ingresa libre de hidrocarburos líquidos se ha saturado con agua durante el proceso de absorción con la amina acuosa. Es necesario reducir la concentración de agua para evitar problemas en el transporte, distribución, almacenamiento y venta del producto final. En la Figura 5 se presenta un esquema general del proceso de deshidratación del gas y regeneración del glicol que se resume a continuación. En la etapa de deshidratación, el gas ingresa a otra torre de absorción donde se pone en contacto a contracorriente con Trietilenglicol (TEG) y se obtiene el gas de ventas en condiciones RUT para inyección en el sistema de distribución nacional. Igual que la amina, el glicol se debe regenerar en una torre de destilación para retirar el agua que absorbe del gas dulce y nuevamente recircular al sistema. Antes de ingresar a la torre de destilación el TEG rico se expande en una válvula y se precalienta con la corriente de TEG regenerado que sale por el fondo de la torre de destilación. Posteriormente se bombea para llevar la corriente a la condición de presión en la torre de absorción y, como una optimización energética, se enfría con el gas de venta para ingresar a la torre con las condiciones de presión y temperatura requeridas para el proceso de absorción.

---

<sup>14</sup> CREG; Resolución CREG-071 de 1999, Reglamento Único de Transporte de Gas –RUT–.



$$\rho_g = \text{densidad del gas}, \frac{lb}{ft^3}$$

$$\rho_l = \text{densidad de liquido}, \frac{lb}{ft^3}$$

$C_D = \text{coeficiente de arrastre.}$

$C_m = \text{diametro de gotas (120 a 125 micras), micras}$

$d = \text{diametro minimo de la torre, ft}$

Un punto importante es la temperatura de degradación del glicol en el rehervidor, no debe superar de los valores mostrados en la Tabla 4.

Tabla 4. temperatura de degradación para algunos glicoles.

Glicol	Temperatura T(°C)
DEG	177
TEG	204
TREG	224

Fuente: MAKHATAB, Saeid; POE William; SPEIGHT James. Handbook of natural gas transmission and processing. USA: ELSEIVER, 2006, Capitulo 8.

Velocidad de circulación de glicol. Cuando el número de etapas y la concentración de glicol están fijadas, la de presión del “*dew point*” es una función del flujo de glicol. Bajo esta premisa, la concentración del glicol controla el punto de rocío, mientras que su flujo controla la cantidad de agua que se puede remover.

Un Mínimo flujo → 2 gal/lb H<sub>2</sub>O a remover y un Máximo flujo → 7 gal/lb H<sub>2</sub>O a remover, Típicamente, los diseños son enfocados hacia el manejo de 3 gal de glicol/lb H<sub>2</sub>O a remover. El calor requerido en el rehervidor es proporcional a la velocidad de recirculación del glicol velocidad de recirculación del glicol.

La carga térmica del rehervidor es la suma del calor sensible requerido para elevar el glicol húmedo a temperatura de ebullición, el calor requerido para vaporizar el agua en el glicol, el calor requerido para el reflujo (que se estima en 25 a 50% del

calor requerido para vaporizar el agua en el glicol) y pérdidas a la atmósfera. Se puede utilizar la siguiente ecuación:

La carga de calor sensible para un gas a una presión constante es:

$$q_g = 4.17Q_g * C_g(T_2 - T_1)$$

Donde

$Q_g$  = tasa de flujo de gas, MMscfd

$C_g$  = capacidad calorífica del gas, Btu/Mscf °F

$T_1$  = temperatura a la entrada, °F

$T_2$  = temperatura a la salida, °F

El poder calorífico es determinado en condiciones atmosféricas y luego se corrige la temperatura y la presión en base a las reducciones de presión y temperatura.

$$C_g = 2.64(29 S(C) + \Delta C_p)$$

Donde:

$C$  = calor específico a una atmósfera de presión, Btu/lb – °F

$\Delta C_p$  = factor de corrección

$S$  = gravedad específica del gas

El factor de corrección puede determinarse de las gráficas de presión y Temperaturas reducidas<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> Arnold, K., and Stewart, M., "Surface Production Operations: Vol. 2: Design of Gas-Handling systems and Facilities," 2nd Ed. Gulf Professional Publishing, Houston, capítulo 8.

## 4 DISEÑO EXPERIMENTAL FACTORIAL

El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Por ejemplo, uno de los objetivos particulares más importantes que en ocasiones tiene un diseño factorial es determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor. Los factores pueden ser de tipo cualitativo (máquinas, tipos de material, operador, la presencia o ausencia de una operación previa, etc.), o de tipo cuantitativo (temperatura, humedad, velocidad, presión, etc.)<sup>16</sup>.

Para estudiar la manera en que influye cada factor sobre la variable de respuesta es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. Con el diseño factorial completo se corren aleatoriamente todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles de los factores a investigar. Así, la matriz de diseño o arreglo factorial es el conjunto de puntos experimentales o tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores.

### 4.1 VARIABLES DE RESPUESTA

Para determinar si los factores son influyentes se debe seleccionar la variable de respuesta que se desea analizar, para cada tratamiento se determina una variable de respuesta diferente.

---

<sup>16</sup> GUTIERREZ, Humberto; DE LA VARA, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2da ed. México: McGraw-Hill, 2008.

Para el tratamiento de endulzamiento es importante ver la respuesta del contenido de  $H_2S$  y  $CO_2$  a la salida de la torre contactora en la corriente de gas dulce (*sweet gas*), como caso base se tiene la corriente expuesta en el capítulo anterior, un flujo constante de recirculación de amina calculado con anterioridad, que no varío, las presiones y temperaturas de las corrientes de entrada también se mantuvieron constantes y el análisis se realizó con los mismos parámetros dimensionales del caso base, cada una de las corridas en la simulación en hysys se tomó como una perturbación del caso base (combinaciones posibles con los diferentes flujos de alimentación y composiciones) y así se generó los datos suficientes para realizar el análisis del comportamiento de estas variables con sus respectivas combinaciones. Para el tratamiento de deshidratación es importante ver la respuesta del contenido de  $H_2O$  a la salida de la torre contactora (*dry gas*) de cada una de las corridas en la simulación en hysys y así poder analizar el comportamiento de estas variables con los cambios dados.

## **4.2 FACTORES EXPERIMENTALES**

Este proyecto se enfocó en determinar mediante un experimento factorial los factores que más afectan al tratamiento de gas para dejarlo a condiciones de venta. Como tal se reconoce que existen muchos factores que pueden influenciar dicho tratamiento, como lo son, el flujo en la corriente de gas de alimentación, el tipo de torre contactora, el tipo de amina para el tratamiento, el flujo de recirculación de la amina, las temperaturas y presión de entrada a la torre contactora, el porcentaje de contaminantes  $H_2S$  y  $CO_2$ , la cantidad de agua en la composición de entrada, entre otros. Dentro de estos, se identifica que varios factores están relacionados con la corriente del gas de alimentación, en dicha corriente se pueden variar la composición, los flujos, temperaturas y presiones, este proyecto se enfocó en las variaciones de flujo y composición que se puedan dar a medida que se generan cambios en la producción, con la vida útil del pozo, ocasionando diferentes

escenarios posibles (niveles). Las variaciones analizadas fueron el aumento en el flujo de gas de alimentación (entrada de otras corrientes al perforar) y la disminución del mismo (declive natural del pozo). Es evidente que en este factor existen 3 niveles de trabajo, un nivel alto (aumento del flujo) un nivel bajo (declive del pozo) y un nivel intermedio, el cual se seleccionó como el caso base. Otro factor influyente en el gas de alimentación es la composición, que varía con la vida útil del pozo y las variaciones del flujo, los componentes más influyentes en el tratamiento del gas son los contaminantes CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y el contenido de H<sub>2</sub>O, los cuales están presentes en el gas y son los que se desean tratar para dejar en condiciones RUT. Este factor podría tener cualquier cantidad de combinaciones, por lo que se escogen 3 niveles de trabajo a conveniencia, el primer nivel es una perturbación del caso base hacia un aumento de los porcentajes de H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O que para fines del análisis se llamará composición alta, el caso base, composición intermedia y por último un evento favorable que disminuya los porcentajes de contaminantes, composición baja, esta se puede generar por la entrada de pozos nuevos que contengan variaciones pequeñas en los porcentajes de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S a medida que se mezclen la producción de estos nuevos pozos hacia una sola o única línea podemos tener una composición general representada en bajos porcentajes de componentes ácidos.

Por último, se desea determinar qué tan influyente es el tipo de amina y glicol que se usen en los tratamientos, teniendo por último 3 niveles para amina y 3 niveles para glicol. La Tabla 5, muestra los factores del diseño experimental y sus respectivos niveles.

Con los factores y niveles determinados se procede a crear las matrices de diseño que contienen el total de tratamientos a evaluar, esta se obtiene encontrando todas las posibles combinaciones que se pueden formar con los niveles de los k factores de interés. Para este proyecto se dividieron las variables de respuesta en dos unidades debido a que se necesiten dos tratamientos, cada unidad con 3 factores

definidos, dando así un experimento factorial de  $3^3$  en cada unidad, y por consiguiente un total de 27 combinaciones posibles, entre estas el caso base.

De manera específica, hay dos razones que hacen viable el diseño  $3^3$ :

- Se tienen factores de tipo continuo e interesa estudiar efectos cuadráticos, se cree que la variable de respuesta no es lineal, ni aproximadamente lineal en el rango de variación de los factores estudiados.
- Los factores son categóricos o discretos y de manera natural tienen tres niveles cada uno, ya que se desea determinar las interacciones en valores por encima y debajo del caso base<sup>17</sup>.

Tabla 5. Factores y respectivos niveles diseño experimental factorial.

Factores	Niveles		
	1	2	3
Flujo de gas de alimentación	Alto (Qa)	Medio(Qm)	Bajo(Qb)
Composición de la corriente de alimentación	Alto nivel de contaminantes (Ca)	Medio (Cm)	Bajo nivel de contaminantes (Cb)
Tipo de amina para endulzamiento	MEA	DEA	TEA
Tipo de glicol para deshidratación	EG	TEG	DEG

#### 4.3 MATRICES PARA LAS UNIDADES DE ANÁLISIS.

Como se determinó en las variables de respuestas, se tienen dos unidades de análisis, la primera es la unidad de endulzamiento y la segunda la unidad de

<sup>17</sup> GUTIERREZ, Humberto; DE LA VARA, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2da ed. México: McGraw-Hill, 2008. P. 238.

deshidratación, para cada unidad corresponde un numero de factores y una matriz de análisis con su respectivas combinaciones, la Tabla 6 muestra la matriz para las combinaciones posibles de la primera unidad, la Tabla 7 muestra la matriz para la segunda unidad.

En esta matriz se analizó el porcentaje de contaminantes CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en la corriente de salida de la torre contactora, con cada una de las combinaciones posibles, el caso base como antes se mencionó se trabajó con el caudal medio de 10 MMSCFD, la composición descrita con anterioridad y la amina de tratamiento Dietanolamina.

Tabla 6. Matriz de combinaciones para la primera unidad

Tipo amina	Caudal								
	Qb	Qm	Qa	Qb	Qm	Qa	Qb	Qm	Qa
	Composición								
	Cb	Cm	Ca	Cb	Cm	Ca	Cb	Cm	Ca
Mea	Qb*Cb*Mea	Qm*Cm*Mea	Qa*Ca*Mea	Qb*Cb*Mea	Qm*Cm*Mea	Qa*Ca*Mea	Qb*Cb*Mea	Qm*Cm*Mea	Qa*Ca*Mea
Dea	Qb*Cb*Dea	Qm*Cm*Dea	Qa*Ca*Dea	Qb*Cb*Dea	Qm*Cm*de (base)	Qa*Ca*Dea	Qb*Cb*Dea	Qm*Cm*Dea	Qa*Ca*DEa
Tea	Qb*Cb*Tea	Qm*Cm*Tea	Qa*Ca*Tea	Qb*Cb*Tea	Qm*Cm*Tea	Qa*Ca*Tea	Qb*Cb*Tea	Qm*Cm*Tea	Qa*Ca*Tea

Tabla 7. Matriz de combinaciones para la segunda unidad

Tipo glicol	Caudal								
	Qb	Qm	Qa	Qb	Qm	Qa	Qb	Qm	Qa
	Composición								
	Cb	Cm	Ca	Cb	Cm	Ca	Cb	Cm	Ca
EG	Qb*Cb* EG	Qm*Cm* EG	Qa*Ca* EG	Qb*Cb* EG	Qm*Cm* EG	Qa*Ca* EG	Qb*Cb* EG	Qm*Cm* EG	Qa*Ca* EG
DEG	Qb*Cb* DEG	Qm*Cm* DEG	Qa*Ca* DEG	Qb*Cb* DEG	Qm*Cm* DEG (base)	Qa*Ca* DEG	Qb*Cb* DEG	Qm*Cm* DEG	Qa*Ca* DEG
TEG	Qb*Cb* TEG	Qm*Cm* TEG	Qa*Ca* TEG	Qb*Cb* TEG	Qm*Cm* TEG	Qa*Ca* TEG	Qb*Cb* TEG	Qm*Cm* TEG	Qa*Ca* TEG

En esta matriz se analizó el porcentaje de H<sub>2</sub>O a la salida de la corriente de la torre contactora en el proceso de deshidratación, tomando como caso base el mismo caudal y composición del anterior y como glicol de tratamiento el Trietilenglicol TEG.

#### 4.4 ANÁLISIS DE LAS MATRICES.

Una vez las matrices están diseñadas, el siguiente paso es realizar un ANOVA (*ANalysis Of VAriance*, según terminología inglesa), para esto se utilizó el software estadístico Statgraphics Centurion XVI, Versión 16.2.04 (32-bits) 2013 con uso por licencia en la Universidad Industrial de Santander.

Tabla 8. Parámetros a estimar

PARÁMETROS	NÚMERO
$\mu$	1
$\tau_i$	$a - 1$
$\beta_j$	$b - 1$
$\gamma_k$	$c - 1$
$(\tau\beta)_{ij}$	$(a - 1)(b - 1)$
$(\tau\gamma)_{ik}$	$(a - 1)(c - 1)$
$(\beta\gamma)_{jk}$	$(b - 1)(c - 1)$
$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$
$\sigma^2$	1
Total	$abc + 1$

Se realizará un modelo estadístico sin réplica.

El modelo estadístico para este diseño es:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + u_{ijk}$$

con  $i = 1, 2, \dots, a$ ;  $j = 1, 2, \dots, b$ ;  $k = 1, 2, \dots, c$  donde  $\tau_i$ ,  $\beta_j$  y  $\gamma_k$ : Son los efectos producidos por el nivel  $i$ -ésimo del factor A, ( $\sum i \tau_i = 0$ ), por el nivel  $j$ -ésimo

del factor B,  $\sum_j \beta_j = 0$  y por el nivel k-ésimo del factor C, ( $\sum_k \gamma_k = 0$ ), respectivamente.  $(\tau\beta)_{ij}$ ,  $(\tau\gamma)_{ik}$ ,  $(\beta\gamma)_{jk}$  y  $(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ : Son los efectos producidos por las interacciones entre A x B, A x C, B x C y A x B x C, respectivamente<sup>18</sup>. En Tabla 8 se muestran los parámetros a estimar y su respectivo número de combinación. Supondremos que se toma una observación por cada combinación de factores, por tanto, hay un total de  $n = ABC$  observaciones.

A pesar de las restricciones impuestas al modelo, el número de parámetros ( $abc + 1$ ) supera al número de observaciones ( $abc$ ). Por lo tanto, algún parámetro no será estimable. Al tratarse de un modelo sin replicación, los contrastes sólo se pueden realizar si se supone que la interacción de tercer orden es cero. En esta hipótesis,  $CM(ABC) = CMR$  y los contrastes de cada uno de los factores e interacciones comparan su cuadrado medio correspondiente con la varianza residual para construir el estadístico de contraste.

El objetivo del análisis es realizar los contrastes de hipótesis nula que se muestran a continuación junto con el estadístico de contraste correspondiente:

$$\begin{aligned}
 i) H_{0A} &\equiv \tau_1 = \dots = \tau_a = 0 : F_A = \frac{CMA}{CMR} \sim_{H_{0A}} F_{(a-1), (a-1)(b-1)(c-1)} \\
 ii) H_{0B} &\equiv \beta_1 = \dots = \beta_b = 0 : F_B = \frac{CMB}{CMR} \sim_{H_{0B}} F_{(b-1), (a-1)(b-1)(c-1)} \\
 iii) H_{0C} &\equiv \gamma_1 = \dots = \gamma_c = 0 : F_C = \frac{CMC}{CMR} \sim_{H_{0C}} F_{(c-1), (a-1)(b-1)(c-1)} \\
 iv) H_{0(AB)} &\equiv (\tau\beta)_{ij} = 0, \forall i, j : F_{(AB)} = \frac{CM(AB)}{CMR} \sim_{H_{0(AB)}} F_{(a-1)(b-1), (a-1)(b-1)(c-1)} \\
 v) H_{0(AC)} &\equiv (\tau\gamma)_{ik} = 0, \forall i, k : F_{(AC)} = \frac{CM(AC)}{CMR} \sim_{H_{0(AC)}} F_{(a-1)(c-1), (a-1)(b-1)(c-1)} \\
 vi) H_{0(BC)} &\equiv (\beta\gamma)_{jk} = 0, \forall j, k : F_{(BC)} = \frac{CM(BC)}{CMR} \sim_{H_{0(BC)}} F_{(b-1)(c-1), (a-1)(b-1)(c-1)}
 \end{aligned}$$

---

<sup>18</sup> LARA, Ana "Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS." España: Proyecto Sur de Ediciones. (2000)

Fijado un nivel de significación  $\alpha$ , se rechaza la  $H_0$  correspondiente, si  $F_{exp} > F_{teórica}$ .<sup>19</sup>

Tabla 9. ANOVA para análisis factorial con tres factores.

Fuentes de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios	Factor-exp
Factor A	SCA	$a - 1$	CMA	CMA/CMR
Factor B	SCB	$b - 1$	CMB	CMB/CMR
Factor C	SCC	$c - 1$	CMC	CMC/CMR
$A \times B$	SC(AB)	$(a - 1)(b - 1)$	CM(AB)	CM(AB)/CMR
$A \times C$	SC(AC)	SC(AC)	CM(AC)	CM(AC)/CMR
$B \times C$	SC(BC)	$(b - 1)(c - 1)$	CM(BC)	CM(BC)/CMR
$A \times B \times C$	SC(ABC)	$(a - 1)(b - 1)(c - 1)$	CMR	CM(ABC)/CMR
TOTAL	SCT	$abc - 1$	CMT	

Fuente: LARA, Ana "Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS." España: Proyecto Sur de Ediciones. (2000)

La Tabla 9 muestra el ANOVA con sus respectivos datos de cálculo, el ANOVA Considera los efectos A, B, C, AB, BC y ABC de manera global, es decir, sin especificar si influyen de manera lineal, cuadrática o de ambas formas. Las sumas de cuadrados de cada efecto se pueden descomponer en sumas de cuadrados con un grado de libertad. Por ejemplo, la suma de cuadrados del efecto A con 2 grados de libertad se puede desglosar en los componentes AL y A2 (efecto lineal y cuadrático) cada uno con un grado de libertad. El subíndice L indica que es la parte lineal del efecto global A, y el exponente denota la parte cuadrática. Asimismo, la suma de cuadrados de AB dada se puede partir en cuatro componentes con un grado de libertad: ALBL, ALB2, A2BL y A2BL. Así, para tener información más detallada de cómo es que afectan los factores, es necesario separar los ocho

<sup>19</sup> LARA, Ana "Diseño Estadístico de Experimentos, Análisis de la Varianza y Temas Relacionados: Tratamiento Informático mediante SPSS." España: Proyecto Sur de Ediciones. (2000)

componentes con un grado de libertad y construir un ANOVA que muestre la significancia de cada uno de ellos. el ANOVA desglosado sólo aplica para los factores que son de tipo numérico, y cuando se quiere detallar el desglose de los efectos en su componente lineal y cuadrático.<sup>20</sup>

---

<sup>20</sup> GUTIERREZ, Humberto; DE LA VARA, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2da ed. México: McGraw-Hill, 2008. P. 241

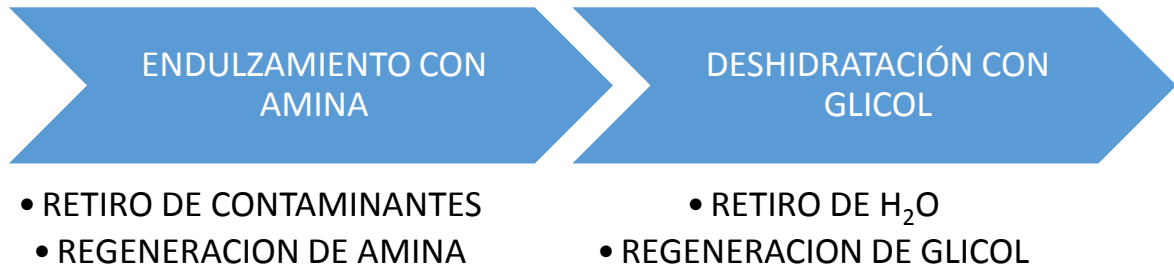
## **5 SIMULACIÓN EN SOFTWARE HYSYS**

El objetivo de realizar una simulación en el software HYSYS es estudiar diferentes escenarios que no se podrían obtener con facilidad en un laboratorio o cuyas especificaciones requieren grandes cambios en la infraestructura de la planta, analizar las variables con más detalle para las múltiples variaciones que se producen en cada corriente. En este capítulo se mostrará la metodología que se usó para evaluar la planta tipo en distintas condiciones y poder obtener los datos necesarios para la evaluación en el software estadístico. Se buscó un modelo que se adaptara lo mejor posible al caso real para que los análisis fueran lo más veraces posibles, dentro de los factores que hacen que esto se cumpla, está la selección adecuada de los equipos de cada tratamiento, bombas, torres contactoras, intercambiadores de calor y rehervidores en los procesos de cogeneración, cada equipo tiene unos parámetros de diseño que se deben seleccionar adecuadamente, también existe los rangos de operación con su correspondientes variables como son temperatura, presión y niveles de flujo de operación que traería consigo los cambios.

### **5.1 DEFINICIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO**

Se estableció el diseño de la planta de tratamiento de gas para un flujo inicial de 10 MMSCFD siguiendo los procesos de la Figura 6 con el fin de entregar el gas a las condiciones RUT, como se mencionó en el capítulo 4 se generaron para el análisis 27 escenarios diferentes para cada uno de los tratamientos mostrados con el fin de correlacionar las variables presentes en el gas de alimentación.

Figura 6. Diagrama general del tratamiento de gas



## 5.2 SIMULACIÓN DEL ENDULZAMIENTO

A continuación, se hace una descripción del proceso de endulzamiento que se simuló en Aspen Hysys® para retirar los gases ácidos y dejar el gas natural en condiciones RUT en lo relacionado con la concentración de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (inferior a 2% en volumen) y ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) (0,25 grano/100SCF). En la Figura 7 se presenta el diagrama de flujo de la simulación.

La corriente de gas de agrio ingresa a la planta a una temperatura entre 100 y 110 °F y una presión entre 1115 psia.

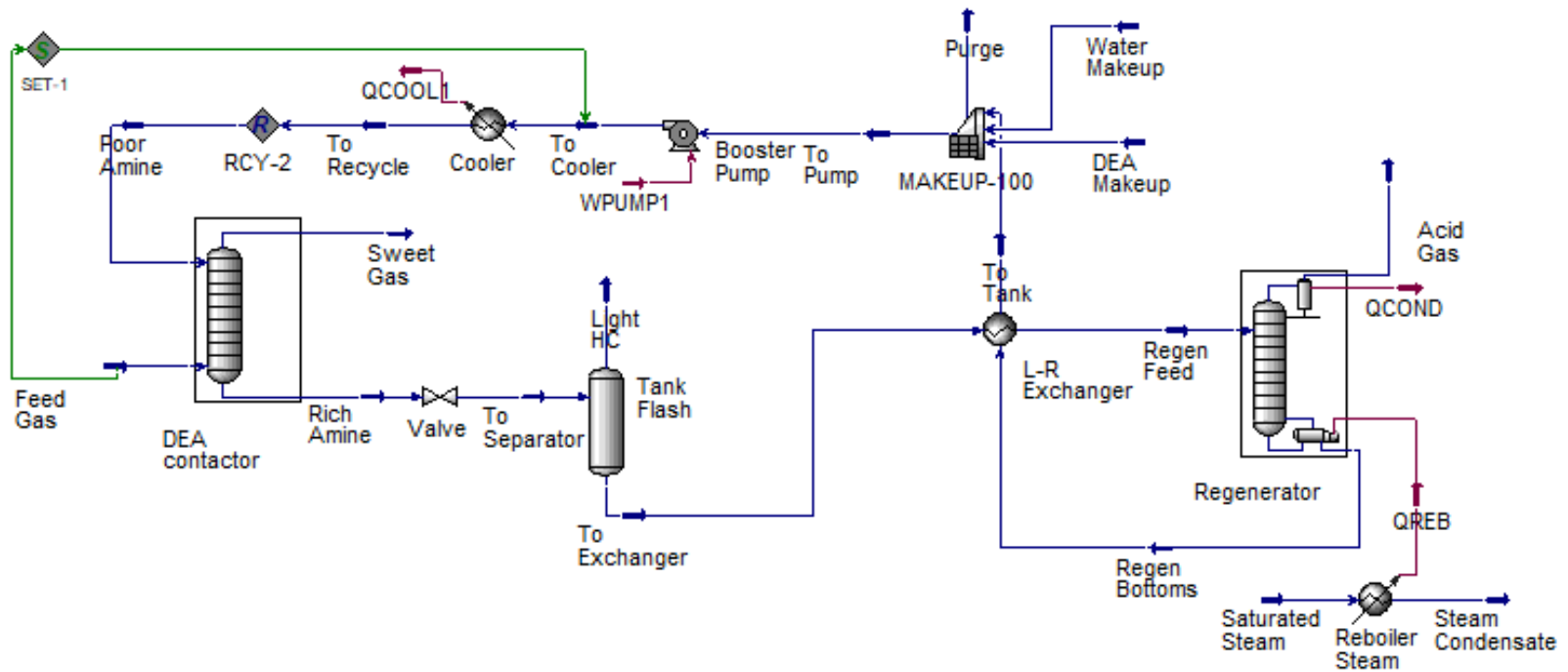
La corriente a endulzar, a 110 °F y 1110 psia, ingresa a una torre de absorción de 20 platos (T-001) por la parte inferior y fluye a contracorriente con una solución acuosa de amina al 30% v/v (DEA - Dietanolamina) que ingresa por la parte superior a 1120 psia y 120 °F, la amina reacciona con los gases ácidos (amina pobre) y los absorbe para obtener un gas dulce por la cima, *sweet gas*. La presión de operación del absorbedor (T-001) se define entre 1110 y 1120 psia y la temperatura está entre 110 y 120 °F, dado que la absorción es exotérmica, hace que se desarrolle un perfil de temperatura al interior de la torre.

Por la parte inferior del absorbedor sale la amina rica en gases ácidos a 1115 psia y 184 °F *Rich amine* y pasa por una válvula de estrangulación (VLV-102) para reducir la presión hasta 90 psia. Esta corriente a baja presión, pasa al *Tank flash* para retirar los gases y livianos absorbidos por la amina y evitar que en el proceso de regeneración de la amina se presenten problemas de equilibrio o de generación

de espuma al interior de la torre de destilación. La corriente líquida que sale del separador se precalienta hasta 200 °F con la amina regenerada que sale por los fondos de la torre regeneradora de DEA *regenerator* T-102, en el intercambiador de tubos y coraza denominado, L-R *exchanger* (E-101).

La amina ingresa a la torre regeneradora (T-102) a 90 psia y 200 °F para revertir las reacciones de los gases ácidos, este proceso se favorece a mayores temperaturas y a bajas presiones. La torre regeneradora es de 20 platos y la amina de entrada en la segunda etapa, la presión de operación de la torre está entre 33 y 38 psia y la temperatura de cima y fondos se establece como una especificación en 195 y 267 °F, respectivamente. Por la cima se obtiene un producto rico en gases ácidos (95% molar) y vapor de agua. Esta corriente se puede llevar a un proceso de recuperación de azufre para valorizarla o a disposición en teas.

Figura 7. Diagrama de proceso de endulzamiento.



Por los fondos se obtiene la amina regenerada o amina pobre a 267 °F que permite realizar el intercambio de calor con la corriente que se alimenta a la torre con el fin de optimizar el balance de calor del proceso. La amina pobre sale del intercambiador E-101 a una temperatura de 248 °F. En el proceso real la amina regenerada se envía hacia el tanque de almacenamiento y reposición de amina. Sin embargo, en la simulación para tener un flujo continuo se introduce una función de reposición (*make-up*) que garantiza que siempre se tenga la misma concentración de amina.

La corriente de salida de la reposición se conecta con la entrada a la bomba P-101 que aumenta la presión de la solución de amina pobre hasta 1115 psia para retornarla a la torre de absorción T-101. Antes de retornar al proceso de absorción, se pasa la corriente de la solución de amina por un aro enfriador (*air cooler*) para ajustar la temperatura de la solución hasta 120 °F y favorecer el proceso de absorción. En la

Tabla **10** se presenta un resumen de las condiciones de operación de los equipos principales del proceso de endulzamiento con los cuales se realiza el diseño de la planta de análisis, en la Tabla 11 se presentan las características obtenidas del diseño de los equipos principales.

Tabla 10. Condiciones de operación de equipos planta de endulzamiento.

TAG	EQUIPO	CONDICION DE OPERACIÓN	VALOR	UNIDAD
T-101	Torre absorbedora	Temperatura de cima	120	°F
		Temperatura de fondo	170.5	°F
		Presión de cima	1110	Psia
		Presión de fondo	1115	Psia
VLV-101	Válvula de expansión	Caída de presión	1025	Psia
V-100	Tanque de Expansión	Temperatura de operación	172.5	°F
		Presión de operación	90	Psia
E-101	Intercambiador de amina	Caída de presión en tubos	5	Psi
		Caída de presión en carcasa	5	Psi
T-102	Torre regeneradora de amina	Presión de cima	37	Psia
		Presión de fondo	37.9	Psia
		Temperatura de cima	214	°F
		Temperatura de fondo	267.3	°F
P-100	Bomba de amina	Presión de descarga	1177	psi
		Flujo de operación	237.1	USGPM

Tabla 11. Características de diseño de los equipos principales de la planta de endulzamiento

TAG	EQUIPO	características	VALOR	UNIDAD
T-101	Torre absorbedora	# de platos	20	-
		Tipo	Válvulas	-
		Diámetro	3	ft
		Altura	40	ft
		Espaciamiento	2	ft
		Caída de presión	0.2623	psi
VLV-101	Válvula de expansión	Flujo	259.5	USGPM
		Constante Cv	16.29	USGPM
V-100	Tanque de Expansión	volumen	1059.44	ft <sup>3</sup>
		Diámetro	9.652	ft
		Altura	14.48	ft
		nivel	50	%
E-101	Intercambiador de amina	Carga	3226000	Btu/h
		Área	649.3	ft <sup>2</sup>
		UA	47101	BTU/°f-h
T-102	Torre regeneradora de amina	# de platos	20	-
		Tipo	Válvulas	-
		Diámetro	4	ft
		Altura	40	ft
		Espaciamiento	2	ft
		Caída de presión	0.05	psi
P-100	Bomba de amina	Potencia	209	HP
		Tipo	Centrifuga	-
Cooler	Aero enfriador	carga	14.e+6	BTU/h

### 5.3 SIMULACIÓN DESHIDRATACIÓN

La deshidratación al igual que el proceso de endulzamiento también se compone de dos subprocesos, el primero y principal es la operación de absorción para deshidratación de gas natural con TEG (Trietilenglicol) y el segundo es el proceso de regeneración del absorbente (TEG) para su recirculación.

En este proceso se tiene la corriente de *sweet gas* que sale de la etapa de endulzamiento a unas condiciones de presión 1115 psia y una temperatura entre 120 °F. Esta corriente de gas dulce ingresa saturada con vapor de agua a la torre deshidratadora *dehydration* T-101, de 14 etapas, donde el gas entra en contacto a contracorriente con el agente deshidratador (TEG) que ingresa por la cima de la torre.

El gas deshidratado que sale de la torre (concentración de H<sub>2</sub>O inferior a 6 lb/MMSCF) pasa por el intercambiador de cima *G/D exchanger* E-101 con el fin de enfriar la corriente de TEG regenerado que ingresa a la torre.

EL TEG rico que sale de la torre deshidratadora ingresa a la etapa de regeneración donde se le retira el agua para recircularlo al proceso.

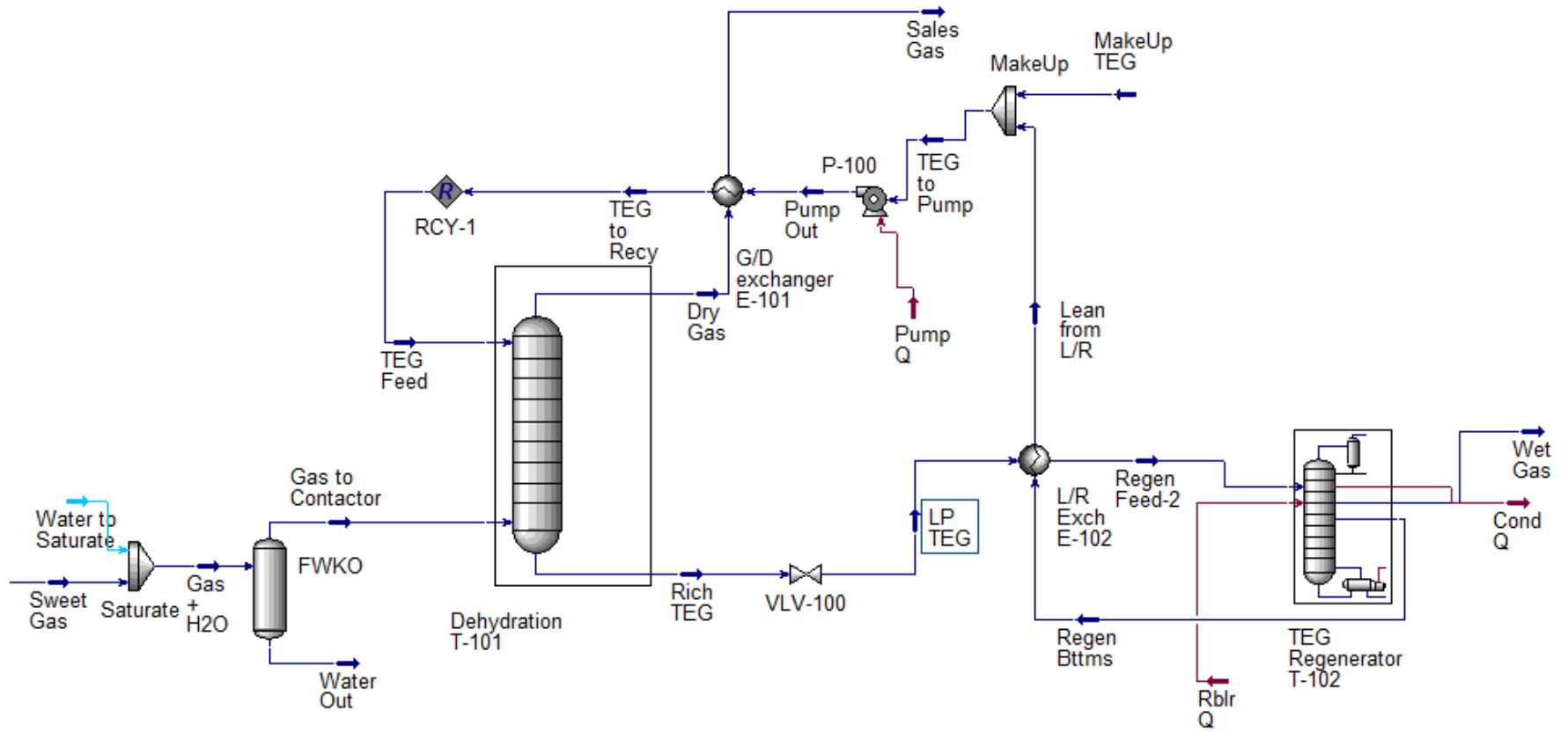
En el proceso de regeneración el TEG rico pasa por la válvula reguladora VLV-100 donde se reduce la presión, esta caída de presión deberá realizarse sobre la corriente antes de que llegue al sistema de regeneración, ya que los equipos que operan en esta sección tienen presión de diseño menores a la de la torre contactora. Generalmente, el Tanque separador de glicol opera entre 35-60 psig, por lo tanto una caída de presión de 1074 psi, sumada a la caída de presión en el intercambiador frío Glicol Rico-Glicol Pobre generará una corriente alrededor de 60 psig, la válvula queda especificada con 26 psia y, posteriormente, por el intercambiador de calor *L/R exchanger* E-102 donde se calienta la corriente de entrada a la columna con la corriente de TEG regenerado que sale de la columna de regeneración por los fondos, esto permite optimizar la transferencia de calor entre las dos corrientes. Después del intercambiador la corriente de Trietilenglicol rico ingresa a la torre *regenerator* T-102 donde se realiza una destilación y por la parte superior se obtiene

un gas rico en vapor de agua y por la parte inferior de la torre se tiene el TEG regenerado (pobre) con una concentración de 99% en peso.

La corriente de TEG regenerado se utiliza para calentar la corriente de TEG rico y a su vez se enfría para retornarla por medio de la bomba de TEG (P-101) al proceso de deshidratación subiendo la presión de esta corriente hasta 1115 psia. En esta corriente se ingresa la corriente de reposición de TEG.

Antes de ingresar nuevamente el TEG regenerado o pobre al ciclo de deshidratación se aprovecha la corriente de gas seco para enfriarlo hasta las condiciones de proceso (60°C) en el intercambiador de cima E-102 y así retornarlo a la torre.

Figura 8. Diagrama de la simulación de deshidratación.



En la Figura 8 se presenta el diagrama de flujo de proceso de deshidratación de gas natural que se simuló en Aspen Hysys®.

En la Tabla 12 se presenta un resumen de las condiciones de operación de los equipos principales en el proceso de deshidratación y en la Tabla 13 se presenta un resumen de las características más representativas del diseño de los equipos principales para cada planta de deshidratación.

Tabla 12. Características de diseño de los equipos principales de la planta de deshidratación.

TAG	EQUIPO	CONDICION DE OPERACIÓN	VALOR	UNIDAD
T-101	Torre deshidratadora	Temperatura de cima	112.9	°F
		Temperatura de fondo	110.7	°F
		Presión de cima	1105	Psia
		Presión de fondo	1110	psia
VLV-100	Válvula de expansión	Caída de presión	1074	Psi
E-102	Intercambiador de glicol	Caída de presión en tubos	0.1	psi
		Caída de presión en carcasa	10	Psi
T-102	Torre regeneradora de glicol	Presión de cima	14.7	psia
		Presión de fondo	15	Psia
		Temperatura de cima	215	°f
		Temperatura de fondo	390	°f
P-100	Bomba de glicol	Presión de descarga	1120	Psia
		Flujo de operación	2	USGPM
E-101	Intercambiador glicol gas seco	Caída de presión en tubos	5	psi
		Caída de presión en carcasa	10	Psi

Tabla 13. Características de diseño de los equipos principales de la planta de deshidratación.

TAG	EQUIPO	características	VALOR	UNIDAD
T-101	Torre deshidratadora	# de platos	14	-
		Tipo	Orificio	-
		Diámetro	4.921	ft
		Altura	22.96	ft
		Espaciamiento	1.64	ft
		Caída de presión	5	psia
VLV-100	Válvula de expansión	Flujo	2.52	USGPM
		Constante Cv	9.55e-002	USGPM
E-102	Intercambiador de glicol pobre/glicol rico	Carga	53800	Btu/h
		Área	54.11	ft <sup>2</sup>
		UA	255.5	BTU/°f-h
T-102	Torre regeneradora de glicol	No de etapas	3	-
		Tipo	Vessel	-
		Diámetro	3.91	ft
		Altura	5.87	ft
P-100	Bomba de glicol	Potencia	1.93	HP
		Tipo	Centrifuga	-
E-101	Intercambiador glicol/gas seco	carga	168373	BTU/h
		UA	2888.59	

## 6 ANÁLISIS DISEÑO EXPERIMENTAL

El objetivo del análisis del diseño experimental factorial es identificar patrones de comportamiento y variables sensibles, para generar recomendaciones y planes de acción. En este capítulo se presenta la metodología usada para obtener los datos del diseño experimental y el desarrollo en el programa estadístico *statgraphics* con el fin de hallar una correlación adecuada de las variables.

### 6.1 OBTENCIÓN DE DATOS UNIDAD ENDULZAMIENTO

Como se presentó en el capítulo 4, los datos necesarios para el análisis del diseño experimental debían cumplir con las matrices de las unidades, por esto se desarrollaron los 27 escenarios posibles en la simulación de hysys y se obtuvieron los datos de los porcentajes de H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub> de la corriente de gas dulce (*sweet gas*), en la Tabla 14 se muestran los tres tipos de composición utilizados en el análisis, si bien se requería tener un aumento en la composición de H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub> en el gas de alimentación se debía reducir otro componente, ante esto se decidió reducir el contenido de metano.

Se tienen 3 tipos de composición como se habían especificado en la matriz de análisis de la unidad, cada una de las composiciones será analizada bajo los escenarios en los que cambiará el caudal de alimentación y el tipo de amina, los datos se tomaron directamente desde la simulación de hysys y se trasladaron a un Excel para facilitar el manejo en el software estadístico la Tabla 15 presenta los datos obtenidos después de la simulación en el contenido de H<sub>2</sub>S en la corriente de gas dulce.

Tabla 14. Composiciones de análisis en la corriente de entrada caso amina.

componente	Composición en la corriente de entrada		
	CB	CM	CA
Nitrogen	0.0089	0.0089	0.0089
CO <sub>2</sub>	0.0948	0.0948	0.0948
H <sub>2</sub> S	0.047	0.067	0.087
Methane	0.836	0.816	0.796
Ethane	0.0061	0.0061	0.0061
Propane	0.0012	0.0012	0.0012
i-Butane	0.0004	0.0004	0.0004
n-Butane	0.0002	0.0002	0.0002
i-Pentane	0.0002	0.0002	0.0002
n-Pentane	0.0001	0.0001	0.0001
n-Hexane	0.0001	0.0001	0.0001
n-Heptane	0.0001	0.0001	0.0001
H <sub>2</sub> O	0.0049	0.0049	0.0049
DEAmine	0	0	0

Tabla 15. Datos obtenidos simulación hysys contenido de H<sub>2</sub>S.

caudal	5 MMSCFD		
	composición de H <sub>2</sub> S a la entrada		
TIPO DE AMINA	CB	CM	CA
MEA	0.09441583	0.11929151	0.14103192
DEA	0.01153252	0.01472146	0.02058353
TEA	3.75E-08	6.25E-08	9.38E-08
caudal	10 MMSCFD		
	composición de H <sub>2</sub> S a la entrada		
TIPO DE AMINA	CB	CM	CA
MEA	0.09497584	0.11349994	0.13747953
DEA	0.0116619	0.0147812	0.02037437
TEA	0.000004161	0.000008819	0.000017080

Tabla 165. (Continuación) Datos obtenidos simulación hysys contenido de H<sub>2</sub>S.

caudal	15 MMSCFD		
	composición de H <sub>2</sub> S a la entrada		
TIPO DE AMINA	CB	CM	CA
MEA	0.07857324	0.12855371	0.21945119
DEA	0.01305061	0.01759851	0.07021489
TEA	0.00121024	0.00677888	0.06226192

Para realizar el análisis en statgraphics se utilizó el asistente de diseño experimental siguiendo los pasos:

Definición de la variable de respuesta a ser medida, en este ítem la variable es el contenido de H<sub>2</sub>S en la corriente *sweet gas* para determinar la variación de esta al ser afectada por los cambios en caudal y composición.

Tabla 17. Definición de la variable de respuesta.

<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Analizar</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Impacto</i>	<i>Sensibilidad</i>
contenido H <sub>2</sub> S	granos/ 100 SCF de H <sub>2</sub> S	Media	Maximizar	3.0	Medio

Los factores experimentales que varían son los siguientes:

Tabla 18. Definición de variables.

<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Tipo</i>	<i>Papel</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Niveles</i>
A: tipo de amina		Catagórico	Controlable			1,2,3
B: caudal	MMSCFD	Continuo	Controlable	5.0	15.0	
C: composición		Catagórico	Controlable			1,2,3

Como se indica en la Tabla 18 los factores A y C son del tipo categórica ya que sus valores no son de carácter cuantitativo, por otra parte la variable B (caudal) posee una variación continua al ser cuantitativo, los diferentes niveles fueron especificados con anterioridad.

El tipo de diseño escogido es un a diseño factorial multinivel, al tener 3 factores y 3 niveles se decide escoger el modelo de procesamiento de los datos como un modelo cúbico, para obtener así los siguientes resultados.

### **Análisis de efectos**

Los factores categóricos, A: tipo de amina y C: Composición son factores cuyos niveles no representan un cambio de valores si no de propiedades, por el contrario, el factor cuantitativos B: Caudal (MMSCFD) representa la variación del caudal en sus respectivos escenarios (bajo, medio y alto) la Tabla 19 muestra el cálculo de los factores:

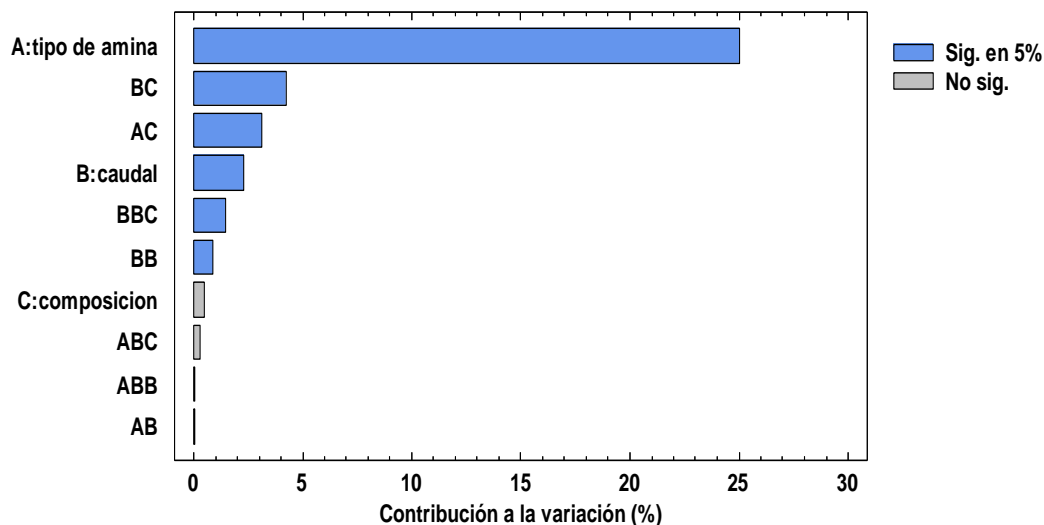
Tabla 19. Resumen de análisis ANOVA H<sub>2</sub>S.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A	0.0234819	2	0.0117409	334.533	0.0000
B	0.00213675	1	0.00213675	60.8823	0.0015
C	0.000440899	2	0.00022045	6.28125	0.0583
AB	0.0000323907	2	0.0000161953	0.461452	0.6602
AC	0.00293494	4	0.000733735	20.9062	0.0061
BB	0.000845417	1	0.000845417	24.0884	0.0080
BC	0.00398803	2	0.00199402	56.8153	0.0012
ABB	0.0000347809	2	0.0000173905	0.495505	0.6423
ABC	0.000284907	4	0.0000712266	2.02945	0.2549
BBC	0.00139112	2	0.000695562	19.8186	0.0084

El programa indica los factores que no son significantes en la variable de respuesta, estos son los factores que están por encima del 5% del valor de P, estos valores

serán descartados al momento de realizar la correlación de los factores con la variable de análisis.

Figura 9. Diagrama de Pareto para contenido de H<sub>2</sub>S.



Para tener una interpretación adecuada se tomarán en cuenta solo aquellos factores que tuvieron un valor menor del 5%, la Figura 9 muestra los factores que son influyentes y los que son insignificantes.

La Tabla 20 presenta las medias de los valores de cada factor y sus respectivas interacciones.

Tabla 20. Medias para contenido H<sub>2</sub>S con 95% Intervalos de confianza.

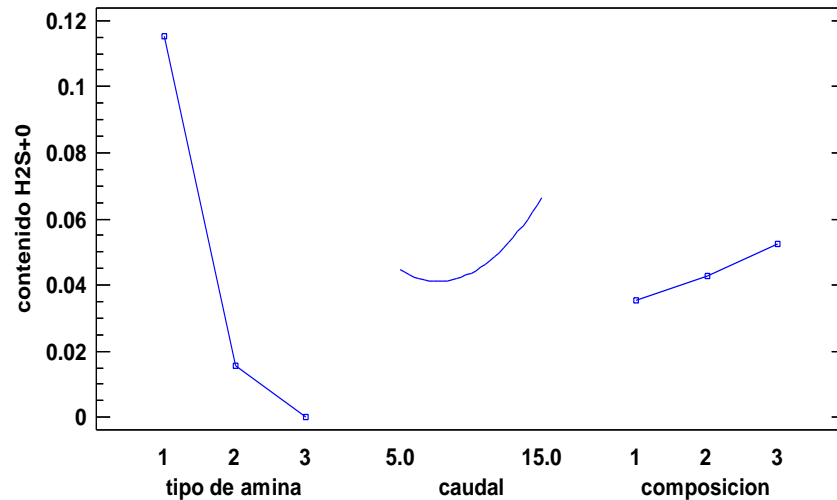
	<i>Estimado</i>	<i>Estándar</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
<i>Nivel de factor</i>	<i>Media</i>	<i>Error</i>	<i>Límite</i>	<i>Límite</i>
Gran media	0.0436448	0.00197474	0.038162	0.0491275
tipo de amina				
1	0.115318	0.00342035	0.105822	0.124815
2	0.0156058	0.00342035	0.00610937	0.0251023
3	0.00001002	0.00342035	-0.00948643	0.00950647
caudal				
5.0	0.0446197	0.00197474	0.0391369	0.0501024
10.0	0.0436448	0.00197474	0.038162	0.0491275
15.0	0.0664104	0.00197474	0.0609276	0.0718931

Tabla 210. (continuación) Medias para contenido H<sub>2</sub>S con 95% Intervalos de confianza.

composición				
1	0.0355473	0.00342035	0.0260508	0.0450438
2	0.0427633	0.00342035	0.0332669	0.0522598
3	0.0526237	0.00342035	0.0431272	0.0621201
tipo de amina por caudal				
1,5.0	0.118246	0.00342035	0.10875	0.127743
1,10.0	0.115318	0.00342035	0.105822	0.124815
1,15.0	0.142193	0.00342035	0.132696	0.151689
2,5.0	0.0156125	0.00342035	0.00611605	0.025109
2,10.0	0.0156058	0.00342035	0.00610937	0.0251023
2,15.0	0.0336213	0.00342035	0.0241249	0.0431178
3,5.0	6.46E-8	0.00342035	-0.00949639	0.00949652
3,10.0	0.00001002	0.00342035	-0.00948643	0.00950647
3,15.0	0.023417	0.00342035	0.0139206	0.0329135
tipo de amina por composición				
1,1	0.0889123	0.00496966	0.0751143	0.10271
1,2	0.114929	0.00496966	0.101131	0.128727
1,3	0.131896	0.00496966	0.118098	0.145694
2,1	0.00800005	0.00496966	-0.00579798	0.0217981
2,2	0.0142327	0.00496966	0.000434658	0.0280307
2,3	0.0245847	0.00441566	0.0123249	0.0368446
3,1	-0.000488462	0.00496966	-0.0142865	0.0133096
3,2	-0.000871421	0.00441566	-0.0131313	0.0113884
3,3	0.00138994	0.00496966	-0.0124081	0.015188
caudal por composición				
5.0,1	0.0353161	0.00342035	0.0258197	0.0448126
5.0,2	0.044671	0.00342035	0.0351746	0.0541675
5.0,3	0.0538718	0.00342035	0.0443754	0.0633683
10.0,1	0.0355473	0.00342035	0.0260508	0.0450438
10.0,2	0.0427633	0.00342035	0.0332669	0.0522598
10.0,3	0.0526237	0.00342035	0.0431272	0.0621201
15.0,1	0.0309447	0.00342035	0.0214482	0.0404412
15.0,2	0.050977	0.00342035	0.0414806	0.0604735
15.0,3	0.117309	0.00342035	0.107813	0.126806

La Figura 10 muestra la interacción de los factores principales con la variable de respuesta, se evidencia que el cambio en el tipo de amina es el que produce la mayor variación en el contenido de H<sub>2</sub>S.

Figura 10. Efectos principales para el contenido de H<sub>2</sub>S.



De igual manera para la remoción de CO<sub>2</sub> se muestran los datos de la composición en la

Tabla 22 y los resultados de la simulación en la Tabla 23.

Tabla 22. Composiciones de análisis en la corriente de entrada caso amina retiro CO<sub>2</sub>.

componente	Composición en la corriente de entrada		
	CB	CM	CA
Nitrogen	0.0089	0.0089	0.0089
CO <sub>2</sub>	0.0628	0.0948	0.1268
H <sub>2</sub> S	0.067	0.067	0.067
Methane	0.836	0.816	0.796
Ethane	0.0061	0.0061	0.0061
Propane	0.0012	0.0012	0.0012
i-Butane	0.0004	0.0004	0.0004
n-Butane	0.0002	0.0002	0.0002
i-Pentane	0.0002	0.0002	0.0002
n-Pentane	0.0001	0.0001	0.0001
n-Hexane	0.0001	0.0001	0.0001
n-Heptane	0.0001	0.0001	0.0001

H <sub>2</sub> O	0.0049	0.0049	0.0049
DEAmine	0	0	0

Tabla 23. Datos obtenidos simulación hysys contenido de CO<sub>2</sub>.

caudal	5 MMSCFD		
	composición de CO <sub>2</sub> a la entrada		
TIPO DE AMINA	CB	CM	CA
MEA	4.47E-02	1.85E-05	1.65E-05
DEA	4.92E-05	5.14E-05	4.61E-05
TEA	5.4922E-05	5.7079E-05	5.1814E-05
caudal	10 MMSCFD		
	composición de CO <sub>2</sub> a la entrada		
TIPO DE AMINA	CB	CM	CA
MEA	2.26E-05	2.42E-05	2.26E-05
DEA	7.11E-04	7.75E-04	8.77E-04
TEA	0.00071636	0.0008318	0.000933392
caudal	15 MMSCFD		
	composición de CO <sub>2</sub> a la entrada		
TIPO DE AMINA	CB	CM	CA
MEA	8.09E-05	6.93E-05	8.02E-05
DEA	9.03E-03	4.62E-02	1.196201
TEA	0.00959847	0.04679576	1.19676889

Para realizar el análisis en statgraphics se utiliza el asistente de diseño experimental el cual permite personalizar cada uno de los pasos antes de realizar el ANOVA, se define la variable de respuesta, los parámetros que varían y el tipo de análisis que se requiere:

Tabla 24. Definición de la variable de respuesta caso CO<sub>2</sub>.

<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Analizar</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Impacto</i>	<i>Sensibilidad</i>
Porcentaje CO <sub>2</sub> (volumen %)	%	Media	Maximizar	3.0	Medio

Los factores experimentales que van a varias son los siguientes:

Tabla 25. Definición de los factores experimentales caso CO<sub>2</sub>

<i>Nombre</i>	<i>Unidades</i>	<i>Tipo</i>	<i>Papel</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Niveles</i>
A:Tipo de Amina		Categórico	Controlable			1,2,3
B:Caudal	MMSCFD	Continuo	Controlable	5.0	15.0	
C:Composición		Categórico	Controlable			1,2,3

Como se indica en la tabla anterior los tipos de datos son iguales a los tomados en el primer análisis.

El tipo de diseño escogido es un a diseño factorial multinivel, al tener 3 factores y 3 niveles se decide escoger el modelo de procesamiento de los datos como un modelo cúbico, para obtener así los siguientes resultados.

Tabla 26. Resumen ANOVA caso CO<sub>2</sub>

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A	0.00000123257	2	6.16286E-7	0.0000233938	1.0000
B	0.33614	1	0.33614	12.7596	0.0233
C	2.4476E-8	2	1.2238E-8	4.64546E-7	1.0000
AB	0.18681	2	0.0934052	3.5456	0.1301
AC	0.210913	4	0.0527282	2.00153	0.2590
BB	0.119478	1	0.119478	4.5353	0.1002
BC	0.61977	2	0.309885	11.763	0.0211
ABB	0.0535809	2	0.0267904	1.01695	0.4395
ABC	0.291977	4	0.0729943	2.77081	0.1737
BBC	0.198381	2	0.0991906	3.7652	0.1203

Tabla 27. Medias para Porcentaje CO<sub>2</sub> (volumen%) con 95% Intervalos de confianza.

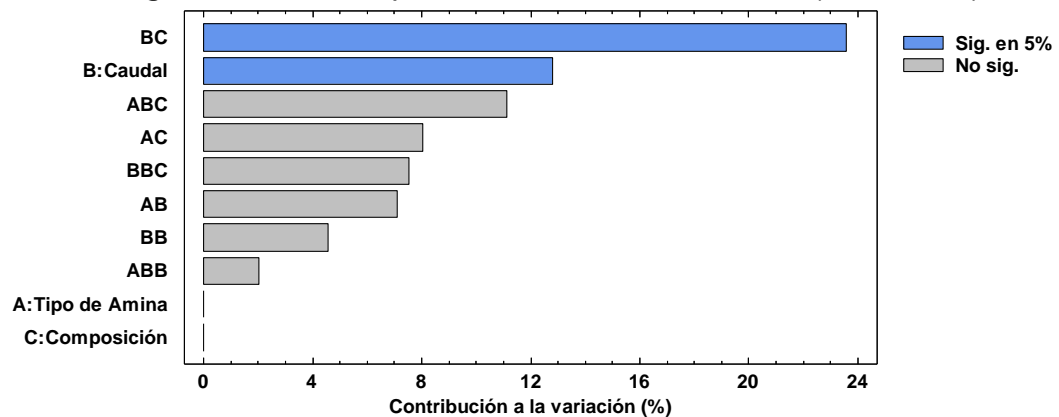
	<i>Estimado</i>	<i>Estándar</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
<i>Nivel de factor</i>	<i>Media</i>	<i>Error</i>	<i>Límite</i>	<i>Límite</i>
Gran media	0.000545995	0.0541028	-0.149668	0.15076
Tipo de Amina				
1	0.0000231333	0.0937088	-0.260155	0.260201
2	0.000787667	0.0937088	-0.25939	0.260966
3	0.000827185	0.0937088	-0.259351	0.261005
Caudal				
5.0	0.00500506	0.0541028	-0.145209	0.155219
10.0	0.000545995	0.0541028	-0.149668	0.15076
15.0	0.278314	0.0541028	0.1281	0.428528
Composición				
1	0.000483322	0.0937088	-0.259695	0.260661
2	0.000543666	0.0937088	-0.259634	0.260722
3	0.000610997	0.0937088	-0.259567	0.260789
Tipo de Amina por Caudal				
1,5.0	0.0149117	0.0937088	-0.245266	0.27509
1,10.0	0.0000231333	0.0937088	-0.260155	0.260201
1,15.0	0.0000768	0.0937088	-0.260101	0.260255
2,5.0	0.0000489	0.0937088	-0.260129	0.260227
2,10.0	0.000787667	0.0937088	-0.25939	0.260966
2,15.0	0.417144	0.0937088	0.156966	0.677322
3,5.0	0.0000546051	0.0937088	-0.260123	0.260233
3,10.0	0.000827185	0.0937088	-0.259351	0.261005
3,15.0	0.417721	0.0937088	0.157543	0.677899
Tipo de Amina por Composición				
1,1	0.0972946	0.136156	-0.280735	0.475325
1,2	0.0395863	0.136156	-0.338444	0.417616
1,3	-0.0881373	0.136156	-0.466167	0.289893
2,1	0.0402905	0.136156	-0.337739	0.418321
2,2	-0.0387802	0.136156	-0.41681	0.33925
2,3	0.000852669	0.120978	-0.335036	0.336741
3,1	-0.0874609	0.136156	-0.465491	0.290569
3,2	0.000824855	0.120978	-0.335064	0.336713
3,3	0.0891176	0.136156	-0.288912	0.467148

Tabla 287. (continuación) Medias para Porcentaje CO<sub>2</sub> (volumen%) con 95% Intervalos de confianza.

Caudal por Composición				
5.0,1	0.0149347	0.0937088	-0.245243	0.275113
5.0,2	0.0000423265	0.0937088	-0.260136	0.26022
5.0,3	0.000038138	0.0937088	-0.26014	0.260216
10.0,1	0.000483322	0.0937088	-0.259695	0.260661
10.0,2	0.000543666	0.0937088	-0.259634	0.260722
10.0,3	0.000610997	0.0937088	-0.259567	0.260789
15.0,1	0.00623646	0.0937088	-0.253942	0.266415
15.0,2	0.0310217	0.0937088	-0.229156	0.2912
15.0,3	0.797683	0.0937088	0.537505	1.05786

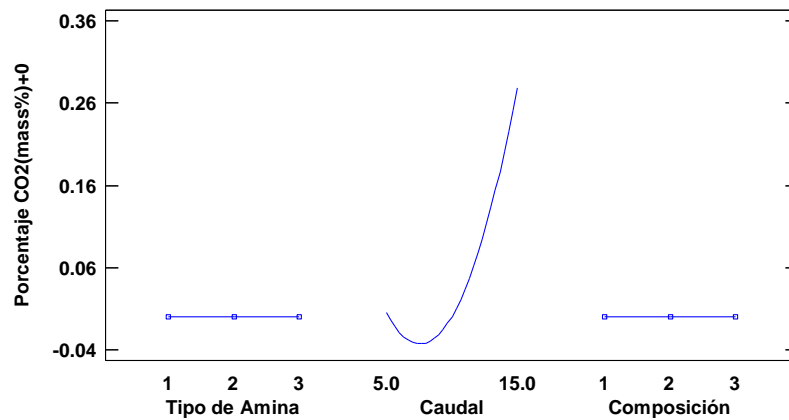
El diagrama de Pareto mostrado en la Figura 11 identifica los factores que son significativos en 5% (color azul claro) mientras que los valores que no son significativos se muestran en color gris, como se evidencia las únicas interacciones que influyen en el contenido de CO<sub>2</sub> a la salida de la torre contactora (gas dulce) son el caudal de entrada y la interacción de este con la composición, se deja afuera el tipo de amina usada debido a que no representa un cambio significativo en la variable de respuesta.

Figura 11. Diagrama de Pareto para la concentración de CO<sub>2</sub>(%volumen)



La Figura 12 muestra la interacción de los factores principales con la variable de respuesta, se evidencia que el cambio en el caudal es el que produce la mayor variación en el contenido de CO<sub>2</sub>.

Figura 12. Efectos principales para Porcentaje de CO<sub>2</sub> (%volumen)



## 6.2 OBTENCIÓN DE DATOS UNIDAD DESHIDRATACIÓN.

De igual manera para la remoción de H<sub>2</sub>O se muestran los datos en la Tabla 29, los datos se obtuvieron mediante el software de simulación hysys.

Tabla 29. Datos obtenidos simulación hysys contenido de H<sub>2</sub>O.

caudal	5 MMSCFD		
	Caudal de Glicol entrada a la contactora		
TIPO DE GLICOL	CB	CM	CA
EG	1.437748822	1.444433676	1.451261318
DEG	1.005682271	1.012082732	1.017811126
TEG	3.354886014	3.380337481	3.403931877
caudal	10 MMSCFD		
	Caudal de Glicol entrada a la contactora USGPM/LBH <sub>2</sub> O remover		
TIPO DE GLICOL	CB	CM	CA
EG	1.432012045	1.438904222	1.442901984

DEG	1.001351388	1.00562309	1.009322804
TEG	3.33621381	3.352938767	3.368413779
caudal	15 MMSCFD		
	Caudal de Glicol entrada a la contactora USGPM/LBH2O remover		
TIPO DE GLICOL	CB	CM	CA
EG	1.427075196	1.435264818	1.440731832
DEG	1.012358924	1.002512952	1.006040625
TEG	3.397340511	3.339631285	3.353747408

Para realizar el análisis en statgraphics se utilizó el asistente de diseño experimental siguiendo los pasos:

Tabla 30. Definición variable de respuesta caso Glicol

Nombre	Unidades	Analizar	Objetivo	Impacto
Contenido de H <sub>2</sub> O en gas	Lb H <sub>2</sub> O /MMSCFD	Media	Maximizar	3.0

Los factores experimentales que van a variar son los siguientes:

Tabla 31. Definición de los factores experimentales caso Glicol.

Nombre	Unidades	Tipo	Papel	Bajo	Alto	Niveles
A:Tipo de glicol		Categorico	Controlable			1,2,3
B:Caudal de gas de alimentación	MMSCFD	Contínuo	Controlable	5.0	15.0	
C:Caudal de Glicol	USGPM/LBH2O remover	Continuo	Controlable	0.5	1.5	

Los factores en este diseño experimental cambio respecto al tipo de variable de análisis debido a que el factor A es el único de tipo categórico, luego los factores B y C se consideran de tipo continuo puesto que se puede tomar cualquier valor entre

el intervalo Bajo-Alto. El tipo de diseño escogido es un a diseño factorial multinivel, al tener 3 factores y 3 niveles se decide escoger el modelo de procesamiento de los datos como un modelo cúbico, para obtener así los siguientes resultados.

Tabla 32. Resumen ANOVA contenido de H<sub>2</sub>O en Gas seco.

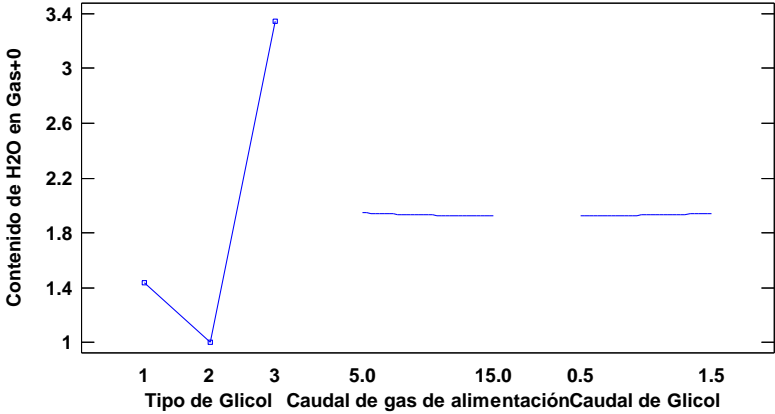
<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A	5.58134	2	2.79067	32084.4	0.0000
B	0.000588948	1	0.000588948	6.77115	0.0353
C	0.000434543	1	0.000434543	4.99595	0.0605
AB	0.0000952029	2	0.0000476014	0.547275	0.6014
AC	0.0000644086	2	0.0000322043	0.370254	0.7033
BB	0.000402976	1	0.000402976	4.63303	0.0684
BC	0.00102568	1	0.00102568	11.7922	0.0109
CC	0.000105207	1	0.000105207	1.20957	0.3078
ABB	0.00036455	2	0.000182275	2.09562	0.1935
ABC	0.0012049	2	0.000602449	6.92637	0.0219
ACC	0.000166976	2	0.0000834881	0.959865	0.4282
BBC	0.000112679	1	0.000112679	1.29547	0.2925
BCC	0.000200047	1	0.000200047	2.29994	0.1732

Tabla 33. Resultados de las medias obtenidas en el software de simulación.

	<i>Estimado</i>	<i>Estandar</i>	<i>Inferior</i>	<i>Superior</i>
<i>Nivel de factor</i>	<i>Media</i>	<i>Error</i>	<i>Límite</i>	<i>Límite</i>
Gran media	1.92917	0.00401338	1.91968	1.93866
Tipo de Glicol				
1	1.43855	0.00695138	1.42211	1.45499
2	1.00408	0.00695138	0.987647	1.02052
3	3.34489	0.00695138	3.32845	3.36132
Caudal de gas de alimentación				
5.0	1.94728	0.00507657	1.93527	1.95928
10.0	1.92917	0.00401338	1.91968	1.93866
15.0	1.92746	0.00507657	1.91546	1.93947
Caudal de Glicol				
0.5	1.92485	0.00507657	1.91285	1.93685
1.0	1.92917	0.00401338	1.91968	1.93866
1.5	1.94187	0.00507657	1.92987	1.95387
Tipo de Glicol por Caudal de gas de alimentación				
1,5.0	1.4498	0.00761485	1.4318	1.46781
1,10.0	1.43855	0.00695138	1.42211	1.45499
1,15.0	1.43025	0.00761485	1.41224	1.44826
2,5.0	1.01523	0.00761485	0.997219	1.03323
2,10.0	1.00408	0.00695138	0.987647	1.02052
2,15.0	1.00091	0.00761485	0.982902	1.01891
3,5.0	3.3768	0.00761485	3.35879	3.3948
3,10.0	3.34489	0.00695138	3.32845	3.36132
3,15.0	3.35122	0.00761485	3.33322	3.36923
Tipo de Glicol por Caudal de Glicol				
1,0.5	1.42775	0.00761485	1.40975	1.44576
1,1.0	1.43855	0.00695138	1.42211	1.45499
1,1.5	1.44752	0.00761485	1.42951	1.46552
2,0.5	1.00027	0.00761485	0.982265	1.01828
2,1.0	1.00408	0.00695138	0.987647	1.02052
2,1.5	1.01194	0.00761485	0.993935	1.02995
3,0.5	3.34653	0.00761485	3.32852	3.36453
3,1.0	3.34489	0.00695138	3.32845	3.36132
3,1.5	3.36615	0.00761485	3.34815	3.38416
Caudal de gas de alimentación por Caudal de Glicol				
5.0,0.5	1.93194	0.0053092	1.91939	1.9445
5.0,1.0	1.94728	0.00507657	1.93527	1.95928
5.0,1.5	1.95684	0.0053092	1.94428	1.96939
10.0,0.5	1.92485	0.00507657	1.91285	1.93685
10.0,1.0	1.92917	0.00401338	1.91968	1.93866
10.0,1.5	1.94187	0.00507657	1.92987	1.95387
15.0,0.5	1.94476	0.0053092	1.93221	1.95732
15.0,1.0	1.92746	0.00507657	1.91546	1.93947
15.0,1.5	1.93268	0.0053092	1.92012	1.94523

La Figura 13 muestra la interacción de los factores principales con la variable de respuesta, se evidencia que el cambio en el tipo de glicol es el que produce la mayor variación en el contenido de H<sub>2</sub>O.

Figura 13. Interacción entre los factores principales.



## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los constantes cambio en el gas de producción debidos a la declinación del pozo generan cambios en la concentración del gas, los contaminantes ácidos tienden a aumentar debido a la formación y tipo de los yacimientos, además de las prácticas de la industria como la reinyección o la fractura hidráulica, la operación eficiente de una planta debe prever dichos cambios para asegurar la confiabilidad y operatividad en la entrega del gas como producto final, realizar dicho análisis se simplifica cuando se crean escenarios en un software de simulación en donde se pueden estudiar las variables bajo especificaciones diferentes a las del diseño inicial.

Mediante el ANOVA se identificaron las variables que tienen efecto significativo sobre el contenido de  $H_2S$  (variable de respuesta), estas variables son: el tipo de amina y el caudal del gas de alimentación; el análisis muestra que las relaciones entre el caudal y las otras variables dan como resultado un aumento en el contenido de  $H_2S$  de gas dulce, por otro lado, la variación de la composición no afecta de forma significativa en este tratamiento, uno de los mejores escenarios encontrados se da al manejar un caudal medio de gas de alimentación y un disolvente como es la trietanolamina TEA.

El proceso de absorción de gases ácidos con amina es exotérmico, para el caso de análisis con metiletanolamina (MEA) es controlado principalmente por la concentración del gas  $H_2S$ , el cual tiene una mayor afinidad con la amina y reacciona primero, el aumento en el caudal de gas de alimentación influye de manera directa a la interacción de la amina con el gas ácido. Para las condiciones establecidas en el diseño 1100psi y 110°F el flujo de amina no retira la cantidad necesaria del contaminante. El caso base que maneja como disolvente Dietanolamina (DEA) se ve afectado directamente por la composición y el flujo de gas de alimentación, pero el retiro de contaminantes continúa estando dentro de los valores aceptados, por

otra parte, el cambio de amina a Trietanolamina (TEA) obtiene una mayor remoción de contaminantes por encima del RUT lo que genera un aumento de costos innecesario.

Las variaciones de la carga acida del gas de alimentación no alteran el tratamiento de deshidratación, para este tratamiento se buscó analizar el flujo y el tipo de glicol para las condiciones de 1100psi y 110°F de la planta, buscando un ahorro económico, encontrando que la variación de flujo de glicol entre los 0.5 gpm/lbh<sub>2</sub>O a remover a los 1.5 gpm/lbh<sub>2</sub>O a remover para las condiciones dadas no eran significativas, el aumento de caudal solo genera un mayor costo, el tipo de glicol más conveniente para el tratamiento del gas resulto ser el DEG quien cumple las condiciones RUT del gas de venta y es más económico.

A partir de los resultados del presente estudio se encontró que la calidad del gas natural para venta y distribución referida a concentración de ácido sulfhídrico (H<sub>2</sub>S) es muy exigente, por esta razón las modificaciones que se pueden realizar a una planta existente para controlar aumentos en este parámetro son restringidas y se recomienda que desde el diseño se realice el dimensionamiento de equipos para manejar cambios en la concentración de H<sub>2</sub>S en el gas de entrada.

Al trabajar con un análisis estadístico se genera una visión más amplia de los resultados, la interacción entre los factores que influyen en una variable de respuesta hacen que se reconozcan escenarios que antes no podían verse con facilidad, muchos de estos serían complejos de analizar sin las herramientas estadísticas. La ventaja del análisis radica en la sencillez con la que el software permite generar diseños estadísticos y las opciones de respuesta que van desde un ANOVA hasta generación de superficies de análisis, lo que permite estructurar planes de acción con información más concisa de diferentes escenarios.

Para mejorar el retiro de  $H_2S$  en una planta existente en donde no se pueden hacer modificaciones a los equipos, la recomendación es cambiar el tipo de amina, ya que una amina como TEA retira una mayor cantidad de contaminantes.

Los equipos críticos en una planta de tratamiento de gas cuando se presenta un aumento en la concentración de gases ácidos en la corriente de gas de producción que ingresa a la planta, están directamente relacionados con la planta de endulzamiento, y son: la torre de absorción, la torre de regeneración de la amina, la bomba de amina y el Aero enfriador de amina. En el diseño de éstos, se debe tener especial cuidado si se espera cambios en el contenido de gases ácidos durante el tiempo de operación de la planta.

Con este trabajo se dejan las bases para analizar los efectos que tienen la composición, el caudal y los diferentes disolventes y desecantes en una planta de tratamiento de gas, analizando una variable de respuesta con la finalidad de condicionar el diseño inicial de la planta y así poder establecer cambios operativos o de equipos, que permitan manejar la fluctuación en la composición del gas natural respecto a los gases ácidos y el contenido de agua.

## BIBLIOGRAFÍA

ARNOLD, Ken y STEWART, Maurice. Design of Gas-Handling Systems and Facilities. 2 ed. Houston (TX). Gulf Publishing Company, 1999. 569 p. (Surface Production Operations; v. 2). ISBN 0-88415-822 5.

BENITEZ M. Carlos J. Evaluación de las variables operacionales de la planta de extracción de gas Jusepín en función de la variación en la calidad del gas de alimentación. Caracas, Julio 2006.

CAMPBELL John M. Gas Conditioning and Processing. Volumen 1: The basic Principles. Library of Congress Catalog Card No.: 76-157183. USA. 1992.

Campbell JM (2014) Gas conditioning and processing, The basic principles, vol 1, 9th edn. Campbell Petroleum Series, Norman, pp. 1-43.

CAMPBELL John M. Gas Conditioning and Processing. Volumen 2: The Equipment Modules. Library of Congress Catalog Card No.: 76-157183. USA. 1992.

CARROLL, John. Natural Gas Hydrates - A Guide for Engineers. 2 ed. Houston (TX). Gulf Publishing Company, 2009. 276 p. ISBN 978-0-7506- 8490-3.

CREG; Resolución CREG-071 de 1999, Reglamento Único de Transporte de Gas –RUT–.

ERDMANN, Eleonora, RUIZ, Liliana Ale, MARTINEZ, Julieta. Endulzamiento de gas natural con aminos. Simulación del proceso y análisis de sensibilidad paramétrico. Argentina: Instituto Tecnológico de Buenos Aires- ITBA, 2012.

GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION - GPSA. Engineering Databook. 12 ed., Tulsa, 2004.

KIDNAY Arthur J. y PARRISH William R. Fundamentals of Natural Gas Processing. Columbus Division, Battelle Memorial Institute and Department of Mechanical Engineering. The Ohio State University Columbus. 2006.

Martínez, M. (2000). Ingeniería de Gas, Principios y Aplicaciones. Endulzamiento del Gas Natural. Ingenieros Consultores SRL. Maracaibo, Venezuela, pp. 8-281.

MOKHATAB, Saeid, POE, William y SPEIGHT, James. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. Boston. Gulf Professional Publishing, 2006. 636 p. ISBN 978-0-7506-7776-9.

PABÓN, Elga Patricia, NAVARRO OCHOA, Ingrid. Evaluación técnico financiera para determinar la mejor alternativa de negocio para comercialización y tratamiento de gas natural para los campos de la superintendencia de Mares de la gerencia regional Magdalena Medio. Colombia: Bucaramanga, 2012.

PEÑA, Hermes; Software Especializado para el Diseño de Plantas de Gas. Modulo 9. Bucaramanga. rev 2014.

PEÑA, Jessica. Diseño de los equipos principales de un proceso de deshidratación de gas natural con glycol. Universidad Simón Bolívar, Caracas: Venezuela, 2016.

PÉREZ AGUDELO, Helí y POTOSÍ HERNÁNDEZ, Oscar, Estudio técnico para optimizar la producción de condensados de las plantas de gas ventas en el CPF Cusiana, Bucaramanga, 2014.

PEREZ PLATA, Henry Mauricio, HERNÁNDEZ TAMAYO, Watson Marcelo. Optimización de los procesos de fraccionamiento en la planta de gas del Centro a partir del uso de la herramienta Hysys. Colombia: Bucaramanga, 2010.

PINO, Fernando; Endulzamiento del gas natural. Universidad de oriente. Monagas; Venezuela. 2011

POZO CRUZ, Lenin Rafael, RUIZ. Captación y tratamiento del gas asociado al petróleo de los campos: Cuyabeno-Sansahuari, y VHR para su utilización como combustible en el sistema de generación eléctrica. Argentina: Universidad de buenos Aires, 2012.

TRISTANCHO, Edgar. Evaluación de alternativas para el diseño y simulación de plantas de procesamiento de gas natural con variación en el contenido de gas ácido ( $H_2S$  Y  $CO_2$ ). Colombia: Bogotá D.C. Universidad nacional de Colombia. 2017