

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR UNA TORRE  
DESROPANIZADORA EN LA PLANTA DE SECADO DE GAS DE  
TERMOYOPAL S.A. E.S.P.**

**ANDERSSON JULIÁN GÓMEZ MEDINA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DEL GAS  
BUCARAMANGA**

**2017**

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR UNA TORRE  
DESPROPANIZADORA EN LA PLANTA DE SECADO DE GAS DE  
TERMOYOPAL S.A. E.S.P.**

**ANDERSSON JULIÁN GÓMEZ MEDINA**

**TRABAJO DE MONOGRAFÍA PARA OPTAR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA  
EN INGENIERÍA DEL GAS**

**DIRECTOR**

**M.Sc. NICOLAS SANTOS SANTOS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE PETROLEOS  
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DEL GAS**

**BUCARAMANGA**

**2017**

## **DEDICATORIA**

Le dedico este trabajo a Dios, que siempre ha guiado mi camino y que me permite día a día formarme académica y profesionalmente.

A mi papá, a quien amo y quien con su amplia experiencia de más de 30 años en la Refinería de Barrancabermeja como Coordinador de Gas y Petroquímica y 6 años como Jefe de Planta de la Planta de Secado de Gas de Termoyopal, me ha brindado grandes aportes técnicos a este trabajo de grado, siendo él mi mayor orgullo.

A mi madre, que amo con todo mi corazón y que hoy soy el profesional que ella formó desde que fue profesora mía en mis primeros años académicos.

A mi hermana por su apoyo y consejos que me fortalecen para tomar decisiones.

A mi novia, a quien amo por su apoyo incondicional y acompañarme en el camino de la vida, además de darme el impulso para finalizar y entregar esta monografía a pesar de las arduas e intrínsecas jornadas de trabajo.

A un gran amigo y compañero, Carlos Bravo Villareal quien es Supervisor de Operaciones de la Planta de Secado de Gas, por sus revisiones y sugerencias a lo largo de la monografía, así como el soporte técnico para mejorar y optimizar las simulaciones en Hysys.

A las empresas STORK Technical Services y la Refinería de Hidrocasanare que me brindaron su apoyo y fueron flexibles en mi horario laboral para permitirme asistir a las clases de la Especialización en la UIS Bucaramanga.

A todos mis compañeros de la Especialización en Ingeniería de Gas X Cohorte, a los profesores, a los docentes asociados, al personal de apoyo del área de posgrados por toda la logística de las clases y por último a las señoras de servicios generales de la UIS, en especial a la señora Vicky por tener siempre el refrigerio listo para nosotros los estudiantes.

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	12
1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO.....	14
2. DEFINICIONES .....	15
2.1 ¿QUÉ ES EL PROPANO?.....	16
2.2. ¿QUÉ ES EL BUTANO?.....	18
2.3. ¿QUIÉN ES TERMOYOPAL S.A. E.S.P.?.....	19
2.4. PLANTA DE SECADO DE GAS DE TERMOYOPAL S.A. E.S.P.....	21
3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN LA PSG.....	25
3.1. GAS DE CARGA A LA PSG.....	25
3.2 SISTEMA DE ENTRADA DE GAS.....	26
3.3 ESTABILIZACIÓN DE CONDENSADOS.....	29
3.4 COMPRESIÓN DE GAS .....	30
3.5 DESHIDRATACIÓN DEL GAS (ABSORCIÓN Y ADSORCIÓN).....	30
3.5.1 DESHIDRATACIÓN POR ABSORCIÓN (TORRE CONTACTORA DE GLICOL)...	31
3.5.2 DESHIDRATACIÓN POR ADSORCIÓN (TAMIZ MOLECULAR - MOL SIEVE)...	34
3.6 FRACCIONAMIENTO DE GAS.....	37
3.6.1 TORRE DESETANIZADORA (FUEL GAS) Y TURBOEXPANSIÓN.....	38
3.6.2 TORRE DESBUTANIZADORA .....	40
3.7 PRODUCTOS DE LA PSG.....	41
3.7.1 ALMACENAMIENTO PRODUCTOS LÍQUIDOS .....	42
3.7.2 CALIDAD DE LOS PRODUCTOS DE LA PSG .....	43
3.8 VENTAS Y DESPACHO.....	44
3.9 SERVICIOS AUXILIARES .....	46
4. SIMULACIONES DEL PROCESO ACTUAL DE LA PSG .....	50
4.1 SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ACTUAL DE LA PSG.....	51
4.2 SIMULACIÓN DE PRODUCCIÓN CON NUEVA TORRE DESPROPANIZADORA EN LA PSG.....	65
4.2.1 CASO 1: Multiplier en 1 (Producción GLP = 0 BPD ó 0%) .....	72
4.2.2 CASO 2: Multiplier en 0,75 (Producción GLP = 492,6 BPD ó 25%) .....	74

4.2.3 CASO 3: Multiplier en 0,5 (Producción GLP = 985,2 BPD ó 50%) .....	75
4.2.4 CASO 4: Multiplier en 0,25 (Producción GLP = 1478 BPD ó 75%) .....	76
4.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE TORRE DESPROANIZADORA T-4090 .....	77
5. ANALISIS FINANCIERO .....	80
5.1. INVERSIÓN .....	80
5.2. FLUJO DE CAJA .....	81
6. CONCLUSIONES .....	85
7. RECOMENDACIONES .....	86
BIBLIOGRAFÍA .....	87

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Almacenamiento y autonomía de combustibles para motor de combustión interna. ....	17
Figura 2. Planta Termoyopal Generación y sus cinco unidades de generación de energía. (Autor). 20	20
Figura 3. Diagrama de bloques de proceso en Planta de Secado de Gas de TY. ....	22
Figura 4. Planta de Secado de Gas de Termoyopal. (Autor).....	23
Figura 5. Modelo 3D de Planta de Secado de Gas de Termoyopal.....	23
Figura 6. Planta de Secado de Gas de Termoyopal. (Autor).....	24
Figura 7. Modelo 3D del sistema de entrada de gas de carga a la PSG.....	27
Figura 8. Modelo 3D del Slug Catcher Tipo Vasija V-1005.....	28
Figura 9. Modelo 3D del Skid de medición de entrada y del aero enfriador E-1010. ....	29
Figura 10. Compresores recíprocos (C-1100 y C-1200) con motores a gas Waukesha de 20 MMSCFD c/u.....	30
Figura 11. Filtro Coalescedor F-2005, Torre Contactora de Glicol T-2020, Separador Criogénico V- 3005. ....	33
Figura 12. Unidad recuperadora de vapores (VRU) y Unidad BTEX. ....	34
Figura 13. Esquema de torres de adsorción <sup>9</sup> . ....	35
Figura 14. Modelo 3D de torres desecantes por adsorción V-3015 y V-3020.....	36
Figura 15. Esquema actual de torres de fraccionamiento de gas en la PSG.....	38
Figura 16. Torre DesEtanizadora de fraccionamiento de gas en PSG. ....	39
Figura 17. Torre DesButanizadora de fraccionamiento de gas en PSG. ....	41
Figura 18. Modelo 3D de almacenamiento de productos. 7 Vasijas de GLP y 2 Tanques de Diluyente 1A.....	43
Figura 19. Gasoducto privado (1.480 m) entre la PSG y la Planta Térmica ambas propiedad de Termoyopal. ....	45
Figura 20. Llenadero de GLP (2 bahías) y Diluyente 1A (2 bahías). ....	46
Figura 21. Reporte de Operaciones TY de entrada Gas Rico a la PSG (Marzo 05 del 2016) .....	52
Figura 22. Composición Gas Entrada PSG en Hysys .....	52
Figura 23. Punto cricondértico y cricondenbárico de la corriente Gas Entrada PSG. ....	53
Figura 24. Diagrama de fases de la corriente Gas Entrada PSG. ....	53
Figura 25. Composición de la corriente Humedad Saturada para saturar el Gas de Entrada con Agua.....	54
Figura 26. Flowsheet de saturación de gas entrada PSG en Hysys.....	55
Figura 27. Component splitter para simular proceso de secado de gas.....	55
Figura 28. Diseño del component splitter para separar agua del gas del proceso de secado de gas en Hysys. ....	56
Figura 29. Reporte de Operaciones Gas Residual o Gas Pobre a la Planta Térmica (Marzo 05 del 2016) .....	57
Figura 30. Composición de la corriente de Gas Residual a Planta Térmica en TY. ....	57

Figura 31. Diagrama de fases de la corriente Gas Residual Térmica. ....	58
Figura 32. Diseño del splitter para separar y obtener corriente de fondo de DesEtanizadora en Hysys. ....	58
Figura 33. Diseño del shortcut para la Columna DesButanizadora T-4100 en Hysys.....	59
Figura 34. Parámetros de diseño del shortcut DesButanizadora en Hysys. ....	60
Figura 35. Platos teóricos y plato de alimentación del Shortcut DesButanizadora en Hysys. ....	60
Figura 36. Condiciones del Distillation Rate en Shortcut DesButanizadora en Hysys.....	61
Figura 37. Diseño y conexionado de corrientes de columna DesButanizadora T-4100 en Hysys....	61
Figura 38. Especificaciones de diseño de columna DesButanizadora T-4100 en Hysys.....	62
Figura 39. Column environment de la torre DesButanizadora T-4100 en Hysys. ....	62
Figura 40. Reporte de producción de GLP y Diluyente 1A del día 05 de Marzo del 2016. ....	63
Figura 41. Flowsheet y tablas de la simulación de producción de la Torre DesButanizadora de la PSG. ....	64
Figura 42. Composición de la corriente de GLP en Hysys. ....	65
Figura 43. Composición de la corriente de GLP en reporte de Marzo 05 del 2016 en la PSG.....	65
Figura 44. Propuesta para la adición de una nueva torre T-4090 DesPropanizadora en la PSG. ....	66
Figura 45. Diseño del shortcut para la Columna DesPropanizadora T-4100 en Hysys. ....	67
Figura 46. Diseño y conexionado de corrientes de columna shortcut DesPropanizadora T-4090 en Hysys. ....	67
Figura 47. Parámetros de diseño del shortcut DesPropanizadora T-4090 en Hysys.....	68
Figura 48. Platos teóricos y plato de alimentación del Shortcut DesPropanizadora en Hysys. ....	68
Figura 49. Condiciones del Distillation Rate en Shortcut DesPropanizadora en Hysys. ....	69
Figura 50. Multiplicador de Hysys para desviar carga a nueva Torre DesPropanizadora. ....	69
Figura 51. Diseño y conexionado de corrientes de columna DesPropanizadora T-4090 en Hysys..	70
Figura 52. Especificaciones de diseño de columna DesPropanizadora T-4090 en Hysys. ....	70
Figura 53. Column environment de la torre DesPropanizadora T-4090 en Hysys. ....	71
Figura 54. Flowsheet y tablas de la simulación de producción de la Torre DesPropanizadora de la PSG. ....	71
Figura 55. Composición de la corriente de Propano en el Caso 1. ....	72
Figura 56. Composición de la corriente de Butano en el Caso 1. ....	73
Figura 57. Advertencia en el diseño de T-4090 con platos perforados por hidráulica. ....	78
Figura 58. Especificaciones técnicas de T-4090 DesPropanizadora como Torre empacada. ....	78
Figura 59. Especificaciones técnicas de T-4090 DesPropanizadora como Torre de platos tipo válvula.....	79

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características físico-químicas del Propano. ....	16
Tabla 2. Características físico-químicas del Butano. ....	18
Tabla 3. Composición del gas de alimentación a la PSG <sup>13</sup> . ....	26
Tabla 4. Condiciones de Operación del Gas de Entrada a la PSG <sup>13</sup> . ....	26
Tabla 5. Parámetros del sistema de deshidratación con tamiz molecular <sup>8</sup> . ....	37
Tabla 6. Datos de producción operacional diaria de Mayo 2016. ....	42
Tabla 7. Composición (% molar) del Gas Seco Residual de la PSG hacia ventas. ....	43
Tabla 8. Composición (% molar) de los productos líquidos de la PSG. ....	44
Tabla 9. Equipos que consumen gas residual en la PSG. ....	47
Tabla 10. Producción de Propano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 1. ....	72
Tabla 11. Producción de Butano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 1. ....	73
Tabla 12. Producción de GLP y condiciones de operación para Caso 1. ....	73
Tabla 13. Producción de Propano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 2. ....	74
Tabla 14. Producción de Butano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 2. ....	74
Tabla 15. Producción de GLP y condiciones de operación para Caso 2. ....	74
Tabla 16. Producción de Propano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 3. ....	75
Tabla 17. Producción de Butano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 3. ....	75
Tabla 18. Producción de GLP y condiciones de operación para Caso 3. ....	76
Tabla 19. Producción de Propano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 4. ....	76
Tabla 20. Producción de Butano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 4. ....	77
Tabla 21. Producción de GLP y condiciones de operación para Caso 4. ....	77
Tabla 22. Costos estimados para la inversión de la implementación de la Torre DesPropanizadora. ....	80
Tabla 23. Precios máximos regulados GLP Octubre 15 a Noviembre 14 de 2016. ....	81
Tabla 24. Ventas promedio mensuales en producción actual de GLP. ....	81
Tabla 25. Ventas promedio esperadas para los 4 casos simulados con la implementación de T-4090. ....	83
Tabla 26. Precios futuros para el GLP, Propano y Butano hasta el 2022. ....	83
Tabla 27. Flujo de caja del Proyecto Columna DesButanizadora y Flujo de caja producción actual de GLP. ....	84

## RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA IMPLEMENTAR UNA TORRE DESPROPANIZADORA EN LA PLANTA DE SECADO DE GAS DE TERMOYOPAL S.A. E.S.P.\*

AUTOR: ANDERSSON JULIÁN GÓMEZ MEDINA \*\*

PALABRAS CLAVES: propano, butano, torre DesPropanizadora, secado de gas, hysys.

Este estudio de factibilidad se ha desarrollado con el propósito de dar soporte a la empresa Termoyopal Gas S.A. E.S.P. para evaluar la capacidad de producción de propano líquido de alta pureza teniendo en cuenta la misma corriente de recibo de gas rico. Esta monografía que se entrega como una ingeniería básica realiza un estudio técnico-económico para la implementación de una torre DesPropanizadora y segregar el GLP de producción para tener una nueva corriente de propano sin suspender la producción de sus actuales productos que son GLP, Diluyente 1A y gas seco hacia la planta térmica de generación.

Se realiza una descripción técnica de cada uno de los sistemas actuales de procesamiento de gas en la planta de secado describiendo desde el recibo de gas hasta el despacho de productos en carro tanques.

Se identifica en el mercado actual de hidrocarburos líquidos la comercialización del propano líquido, usos y ventajas. Se exponen las tendencias de algunos países que han optado por la fabricación de motores de combustión interna a propano, como alternativa de tecnologías limpias y amigables con el medio ambiente.

Se simula en Hysys el proceso de obtención de líquidos a partir del gas incluyendo una propuesta de torre DesPropanizadora con unas condiciones de operación recomendadas para determinar la producción de flujo volumétrico de propano líquido en el procesamiento de gas en Termoyopal S.A. E.S.P.

Por último, se realiza una estimación de los costos de implementación de la nueva torre DesPropanizadora en el proceso actual de la planta de secado de Termoyopal Gas S.A. E.S.P. y se darán algunas recomendaciones encontradas en las corridas de simulación.

---

\* Monografía Especialización Ingeniería del Gas.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Petróleos, Director: Nicolás Santos Santos.

## ABSTRACT

TITLE: FEASIBILITY STUDY TO IMPLEMENT A DEPROPANIZER STABILIZER COLUMN IN GAS DRYER UNIT PROPERTY OF TERMOYOPAL GAS S.A. E.S.P.\*

AUTHOR: ANDERSSON JULIÁN GÓMEZ MEDINA\*\*

KEY WORDS: propane, butane, depropanizer tower, gas dryer unit, hysys.

This feasibility study has been developed with the purpose of supporting the company Termoyopal Gas S.A. E.S.P. to evaluate the ability of producing high purity liquid propane considering the same stream of rich gas at inlet skid. This monograph is delivered as a basic engineering it performs a technical-economic study for the implementation of a depropanizer column and segregating LPG production to have a new propane stream without suspending production of its current products that are LPG, Naphtha 1A and dry gas to the generation power plant.

It performs a technical description of each of the existing gas processing systems in the drying plant describing the processing gas from inlet skid to dispatch products in loading trucks.

It is identified in the actual market hydrocarbon liquid propane marketing in Colombia, uses and advantages. Trends in some countries that have opted for the manufacture of internal combustion engines to burn propane as an alternative clean fuel and friendly environment technologies are discussed.

The process of obtaining liquids from the natural gas is simulated in Hysys including a proposal of depropanizer column with recommended operating conditions to determine the production of volumetric flow of liquid propane in the gas processing Termoyopal S.A. E.S.P.

---

\* Monograph Specialization gas Engineering.

\*\* Faculty Physical-Chemical Engineering, School of Petroleum Engineering, Advisor: Nicolas Santos Santos.

Finally, an estimate of the costs of implementing the new depropanizer tower is performed in the current process of drying plant Termoyopal Gas S.A. E.S.P. and some recommendations found in the simulation runs will be given.

## **INTRODUCCIÓN**

La planta de secado de gas actualmente recibe gas rico proveniente de los yacimientos Pauto y Floreña que son campos operados por la empresa Equión Energía, ubicadas en el piedemonte llanero, corregimiento del Morro a 18 kilómetros de Yopal, capital del departamento de Casanare. El yacimiento del piedemonte llanero de floreña recibe gas de sus diferentes pozos y son concentrados en el CPF de floreña. Desde allí el gas que recibe la planta de secado de gas se interconecta a través de un gasoducto privado (de 10 pulgadas con una longitud de 1,48 Kms) la facilidad de CPF Floreña y la planta de secado de gas transportando un flujo de gas de 40 MMscfd el cual es una corriente de gas altamente rico en contenido energético energético los cuales su poder calorífico está por encima de los 1200 BTU.

Este gas de recibo en la planta de secado de gas es procesado por Termoyopal Gas, el cual sus etapas de procesamiento está el recibo, separación física, compresión, filtración, doble deshidratación (con trietilenglicol y luego secado con tamiz molecular), fraccionamiento en torres de separación, almacenamiento de productos y obtiene fuel gas que alimenta la planta de generación eléctrica a través de un gasoducto privado (de 8in con una longitud de 1.461 metros) y los productos blancos GLP y Diluyente 1A son despachados a través de carros cisternas a través de unos brazos de medición y posteriormente cargados con producto en el llenadero de Termoyopal Gas. El core del proyecto es que se ha detectado que el GLP y el Diluyente 1A se despachan con alto % contenido de propano el cual no puede ser extraído en las actuales torres estabilizadoras.

Actualmente los productos blancos o condensados del Gas (GLP y Diluyente 1A) que se producen la Planta de Secado de Gas de Termoyopal S.A. E.S.P. están siendo despachados con alto contenido de propano (C3+) el cual no puede ser retirado dadas las condiciones actuales de la planta de secado. Esta producción de GLP generalmente cuenta con una concentración molar de propano entre el 64% y 68%. El propano líquido tiene un alto valor monetario en el mercado de la refinación de crudo y también es utilizado para combustión de calderas y hornos. El butano líquido de alta pureza hoy en día tiene valor comercial que duplica el valor comercial de GLP en el mercado de gas LP de Mont Belvieu que es la referencia internacional de los Estados Unidos Americanos hacia el resto de mundo, conocida

como *United States Gulf Coast (USGC)* el cual es el mayor mercado de gases líquidos del petróleo de mundo en la actualidad.

Se desarrollará un estudio de factibilidad que será soportado con una ingeniería conceptual para simular la producción de propano y butano líquido de alta pureza y estimar la nueva producción de los actuales productos que son Gas Seco, Diluyente 1A y GLP.

Al finalizar este trabajo de grado, se debe contar con una ingeniería conceptual para la recuperación de propano y butano líquido de alta pureza con la implementación de una técnica de extracción de NGL's a través de una columna de rectificación. Documentar el proceso de separación y estabilización de condensados, los parámetros de diseño (altura diámetro, platos teóricos, producto, perfiles de la torre) y establecer un análisis técnico-económico que permita a Termoyopal Gas tener una idea más clara para el desarrollo de una ingeniería de detalle y posterior implementación del proyecto en caso de ser viable económicamente.

## 1. ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

Actualmente los productos blancos (GLP y Diluyente 1A) que se producen la Planta de Secado de Gas de Termoyopal S.A. E.S.P. están siendo despachados con alto contenido de propano (C3+) el cual no puede ser retirado dadas las condiciones actuales de la planta de secado.

Teniendo en cuenta que la composición química del GLP es (60% C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> y 40% C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) en la corriente de producción de GLP que se mide en un computador de flujo ubicado previo a la entrada de las vasijas de almacenamiento y corroborado en el patín de ventas de GLP, se observa continuamente una producción de GLP con una concentración molar de propano entre el 64% y 68%.

La intención de este trabajo de monografía es modelar un nuevo sistema de separación a través de una torra rectificadora de GLP para obtener propano con una pureza de 98% en la cima y butano en el fondo también con una pureza del 98% y así para evaluar la cantidad de barriles por día a producir de cada producto para realizar una evaluación técnico económica.

Como consecuencia de este estudio, en caso de ser satisfactorias las simulaciones de producción así como la evaluación técnico-económica, la empresa Termoyopal Gas S.A. E.S.P. será la más beneficiada en retribución a brindarme la posibilidad de estudiar su corriente de gas, su proceso de producción y brindarme los datos técnicos para este estudio. De ser así, se deberá realizar una ingeniería de detalle para el desarrollo de un futuro proyecto en esta empresa.

Se espera conocer la simulación de la producción diaria de los nuevos dos productos blancos y evaluar el mercado transaccional de estos combustibles para completar el estudio económico.

Se realizará una simulación a pequeña escala de la planta de proceso de secado de gas para simular la corriente de entrada y el proceso de fraccionamiento en las actuales torres estabilizadoras, así como una simulación con la torre rectificadora a proponer (DesPropanizadora).

Finalmente en esta monografía se evaluará gran parte del desarrollo de la especialización en ingeniería del gas la cual involucra condiciones de operación midstream y downstream, así como el manejo del simulador Hysys.

## 2. DEFINICIONES

<b>USGC</b>	Costa del golfo de los estados unidos ( <i>United States Gulf Coast</i> )
<b>Bbl</b>	Barril
<b>BPD</b>	Barriles por día
<b>BPCS</b>	Sistema básico de control de proceso ( <i>Basic process control system</i> )
<b>cfm</b>	Pies cúbicos por minuto ( <i>Cubic feet per minute</i> )
<b>ESD</b>	Sistema de parada de emergencia ( <i>Emergency shutdown</i> )
<b>F&amp;G</b>	Sistema de fuego y gas
<b>GLP</b>	Gas licuado de petróleo
<b>gpm</b>	Galones por minuto
<b>HMI</b>	Interfaz hombre máquina ( <i>Human machine interface</i> )
<b>JT</b>	Joule-Thompson
<b>WTI</b>	Referencia Internacional de Crudo dulce de °API 39,6 ( <i>West Texas Intermediate</i> )
<b>MB</b>	Referencia Internacional de Combustibles Petroquímicos en Texas ( <i>Mont Belvieu</i> )
<b>MAWP</b>	Presión máxima de trabajo permitida ( <i>Maximum allowable working pressure</i> )
<b>CCM</b>	Cuarto de Control de Motores.
<b>MeOH</b>	Metanol
<b>MMscfd</b>	Millones de pies cúbicos estándar por día ( <i>Million standard cubic feet per day</i> )
<b>N2</b>	Nitrógeno
<b>USD</b>	Dólares americanos ( <i>United States Dollars</i> )
<b>P&amp;ID</b>	Diagrama de tubería e instrumentación ( <i>Piping &amp; Instrumentation Diagram</i> )
<b>PFD</b>	Diagrama de flujo de proceso ( <i>Process flow diagram</i> )
<b>PSG</b>	Planta de Secado de Gas
<b>PCV</b>	Válvula de control de presión ( <i>Pressure Control Valve</i> )
<b>PSV</b>	Válvula de seguridad ( <i>Pressure Safety Valve</i> )
<b>RETIE</b>	Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas
<b>RVP</b>	Presión de vapor Reid ( <i>Reid vapor pressure</i> )
<b>SCI</b>	Sistema contra incendio
<b>SCH</b>	Clasificación de la tubería que relaciona la presión nominal ( <i>Schedule</i> )
<b>SPT</b>	Sistema de puesta a tierra
<b>TEG</b>	Trietilen Glicol
<b>TY</b>	Termoyopal
<b>VRU</b>	Unidad recuperadora de Vapores ( <i>Vapor recovery Unit</i> )
<b>BTEX</b>	Unidad de Benceno, Tolueno, Etilbenceno, Xileno.
<b>HART</b>	Highway Addressable Remote Transducer
<b>CPF</b>	Facilidad Central de Procesamiento ( <i>Central Processing Facility</i> )
<b>COP</b>	Pesos Colombianos
<b>HYSYS</b>	Software de simulación de procesos en estado estacionario y dinámico

**SIL** Nivel de Integridad de la seguridad (*Safety Integrity Level*)

## 2.1 ¿QUÉ ES EL PROPANO?

El Propano es un alcano formado por 3 átomos de carbono y 8 átomos de hidrógeno, su fórmula es **C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>**, en 1910 se identificó como componente volátil en la gasolina, por el Dr. Walter Snelling de la oficina de minas de los Estados Unidos de América

<sup>1</sup>.

El propano es obtenido del gas natural o de los gases de los procesos de cracking producidos en las instalaciones petroquímicas, es un subproducto del procesamiento del gas natural y de la refinación del petróleo<sup>2</sup>.

Sus características físico-químicas son<sup>3</sup>:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Densidad del propano	580,88 kg/m <sup>3</sup> .
Peso molecular del propano	44,096 g/mol.
Punto de ebullición del propano	-42,11 °C.
Punto de fusión del propano	-188 °C.
Temperatura crítica del propano	94 °C.
Presión crítica del propano	42,51 bar
Poder Calorífico del propano	22.000 Kcal/m <sup>3</sup>
Octanos	104
Rango de inflamabilidad	2,4 - 9,6 % (estrecho)
Baja presión de almacenaje	160-199 psi

**Tabla 1.** Características físico-químicas del Propano.

El propano ha sido usado como combustible automotor desde 1913. Hoy es el combustible alternativo más popular en el mundo con más de 4.000.000 de vehículos funcionando. En USA hay más de 300.000 vehículos a propano que utilizan más de 2.000 millones de litros de combustible automotor de emisiones limpias por año y representa el 66% de todos los vehículos de combustibles alternativos y el 77% de todos los combustibles alternativos utilizados.

El propano se surte a un promedio de entre 40 a 70 litros por minuto. Más rápido que la nafta y el diesel. Para el propano todas las cargas son rápidas.

<sup>1</sup> Requena, L. Vamos a estudiar química orgánica (2001). Ediciones Eneva.

<sup>2</sup> Simulación [En línea], <<http://simulacionprocesosindustriales.blogspot.com.co/2016/02/obtencion-de-etileno-apartir-de-etano.html>>

<sup>3</sup> Propanogas [En línea], <<http://propanogas.com/faq/caracteristicas-propano>>

El propano tiene la eficiencia volumétrica más alta de todos los combustibles alternativos por lo que ofrece tanques de menores medidas para alcanzar mayor rango de recorrido permitiendo más carga útil que cualquier otro combustible<sup>4</sup>.

Algunas aplicaciones del propano son<sup>5</sup>:

- Se emplea como combustible, para uso doméstico, comercial y también en industrias, para hornos, secadoras, calderas.
- Como combustible en motores de combustible interno y en turbinas de gas para generación de electricidad.
- Como gas refrigerante (R290).
- Como gas propulsor en los aerosoles.

Teniendo en cuenta que el propano es el combustible alternativo más popular en el mundo con más de 4.000.000 de vehículos funcionando<sup>4</sup>, a continuación se enlistan algunas ventajas de este combustible como uso automotor:

- Ahorro de Espacio – La capacidad de ser guardado a bordo como un líquido permite a los vehículos llevar la misma cantidad de combustible en el espacio equivalente de los combustibles tradicionales.
- Rango – La distancia recorrida es comparable a la de la nafta y mejor que cualquier otro combustible alternativo.
- Velocidad de carga – Al ser surtido como líquido el propano es comparable con el de la nafta. La capacidad de carga puede llegar hasta los 70 litros por minuto.
- Costo de conversión – Más bajo que otros combustibles alternativos.



**Figura 1.** Almacenamiento y autonomía de combustibles para motor de combustión interna.

El etileno ocupa el segmento más importante de la industria petroquímica y es convertido en una gran cantidad de productos finales e intermedios como plásticos, resinas, fibras y elastómeros (todos ellos polímeros) y solventes, recubrimientos, plastificantes y anticongelantes. La obtención de etileno se alimenta una corriente 70% de etano y 30% de

<sup>4</sup> Cleanfuel [En línea], < <http://www.cleanfuel.com.ar/propano.htm>>

<sup>5</sup> Ecured [En línea], < <https://www.ecured.cu/Propano>>

propano. Des hidrogenación de propano convierte el propano en propileno e hidrógeno subproducto<sup>2</sup>.

## 2.2. ¿QUÉ ES EL BUTANO?

El Butano es un Hidrocarburo perteneciente a la familia de los Alcanos formado por 4 átomos de carbono y 10 átomos de hidrógeno, su fórmula semi desarrollada es **CH<sub>3</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-CH<sub>3</sub>**. También es conocido como n-butano<sup>5</sup>.

El butano es obtenido mediante destilación fraccionada del petróleo, estando presente en este y en el gas natural.

Sus características físico-químicas son<sup>7</sup>:

CARACTERÍSTICA	VALOR
Densidad del butano	601,1 kg/m <sup>3</sup> .
Peso molecular del butano	58,123 g/mol.
Punto de ebullición del butano	-0,49 °C.
Punto de fusión del butano	-138,29 °C.
Temperatura crítica del butano	151,98 °C.
Presión crítica del butano	37,96 bar
Poder Calorífico del butano	28.300 Kcal/m <sup>3</sup>
Octanos	90
Rango de inflamabilidad	1,8 - 8,5% (estrecho)
Baja presión de almacenaje	160-199 psi

**Tabla 2.** Características físico-químicas del Butano.

Se lo utiliza para cocinas y calentadores en cantidades moderadas, debido a las limitaciones impuestas por su manipulación, transporte y almacenaje. El gas butano no se transporta por gasoductos ya que por su alta temperatura de licuefacción se puede condensar en las tuberías. En caso de extinción de un fuego por gas butano se emplea dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), polvo químico o niebla de agua para enfriar y dispersar vapores<sup>5</sup>.

Si se produce una fuga de gas butano, y no se actúa con determinación y precaución, este puede producir una deflagración o explosión terminando en incendio, en el caso de incendio provocado por gas butano o este sea el principal combustible deberá utilizarse para su extinción Dióxido de carbono(CO<sub>2</sub>), polvo químico o niebla de agua para enfriar y dispersar vapores.

La inhalación de gas butano provoca somnolencia y posible pérdida de conocimiento, estos síntomas no deben confundirse con los provocados por la inhalación de monóxido (CO), la

denominada muerte dulce, mucha más peligrosa y provocada por la mala combustión de los equipos a gas.

### **2.3. ¿QUIÉN ES TERMOYOPAL S.A. E.S.P.?**

El grupo Termoyopal nace en el año 2003 como empresa de generación de energía eléctrica con dos plantas de generación turbogas General Electric; Termoyopal Generación 1 y 2 de 20 MW y 30 MW respectivamente.

En el año 2007 se instalaron otras tres plantas; Central Termoeléctrica El Morro 1 y 2 de 20 MW cada una y Generadora Cimarrón también de 20 MW. Todas usan como combustible gas natural entregado directamente desde CPF de Floreña (Equión Energía).

Adicionalmente con el fin de mejorar la combustión en las plantas y reducir la emisión de NOx a la atmósfera, se construyó una Planta de Secado de Gas obteniendo GLP, gasolina natural y entregar el gas seco a la planta térmica con el fin de reducir el poder calorífico el cual es requerido por las turbinas de generación de la termoeléctrica y esto se realiza a través de la extracción de productos blancos del gas que se recibe del CPF de Floreña<sup>6</sup>.

El grupo Termoyopal cuenta con dos empresas que son Termoyopal Generación y Termoyopal Gas. Termoyopal Generación está ubicada en un terreno contiguo a CPF Floreña (Equión Energía), localizado en inmediaciones del corregimiento de "El Morro", a 18 Km de El Yopal departamento de Casanare, oriente de Colombia. Las dos empresas distan alrededor de 600 metros en línea recta y las comunica un gasoducto propio y privado de 1480 metros donde la planta de secado de gas le entrega gas seco a la planta de generación eléctrica.

La Empresa cumple con todos los estándares de seguridad, calidad y regulación ambiental para un correcto funcionamiento y cuidado de sus empleados<sup>7</sup>.

En algunos párrafos, aparecerá la sigla "TY" que corresponde a la abreviatura de Termoyopal y la aparecerá la sigla "PSG" que corresponde a la abreviatura de Planta de Secado de Gas.

---

<sup>6</sup> CPF Floreña (Central Processing Facility of Floreña)

<sup>7</sup> Grupo Termoyopal [En línea] <[http://termoyopal.com.co/site/nosotros-/historia\\_291](http://termoyopal.com.co/site/nosotros-/historia_291)>



**Figura 2.** Planta Termoyopal Generación y sus cinco unidades de generación de energía. (Autor)

## 2.4. PLANTA DE SECADO DE GAS DE TERMOYOPAL S.A. E.S.P.

La planta de secado de Gas del Grupo de Termoyopal fue construida por la empresa *Valerus Compression Services* en el año 2012 bajo un contrato turn-key (llave en mano) con un monto aproximado de 90 MMUSD. El arranque y puesta en marcha de la planta de secado fue en Marzo del 2013.

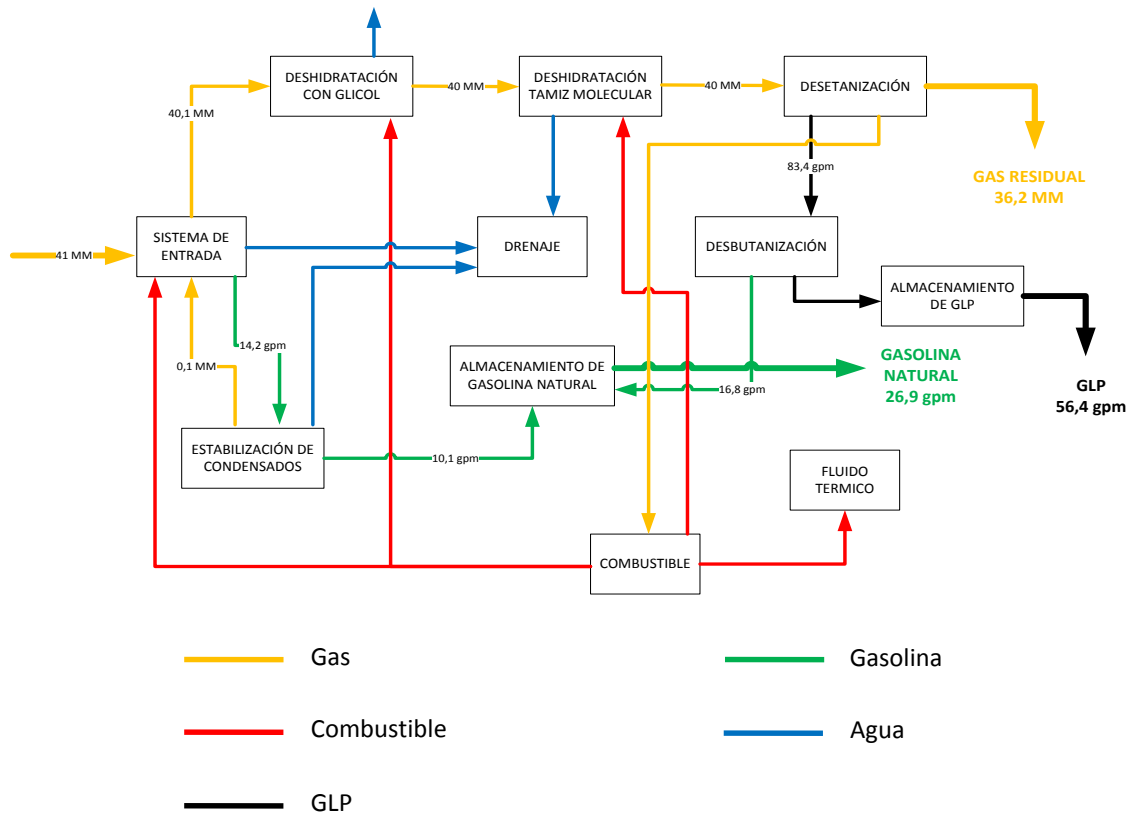
La PSG es una unidad que recibe el gas proveniente de Equión Energía y lo separa en sus tres principales constituyentes, a saber: gasolina natural, GLP y gas residual. La unidad también cumple con la función de retirar el agua del gas de alimentación<sup>8</sup>. La PSG está diseñada para procesar 40 MMSCDF los cuales se nomina diariamente toda la capacidad de procesamiento.

El flujo de diseño de la planta de secado de gas es de 40 MMscfd para la composición base operando dos compresores de gas (C-1100 y C-1200) los cuales descargar a 900 psi y para la recuperación de condensados se realiza una expansión a 260 psi con un turbo expander LA Turbine de 42.000 rpm operando a -119°F. El flujo mínimo de operación (turndown) de la PSG es de 40% de su capacidad de diseño siendo este 16 MMscfd el turndown. En la mínima carga 16 MMscfd operan sólo un compresor de gas C-1100 descargando a 900 psi y la expansión es con diferencial de presión (Joule-Thompson) realizando una expansión hasta 260°F (presión de operación de la DesEtanizadora) a -65°F.

El proceso más recomendado para la extracción de líquidos dentro de un gas rico es el de compresión y expansión por control de Dew Point. A continuación se relaciona un diagrama de bloques que sintetiza el proceso de recibo, deshidratación, compresión, expansión, almacenamiento y producción / despacho de productos blancos<sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> [2013] Manual de Operaciones. *Planta de Secado de Gas de Termoyopal Gas S.A. E.S.P.*

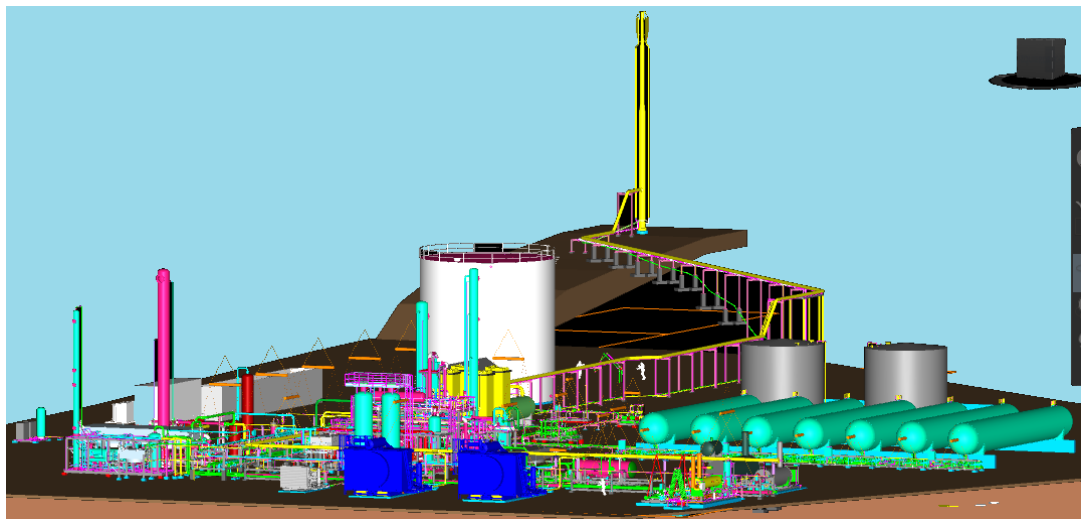


**Figura 3.** Diagrama de bloques de proceso en Planta de Secado de Gas de TY.

Además, la planta PSG cuenta con servicios auxiliares que son la PTAR (Planta de Tratamiento de Aguas Residuales), el Separador API (Separador Aguas aceitosas), Generador auxiliar 480 VAC, Unidad de Aire de Instrumentos y Sistema de Fire & Gas.



**Figura 4.** Planta de Secado de Gas de Termoyopal. (Autor)



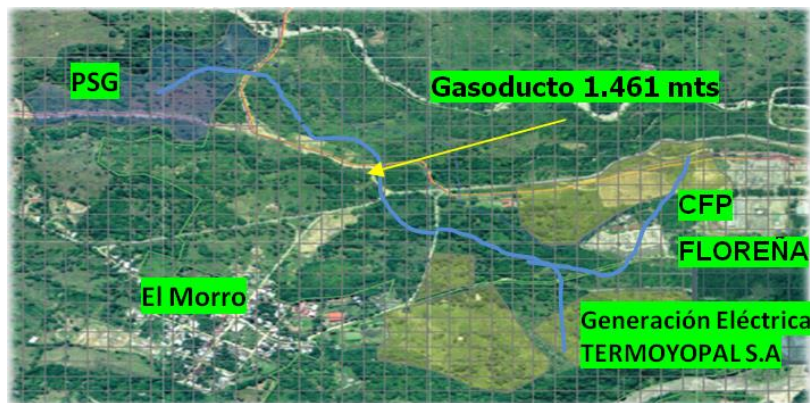
**Figura 5.** Modelo 3D de Planta de Secado de Gas de Termoyopal.

Para el desarrollo de la monografía se usará como referencia el modelo 3D de la planta.

Teniendo en cuenta la información de la figura 2, se observan que la producción esperada para una carga normal de 40 MMSCFD es:

- ✓ 1.934 Barriles por día (BPD) de GLP (56,4 GPM) con un contenido de 2% VL máximo de etano y 2% VL máximo de isopentano y más pesados (iC5+).
- ✓ 923 Barriles por día (BPD) de Disolvente 1A (26,9 GPM) con un RVP (Presión de vapor Reid) de 12 psia máximo.
- ✓ 36,2 MMSCFD de gas seco de menor poder calorífico (Aprox. 1046 BTU/PCE HHV) que el gas de carga, requerida por las 5 turbinas de generación General Electric (GE) diseñadas para quemar un gas seco no superior a 1050 BTU/PCE HHV.

No obstante, estas expectativas de producción pueden variar un poco de acuerdo a las condiciones de operación de las torres de fraccionamiento.



**Figura 6.** Planta de Secado de Gas de Termoyopal. (Autor)

La planta PSG es dirigida por el Jefe de la Planta de Secado como máxima autoridad de la planta. A su cargo están 20 personas por turno que son: Supervisor de Monitoreo y Control (1 por turno), Supervisor Supernumerario (1 por turno) Operador de Proceso (1 por turno), Operador de llenadero (1 por turno), Analista de Laboratorio (1 por turno) quienes laboran turnos de 12 Horas. En horario administrativo y también bajo su cargo la Auxiliar de Pre inspección, Profesional de Despacho, Profesional de Compras, Ingeniero Coordinador de Mantenimiento, Ingeniero Jr de Instrumentación y Control, Ingeniero de Confiabilidad, Ingeniero de Proceso, Técnico Mecánico de Mantenimiento (2), Técnicos Eléctricos (2), Técnico Instrumentista (1), Ayudante Aprendiz de Instrumentación Sena (1). Jardinero (1), Oficios Varios (1).

### 3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO EN LA PSG

Los sistemas que conforman la operación de la Planta de Secado de Gas, son:

- ✓ Gas de carga a la PSG
- ✓ Sistema de entrada de Gas a la planta
- ✓ Estabilización de condensados.
- ✓ Compresión de Gas.
- ✓ Sistema de deshidratación del gas.
- ✓ Fraccionamiento del Gas.
- ✓ Productos de la PSG.
- ✓ Ventas y despacho.
- ✓ Servicios Auxiliares

#### 3.1. GAS DE CARGA A LA PSG

La PSG se alimenta de un gas natural con un alto poder calorífico (aproximadamente 1250 BTU/MMscfd) proveniente de Equión Energía cuya composición se presenta en la siguiente Tabla. El diseño de la Planta prevé dos casos extremos en composición, denominados “Rico” y “Pobre”, estas menciones hacen referencia al contenido de hidrocarburos de alto peso molecular como el hexano y todos los que tienen un número de carbonos superior, estos se nombran como C6+.

Compuesto	Fórmula	Composición (% molar)		
		Base	Rico	Pobre
Nitrógeno	N <sub>2</sub>	0,47	0,39	0,3935
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	3,28	3,5	3,2236
Metano	CH <sub>4</sub>	76,63	72,53	79,8805
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	9,28	9,53	9,8687
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	4,77	5,25	4,2663
i-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1,35	1,64	0,9506
n-Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1,55	2	0,9785
i-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,78	1,09	0,264
n-Pentano	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,47	0,71	0,1329

Compuesto	Fórmula	Composición (% molar)		
		Base	Rico	Pobre
Hexanos y superiores	C6+	1,42	3,36	0,0314

**Tabla 3.** Composición del gas de alimentación a la PSG<sup>12</sup>.

	Unidad	Valor
<b>Flujo</b>	MMscfd	40
<b>Presión</b>	psig	500-600
<b>Temperatura</b>	°F	120-150
<b>Poder Calorífico</b>	BTU/MMscfd	1260

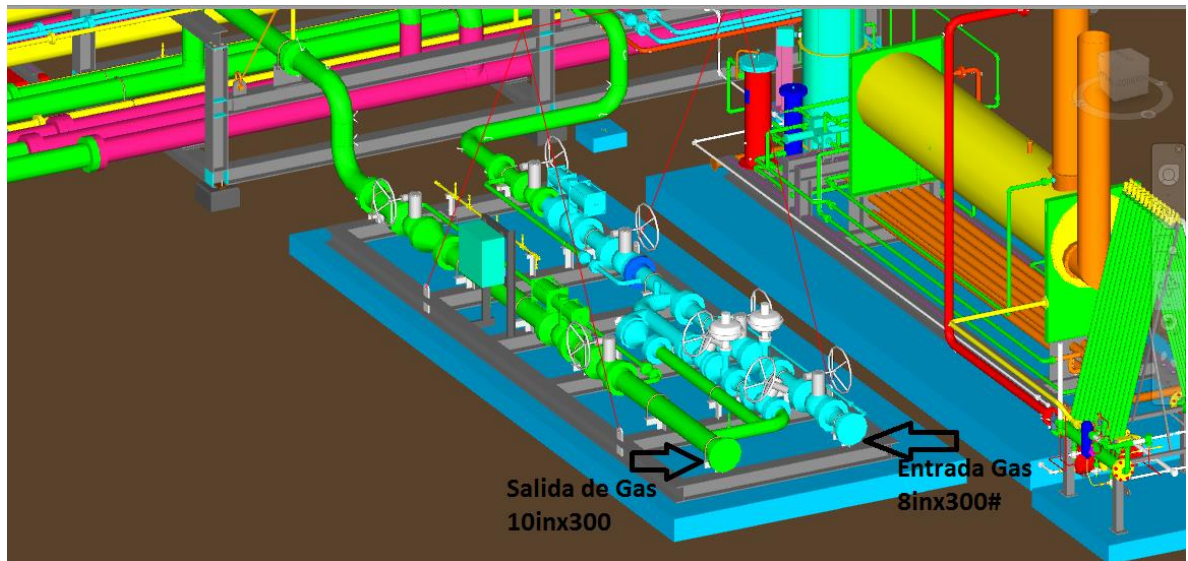
**Tabla 4.** Condiciones de Operación del Gas de Entrada a la PSG<sup>12</sup>.

De la anterior composición del gas de alimentación de la Tabla 3 nace el interés de esta monografía y es que si se observan los componentes pesados del gas de alimentación, las corrientes de C1 (metano) y C2 (etano) alcanzan a estar entre el 90% de la composición molar total. Esto refleja que de los componentes pesados que son casi el 10% -donde está el interés económico de un proyecto debido a que los hidrocarburos líquidos tienen un mayor valor comercial- la mitad de estos componentes pesados es ocupada por el propano que en su calidad de Gas Rico tiene el 5,25% de la composición normalizada y en el peor de los casos, Gas Pobre, el Propano corresponde al 4.77% de la composición normalizada, siendo este el 65% de los componentes pesados a recuperar en líquidos. No obstante, el personal de Operaciones de la Planta de Secado de Gas indica que siempre han recibido un Gas Rico y con alto contenido de Propano.

### 3.2 SISTEMA DE ENTRADA DE GAS

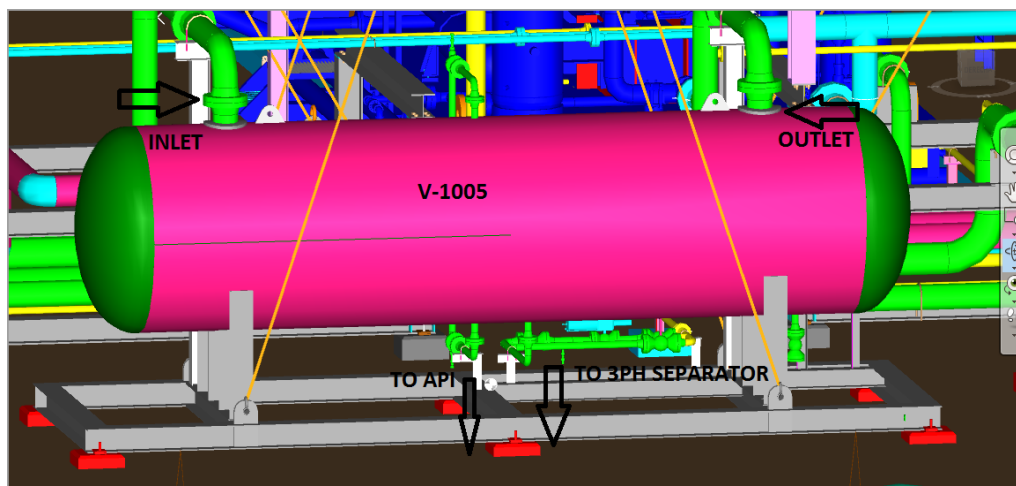
El gas de carga proveniente de Equión Energía se recibe en la PSG a través de un gasoducto privado de 1.461 metros en una línea de 8 pulgadas sch. 300 en acero al carbón. En este punto se reciben normalmente 40 MMSCFD de gas de carga a 560-600 psig y a una temperatura entre 130-150 °F, garantizando el hidrocarburo en una fase gaseosa.

El skid de entrada se conoce como ZZZ-0010. Cabe mencionar que este skid tiene un by-pass que opera con una PCV regulando la presión a 265 psig alimentando a la planta de generación con gas rico. Esta PCV es operada por gas de proceso y se activa cuando hay un shutdown o evento operacional en la PSG que no permita el recibo de gas a la PSG.



**Figura 7.** Modelo 3D del sistema de entrada de gas de carga a la PSG.

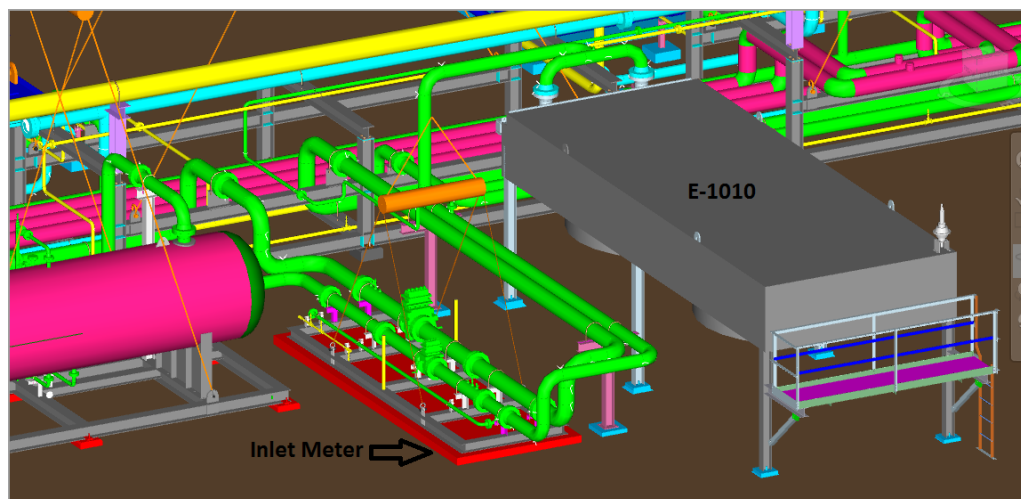
Posteriormente una vez el gas de carga ingresa a la PSG a través del skid de entrada, se recibe en un slug catcher tipo vasija (cilindro horizontal) con tag V-1005 que opera como estabilizador de baches y separa físicamente una parte de los líquidos de alimentación los cuales son liberados por gravedad en la parte baja de la V-1005. Al interior de la V-1005 se tiene un deflector que separa los líquidos de fondo en agua y condensados. Las aguas recuperadas van hacia el separador API de la PSG y los hidrocarburos condensados que se recuperaran van directamente a la unidad de tratamiento de condensados sin sistema de bombeo debido a que el V-1005 opera a 460 psig. Los consumidores de gas en la planta PSG son: Horno de aceite caliente, Horno de gas de regeneración y el horno de gas de regeneración de glicol, compresores 1100 y 1200 y el gas de piloto a Tea. Los anteriores servicios consumen 4.5 MMSCFD de gas. El resto es devuelto como Fuel Gas a la Planta de Generación Térmica, que para una carga normal de 40 MMSCFD, se devuelven a la Planta Térmica 35.5 MMSCFD de fuel gas.



**Figura 8.** Modelo 3D del Slug Catcher Tipo Vasija V-1005.

La salida del slug catcher V-1005 se dirige hacia la unidad de medición de entrada de gas el cual se mide en el skid ZZZ-000 (inlet meter) a través de un medidor Daniel Senior Orifice Fitting de 8 pulgadas. El sistema de medición tiene conectado un computador de flujo que mide el flujo de gas de entrada a la planta. El sistema de medición de entrada también tiene un cromatógrafo de gas en línea (AC-0101) Danalyzer Modelo 500 el cual caracteriza el gas de entrada de forma continua. Esta información es llevada al cuarto de control (HMI) y es monitoreada por el Supervisor de Monitoreo y Control.

Una vez el gas es medido por la unidad medición de entrada de gas, se mezcla con la descarga del compresor de reciclo (C-1300) para ser dirigidos al aero enfriador de entrada E-1010 el cual enfría la corriente de gas hasta 110°F que se dirige al separador de entrada V-1020 que separa fase líquida (hacia tratamiento de condensados) y la fase gaseosa (hacia etapa de compresión de gas).



**Figura 9.** Modelo 3D del Skid de medición de entrada y del aero enfriador E-1010.

### 3.3 ESTABILIZACIÓN DE CONDENSADOS

Los condensados que salen del V-1005 y V-1020 se envían por una línea que recupera los evacuados por otros dos equipos en la sección de Deshidratación con Glicol: el Filtro coalescedor F-2005 y la torre de contacto de glicol T-2020. El líquido acumulado proveniente de estos equipos se dirige al pre calentador de condensados E-6020 donde se somete a una temperatura de 120°F usando el aceite térmico como medio. Este flujo caliente ingresa al estabilizador trifásico V-6010 que separa dos líquidos por la parte inferior (agua e hidrocarburos) que son enviados hacia el separador de aguas aceitosas SEP-8000 y la Torre de estabilización de condensados T-6040, respectivamente. Por la parte superior sale el gas hacia el sistema de compresión (compresor de recicló C-1300), saturado en agua, donde se mezcla con el gas que sale del V-1005<sup>8</sup>.

La Torre de estabilización de condensados T-6040 es una torre despojadora con empaque en el interior, en la que el líquido ingresa por la parte superior y el vapor que fluye a contracorriente se produce en el rehervidor E-6050 para despojar el líquido que ingresa de sus compuestos más volátiles y posteriormente reunirse con la salida del V-6010 para envío a compresión en C-1300. En fondo de columna los condensados pasan al enfriador de condensados de estabilización E-6030 donde la temperatura desciende desde 290°F a la salida de la columna hasta 120°F y el líquido es enviado luego hacia los tanques de almacenamiento de Diluyente 1A. Para el control de la calidad del producto de fondo de la columna, se utiliza la temperatura de rehervidor, regulación que se hace por medio del control de flujo de aceite térmico que ingresa. A la salida de la T-6040 la Gasolina natural tiene una presión de vapor Reid (RVP) de 13,5 psia<sup>8</sup>.

### 3.4 COMPRESIÓN DE GAS

El gas que sale por la cima del separador de entrada V-1020 con una presión de 460 psia y una temperatura de 120°F. Esta corriente gaseosa alimenta la succión de dos compresores recíprocos de Gas Waukesha de 1 etapa y dos cilindros con tag C-1100 y C-1200 los cuales tienen una capacidad de procesamiento de 20 MMSCFD cada uno. Esto indica que en full carga 40 MMSCFD operan los dos compresores en paralelo. La corriente gaseosa se presiona de 460 psia a la succión hasta 920 psia en la descarga, dirigiéndose al sistema de deshidratación del gas que para una mayor eficiencia está configurado una deshidratación por absorción y luego deshidratación por adsorción.



**Figura 10.** Compresores recíprocos (C-1100 y C-1200) con motores a gas Waukesha de 20 MMSCFD c/u.

### 3.5 DESHIDRATACIÓN DEL GAS (ABSORCIÓN Y ADSORCIÓN)

La descarga de cada compresor de gas (C-1100 y C-1200) está construida en una tubería de acero al carbón de 6 pulgadas que luego se unen a un cabezal de 8 pulgadas y es dirigida hacia el filtro coalescedor F-2005 que recupera pequeñas gotas de líquido que se encuentran en el gas. El líquido que se separa por la parte inferior del filtro se envía hacia el sistema de

condensados y el gas pasa al proceso de deshidratación por absorción en la Torre de contacto de glicol.

### **3.5.1 DESHIDRATACIÓN POR ABSORCIÓN (TORRE CONTACTORA DE GLICOL)**

La absorción de gases es una operación en la cual una mezcla gaseosa se pone en contacto con un líquido, a fin de disolver de manera selectiva uno o más componentes del gas y de obtener una solución de estos en el líquido. Esta operación requiere la transferencia de masa de una sustancia en la corriente gaseosa al líquido, el cual es posible mediante la adición de un líquido con alta higroscopicidad o facilidad para retirar el agua.

Para un determinado gas, la fracción de cada componente del gas que es absorbido por el aceite es una función de la relación del equilibrio de fases de los componentes con el aceite pobre, las tasas de flujo relativas y las etapas de contacto. La relación de fases es función de la presión, la temperatura y la composición del aceite pobre<sup>9</sup>.

La deshidratación del gas por absorción en la PSG tiene como elemento de contacto el Trietilen glicol teniendo en cuenta que los glicoles son los desecantes líquidos más efectivos. Dentro de este proceso se entiende como Rich Glycol como el glicol que sale de la torre contactora T-2020 hacia la unidad de recuperación de vapores. En otras palabras, el glicol rico es el glicol con contenido de agua. En ese sentido, el Poor Glycol es el glicol deshidratado y que viene hacia la torre contactora en su mayor parte seco proveniente de la unidad recuperadora de vapores.

El TEG es un líquido higroscópico no volátil, inodoro e incoloro. Se caracteriza por tener dos grupos hidroxilos y dos uniones de éter, lo cual contribuye a su alta solubilidad en el agua, su higroscopicidad, sus propiedades como solvente y su reactividad con muchos componentes.

El trietilen glicol ha ganado la aceptación universal, como el más efectivo de los glicoles, debido a que logra mayor depresión del punto de rocío, y tiene bajos costos de operación. La deshidratación con glicol es más económica que la deshidratación con desecante sólido.

El TEG ha sido usado para deshidratar gases dulces y ácidos en los siguientes rangos de operación<sup>10</sup>.

---

<sup>9</sup> SANTOS, NICOLAS. Absorción. Capítulo 3. Especialización Ingeniería de Gas. Universidad Industrial de Santander -UIS-. 2011

<sup>10</sup> SANTOS, NICOLAS. Deshidratación. Capítulo 5. Especialización Ingeniería de Gas. Universidad Industrial de Santander - UIS-. 2010.

Depresión del punto de rocío 20-40 0F  
Presión 25-2500 psi  
Temperatura 40-160 0F

Ventajas de usar TEG:

- Puede ser regenerado con facilidad
- Menores pérdidas por vaporización
- Requiere un equipo de regeneración simple
- Tiene la mayor temperatura de regeneración de los glicoles 400 °F.

Limitación del TEG:

- No es apto para procesos criogénicos
- Es corrosivo si se contamina con H<sub>2</sub>S

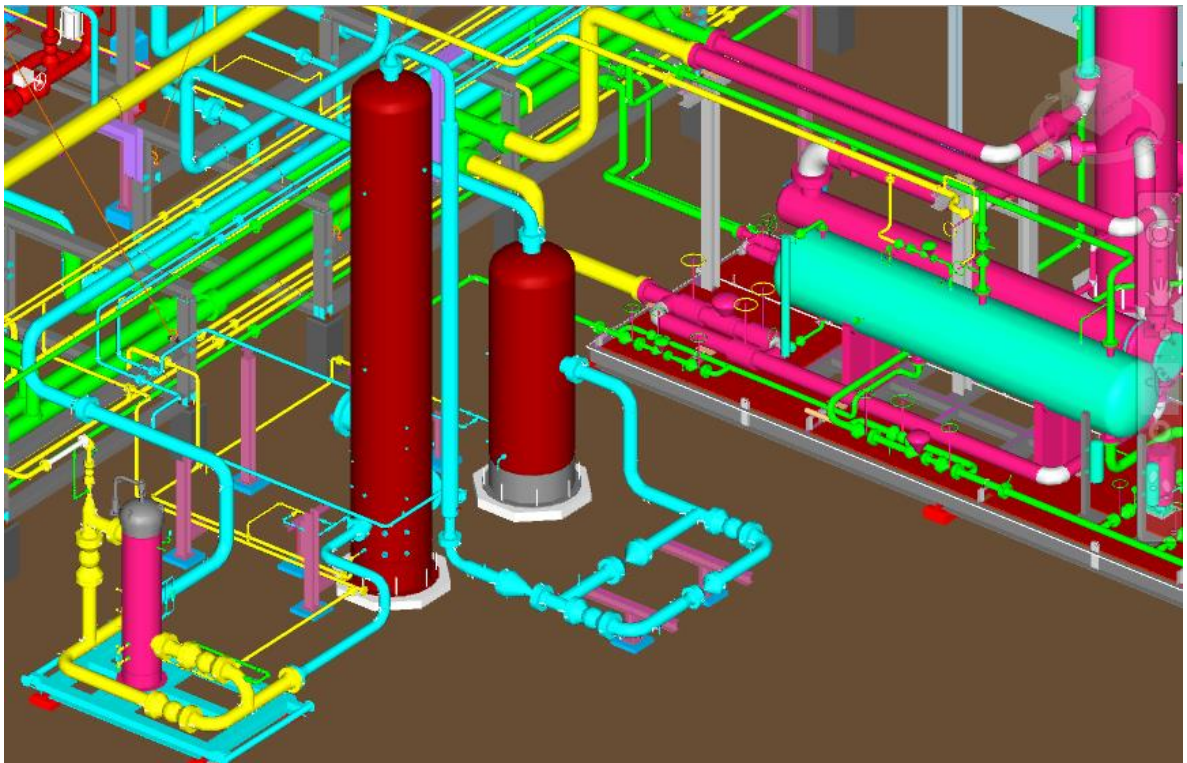
El gas que sale de la cima del filtro F-2005 pasa a la Torre de contacto de glicol T-2020 donde se alimenta por el fondo y se pone en contacto con el TEG (Trietilen Glicol) pobre que se alimenta por la cima. La corriente gaseosa a la entrada de esta torre tiene un contenido aproximado de 110 lb-agua/MMscf. El objetivo de esta etapa es reducir el contenido de agua hasta 10 lb-agua/MMscf aproximadamente, que corresponde al contenido de agua del gas a la salida de T-2020. El gas a la salida de la torre pasa por el intercambiador gas/glicol E-2010 que lo calienta y a la salida de este se envía al separador inicial del sistema criogénico V-3005.

El TEG que alimenta a la T-2020 se encuentra en un circuito cerrado: a la entrada de la torre el TEG es pobre en agua y a la salida de la torre se encuentra enriquecido por el agua absorbida y es enviado al sistema de regeneración que retira el agua para retornar de nuevo a la cima de la T-2020. El flujo de glicol en este circuito es de 1700 lb-TEG/MMscf. El circuito de TEG se describe en los siguientes párrafos.

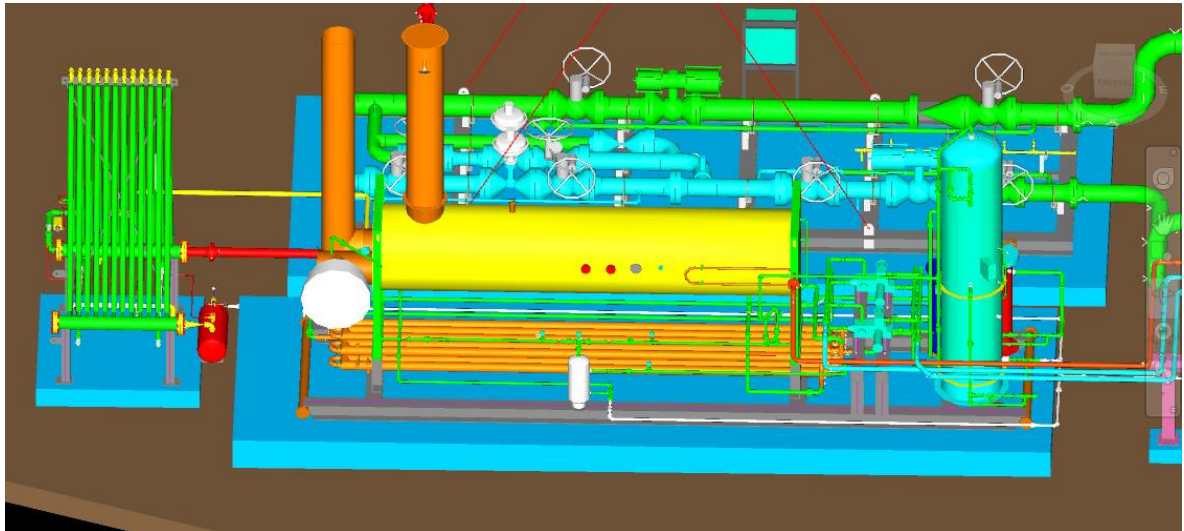
El glicol enriquecido (alrededor de 36% molar o 6,6% másico agua) que sale por el pie de la T-2020 pasa a la Bomba de glicol rico/pobre P-2080/2090 y al Intercambiador de glicol E-2055 que calienta el líquido hasta una temperatura aproximada de 175°F. El glicol caliente a la salida de E-2055 se alimenta al Separador de gas V-2050. En este equipo se evaporan algunas fracciones de hidrocarburos que el TEG arrastra en la T-2020 y estos vapores se

envían al scrubber de gas combustible V-2040. Estos vapores sirven luego de combustible para el Rehervidor H-2030.

El TEG libre de hidrocarburos a la salida de V-2050 pasa al Filtro de carbón activado F-2060 que retiene contaminantes presentes en el TEG. A la salida del filtro el TEG pasa al Intercambiador de glicol E-2045 en donde se precalienta antes de ingresar al Rehervidor H-2030. El glicol en el H-2030 se calienta hasta una temperatura de 400°F. En este equipo que se encuentra a presión atmosférica, el agua y otros compuestos volátiles que contiene se evaporan. El glicol empobrecido (alrededor de 8% molar o 1% másico agua) a la salida de H-2030 se envía al E-2045 en donde cede parte de su calor para precalentar el alimento del hervidor. El glicol que sale de E-2045 pasa luego a E-2055 en donde continúa su enfriamiento antes de pasar al Filtro de glicol F-2070 de elementos removibles para retener elementos sólidos presentes en el glicol. Saliendo del filtro, el glicol pobre se bombea con P-2080/2090 al intercambiador E-2010 y luego a la cima de la torre T-2020 en donde se completa el ciclo de glicol<sup>12</sup>.



**Figura 11.** Filtro Coalescedor F-2005, Torre Contactora de Glicol T-2020, Separador Criogénico V-3005.



**Figura 12.** Unidad recuperadora de vapores (VRU) y Unidad BTEX.

### **3.5.2 DESHIDRATACIÓN POR ADSORCIÓN (TAMIZ MOLECULAR - MOL SIEVE)**

La deshidratación con desecantes sólidos es un proceso que trabaja bajo el principio de adsorción. La adsorción involucra una forma de adhesión entre las partículas del sólido desecante y el vapor de agua en el gas. El agua forma una película extremadamente delgada que se adhiere a la superficie del desecante por fuerzas de atracción pero allí no ocurre reacción química<sup>12</sup>.

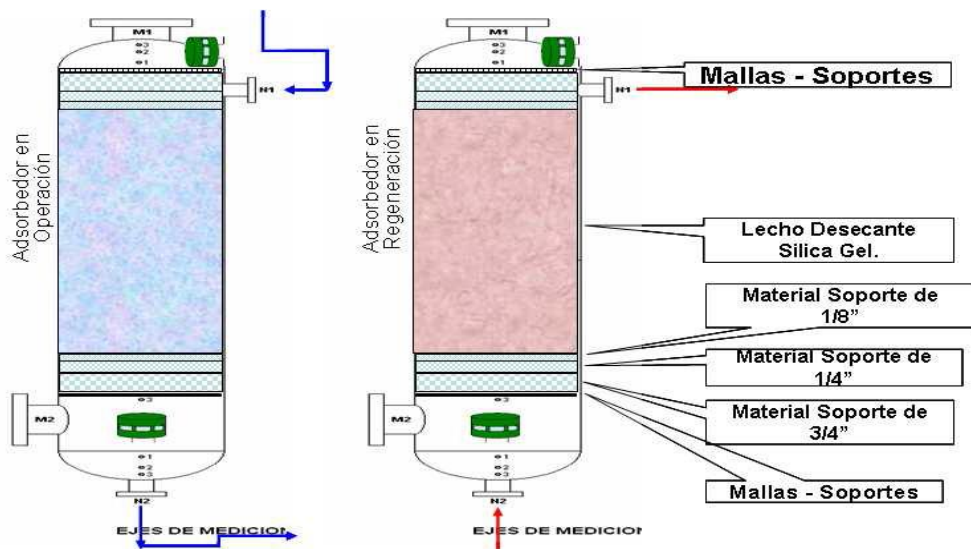
La deshidratación con desecantes sólidos es mucho más eficiente que la deshidratación con glicol, con esta técnica se alcanza menos de 0.1 ppmV (0.05 lbH<sub>2</sub>O / MMscf). Utilizando deshidratación con desecantes sólidos como otra alternativa a la deshidratación con glicol, puede producir beneficios ambientales y económicos muy significativos, incluyendo costos de capital, operación y mantenimiento, además de mínimos VOC y menores riesgos de contaminar el aire (BTEX). Generalmente las unidades con desecante sólido son más costosas que las unidades con glicol. Por lo tanto, su uso está limitado a gases con alto contenido de H<sub>2</sub>S, requerimientos de muy bajos valores de punto de rocío como en procesos criogénicos (hasta de -70-150°F)<sup>12</sup>.

En la PSG, luego del proceso de secado por absorción que entrega el gas de proceso con un contenido aproximado de 10 lbH<sub>2</sub>O/MMscf, continua con un nuevo proceso de deshidratación con tamiz molecular o mol sieve. Este nuevo proceso de deshidratación es requerido debido a que el siguiente proceso del gas en la planta es la planta criogénica, debido

a que las temperaturas de proceso son tan bajas que tener contenido de agua en el gas podría generar formación de hidratos o taponamiento de equipos y/o tuberías por solidificación del agua. Los desecantes tienen una enorme cantidad de área superficial por unidad de volumen.

La adsorción puede aplicarse en la recuperación de LGN del mismo modo que en la deshidratación. Estas unidades son llamadas unidades de recuperación de hidrocarburo (HRU's) o unidades de ciclo corto (SCU's). El desecante que se usa con mayor frecuencia en dichas unidades es el gel de sílice, aunque también se usa el carbón activado. Un ejemplo de la aplicación del carbón activado es la remoción de hidrocarburo del gas ácido que alimenta una unidad de recuperación de azufre (SRU). Aunque tales unidades han sido diseñadas para el control del punto de rocío de hidrocarburo, la remoción total de los hidrocarburos pesados no siempre se consigue, lo que dificulta el control del punto de rocío. Para retirar completamente los hidrocarburos adsorbidos en el lecho sólido se usa un gas de regeneración caliente, con temperaturas alrededor de 260 °C [500 °F]<sup>11</sup>.

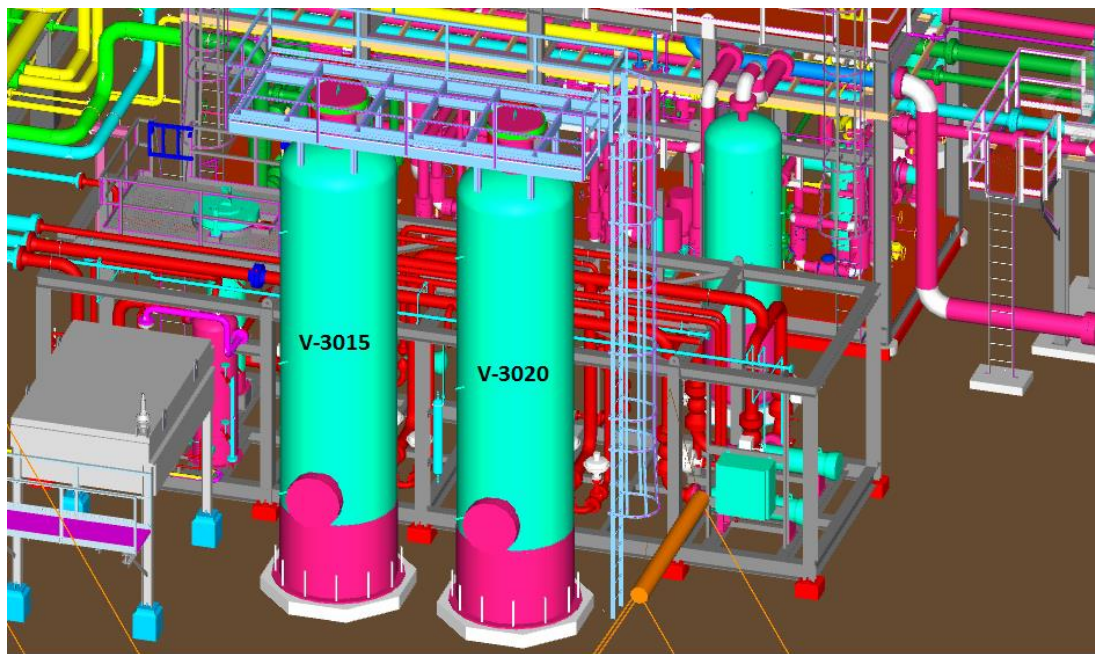
En la figura 13 se observa que un lecho en operación y otro en regeneración. Ambos lechos son cambiados periódicamente. En el ciclo de adsorción, la corriente de gas húmedo fluye normalmente de arriba hacia abajo a través del lecho, formando las tres zonas: zona de saturación o de equilibrio, zona de transferencia y zona activa<sup>9</sup>.



**Figura 13.** Esquema de torres de adsorción<sup>9</sup>.

<sup>11</sup> SANTOS, NICOLAS. Adsorción. Capítulo 4. Especialización Ingeniería de Gas. Universidad Industrial de Santander - UIS-. 2011

Este mismo principio es que las columnas de secado hacen parte del proceso de deshidratación por adsorción. El gas que sale de la sección de deshidratación con TEG ingresa al separador inicial de sistema criogénico V-3005 y luego al filtro de entrada F-3010 de la sección de deshidratación con tamiz molecular. Estos dos elementos se utilizan para retirar pequeñas cantidades de agua de esta corriente de entrada. El agua es removida por control de nivel hacia el sistema de aguas aceitosas. El gas pasa luego a uno de los dos Deshidratadores de tamiz molecular V-3015 o V-3020, cada uno provisto de una zeolita Sylobead®, que adsorbe el agua del gas de entrada. Las zeolitas son materiales minerales compuestos por aluminosilicatos con capacidad para absorber grandes cantidades de agua. El gas a la salida del deshidratador tiene un contenido de agua aproximado de 0,2 ppmV o -150°F. El gas seco pasa luego a los filtros para tamiz molecular F-3025/30 en donde se retiene polvo de tamiz (hasta 1  $\mu\text{m}$ ) que haya podido arrastrarse por la corriente de gas.



**Figura 14.** Modelo 3D de torres desecantes por adsorción V-3015 y V-3020.

El sistema de tamiz molecular funciona de manera alternada: uno de los deshidratadores en fase de deshidratación y el otro en fase de regeneración. Para la regeneración se utiliza gas caliente a alta presión con un flujo de 8 MMscfd. Este gas proviene de los filtros y se comprime en el C-3040 (compresor de gas de regeneración) hasta 950 psig y luego se calienta en H-3035 hasta 500°F. El gas caliente fluye a contracorriente través del deshidratador que se encuentra en su fase de regeneración y evapora el agua contenida en la zeolita. Esta mezcla de gas caliente y agua evaporada se envía al Enfriador de gas de regeneración E-3060 en

donde se enfría hasta 120°F para condensar el agua que se separa en el scrubber de gas de regeneración V-3055. El agua se envía al drenaje y el gas se recicla a la entrada del F-3010.

Parámetro	Unidad	Valor
Flujo regeneración	MMscfd	8
Tiempo total de adsorción	horas	24
Tiempo regeneración	horas	5,88
Cantidad de tamiz por deshidratador	lb	12 000
Caída de presión en adsorción	psi	3

**Tabla 5.** Parámetros del sistema de deshidratación con tamiz molecular<sup>12</sup>.

### 3.6 FRACCIONAMIENTO DE GAS

El fraccionamiento es un proceso mediante el cual el gas se separa en cada uno de sus componentes el cual se realiza a través de las torres fraccionadoras. La dificultad de una separación del gas está directamente relacionada con la volatilidad relativa de los componentes y la pureza de los productos.

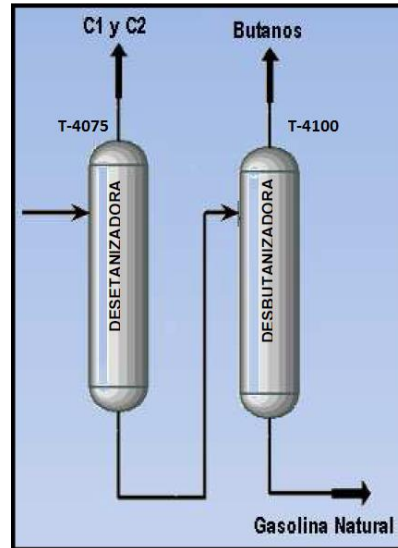
El esquema de una torre fraccionadora muestra los diversos componentes de una torre de fraccionamiento. El calor es introducido en el rehervidor para producir una corriente de vapor. El vapor asciende a través de la columna contactando el líquido descendente. El vapor que sale por el tope de la columna entra a un condensador, en donde el calor es removido por algún tipo de medio enfriante. El líquido es retornado a la columna como reflujo para limitar las pérdidas de componentes pesados.

Las torres fraccionadoras pueden ser de platos o empacadas, para fomentar el contacto entre las corrientes de vapor y líquido en la columna. El contacto íntimo de las fases vapor y líquido es requerido para una separación eficiente. El vapor que sale por el tope de la columna puede ser condensado en forma total o parcial. En un condensador total, todo el vapor es convertido a líquido y el reflujo retornado a la columna tiene la misma composición que el destilado o producto de tope. En un condensador parcial, solamente una porción del vapor que entra al condensador se convierte en líquido. El nombre de la torre fraccionadora indica el componente que se obtiene en la cima<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup> SANTOS, NICOLAS. Fraccionamiento. Capítulo 8. Especialización Ingeniería de Gas. Universidad Industrial de Santander - UIS-. 2010

Actualmente, la planta de secado de gas tiene dos fraccionadoras, una torre DesEtanizadora T-4075 y una torre DesButanizadora T-4100 como se observa en la siguiente figura y se explicarán a continuación.



**Figura 15.** Esquema actual de torres de fraccionamiento de gas en la PSG.

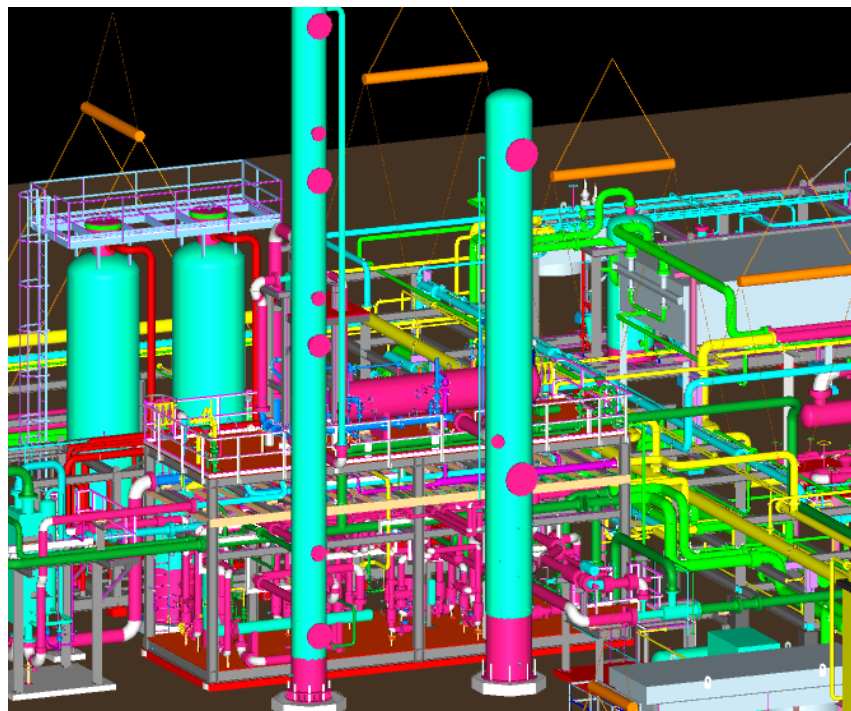
### 3.6.1 TORRE DESETANIZADORA (FUEL GAS) Y TURBOEXPANSIÓN

Una vez terminada el doble proceso de deshidratación del gas, el gas seco fluye hacia la extracción de líquidos de la planta criogénica con una temperatura de 117°F y una presión de 910 psig. El gas pasa en primer lugar por el intercambiador de gas de entrada E-4010 que es de tipo aleta y placas, y se enfría hasta 7.6°F. La corriente de recuperación térmica se logra por intercambio de calor con el gas residual frío y el líquido del Separador frío V-4020. A la temperatura de salida del E-4010, el gas condensa, y cuando la mezcla líquido-vapor entra al V-4020, se separan dos fases (gas-líquido). El vapor a la salida de V-4020 fluye hacia el Expansor C-5000 en donde produce una expansión volumétrica con una caída de presión de 890 a 212 psig y la temperatura descende de 7,6°F a -94°F. En estas condiciones, parte del gas frío condensa, y la mezcla líquido-vapor se envía a la Torre de absorción DesEtanizadora T-4030 para ser alimentada por el fondo. En esta torre, el gas residual se despoja de sus compuestos pesados, y sale por la cima a una temperatura aproximada de -111°F. Este gas frío intercambia en E-4045/50 y a la salida su temperatura es de -42°F aproximadamente. A la salida de E-4045/50 el gas se mezcla con los vapores del acumulador de reflujo del V-4055 e ingresa a E-4015 en donde se sigue calentando hasta 107°F para pasar al compresor C-5000 que lo comprime a 288 psig. En la etapa de compresión el gas se calienta hasta una

temperatura de 190°F y antes de pasar a la sección de medición (presión, temperatura, flujo y composición) es necesario enfriarlo hasta 120°F, función que cumple el enfriador del compresor booster E-5010 operando a una presión de 288.3 psig. De aquí se desprende el Gas residual seco (C1 y C2) que se dirige al patín de medición de ventas hacia la Planta Térmica.

El líquido que se separó en el V-4020 pasa al intercambiador E-4015 a donde cede parte de su calor y luego a la Torre DesEtanizadora T-4075 a donde ingresa por la 8ª etapa teórica de la columna. El vapor de cabeza de la columna se condensa en el Enfriador de reflujo E-4050, y el líquido se recupera en el Acumulador de reflujo V-4055 de donde es enviado como solvente de absorción para la T-4030 y reflujo para la Torre DesEtanizadora T-4075.

El proceso de la DesEtanizadora en la PSG tiene una particularidad y es que el diseño de esta torre por ingeniería fue fraccionada en dos torres T-4030 y T-4075 debido a la altura de diseño. Así mismo, estas dos columnas son empacadas para mejorar el contacto entre las fases vapor y líquido. Una característica de las torres empacadas es que incluyen una baja caída de presión (0.2 a 0.6 in de agua por cada ft de empaque) y más capacidad (a un diámetro dado) para sistemas con alta relación de líquido-vapor. Las columnas empacadas también permiten el uso de equipos pequeños y por lo tanto el costo de inversión bajo<sup>12</sup>.



**Figura 16.** Torre DesEtanizadora de fraccionamiento de gas en PSG.

### 3.6.2 TORRE DESBUTANIZADORA

En la Torre DesButanizadora se da la separación de los butanos de la corriente de pentano plus C5+. Los butanos (ambos iso y normal) pasan al tope y los C5+ al fondo de la fraccionadora<sup>12</sup>. Teniendo en cuenta que en el proceso de la PSG, en la DesEtanizadora se fraccionaron los componentes Metano (C1) y Etano (C2), la corriente de gas de carga a la DesButanizadora contiene en su mayor proporción los componentes pesados C3+. Esta es una torre de fraccionamiento de platos con la característica de tardar el paso del líquido y proporcionar un mejor contacto entre el vapor y el líquido, por lo tanto una mejor separación.

Los condensados separados en el separador frío V-4020 se encuentran a una presión de 890 psig y por la pérdida de presión que tiene en la válvula de control de nivel a la salida de condensados (LCV-4020), el líquido se expande y una parte se vaporiza generando una disminución de la temperatura. Esta mezcla líquido vapor pasa por el *surge tank* del precalentador V-4015 y luego al Pre calentador E-4015 en donde se calienta hasta 108°F y luego se alimenta a la Torre DesEtanizadora T-4075 a una presión de 214,7 psig. El calor a la torre para la destilación, es suministrado por el Rehervidor E-4070 donde circula por el haz de tubos aceite térmico para calentar parte de los líquidos que fluyen al fondo de la misma. El control de la calidad del producto de fondo de esta columna se realiza por medio de la temperatura, con una regulación del flujo de aceite térmico que pasa por los tubos que la mantiene a un valor de 158°F.

El líquido que sale en el fondo de T-4075 se envía hacia la Torre DesButanizadora T-4100 de la que se separan dos productos: por la cima el GLP (C3 y C4) y por el fondo la gasolina natural (C5+). El vapor que se separa por la cima, se condensa en el aereo enfriador E-4160 y fluye hacia el Acumulador de reflujo V-4150, de ahí una parte del líquido que condensa se envía hacia el almacenamiento GLP que consta de 7 Vasijas cada una con capacidad de 60.000 Galones (10.000 Bbls en 7 vasijas) y el resto pasa por las Bombas de reflujo P-4120/30/40 que envían el líquido a la torre T-4100. La calidad de este líquido se controla por medio de la temperatura en la cima de la torre a 146 °F, donde la presión es de 200 psig. En el fondo de T-4100 se encuentra el Rehervidor de la DesButanizadora E-4110 que regula el flujo de aceite térmico para mantener la temperatura del vapor producido a un valor de 335°F. El producto de fondo, la gasolina natural, pasa al Enfriador de gasolina E-4170 donde la temperatura se reduce hasta 120°F y luego es enviada a los Tanques de almacenamiento de gasolina natural TK-7110 y TK-7120 cada uno con una capacidad de 2. 500 Bbls para un total de 5.000 Bbls de almacenamiento de gasolina natural.



**Figura 17.** Torre DesButanizadora de fraccionamiento de gas en PSG.

### **3.7 PRODUCTOS DE LA PSG**

Los productos de la Planta de Secado actualmente son tres: El Gas Residual Seco, GLP y Gasolina Natural o Diluyente 1A. El primero de ellos, Gas Residual se entrega a la planta térmica de generación eléctrica, propiedad también del grupo Termoyopal. Los productos líquidos se almacenan y se venden a sus respectivos clientes. Actualmente, todo el Diluyente 1A es adquirido por Ecopetrol S.A. En cuanto al GLP, se tienen contratos de venta con Chilco S.A. E.S.P., Transportes Maquehua, Inversiones GLP S.A.S E.S.P., Almagas S.A. E.S.P., Grupo Norgas. Estos contratos de venta de GLP tienen vigencia de un (1) año los cuales van de Junio a Junio del año siguiente.

Las proporciones de producción a partir del Gas Rico de Floreña son del 89% es Gas Residual Seco que es de ventas hacia la planta de generación eléctrica, GLP un 7.5% del Gas Rico, y el Diluyente 1A en un 3.5% del Gas Rico de entrada a la PSG. Para una carga total de 40 MMscfd, la producción diaria aproximada es de:

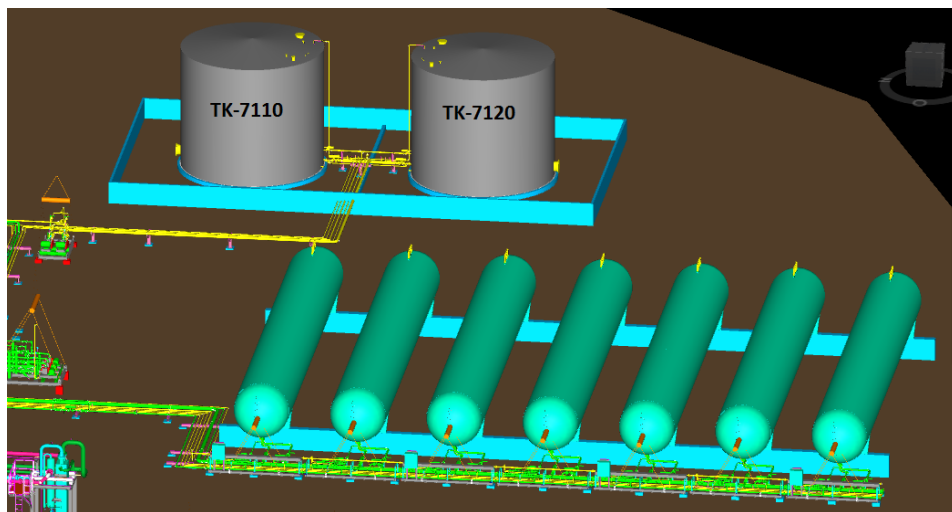
Producto	Valor	Unidad	% Producción
Gas Residual Seco	35.5	MMscfd	89
Gas Licuado del Petróleo (GLP)	2.020	BPD	7.5
Diluyente 1A	1.060	BPD	3.5

**Tabla 6.** Datos de producción operacional diaria de Mayo 2016.

### 3.7.1 ALMACENAMIENTO PRODUCTOS LÍQUIDOS

Los productos líquidos de la PSG son el GLP y el Diluyente 1A. Para el caso del GLP, se tienen 7 Vasijas de almacenamiento V-7010, V-7020, V-7030, V-7040, V-7050, V-7060, V-7070 cada una con una capacidad de almacenamiento de 60.000 galones por bala, lo que significa un total de 420.000 galones, y su equivalente en barriles es de una capacidad de almacenamiento total de 10.000 Bbls de GLP. Esto significa que teniendo en cuenta la producción diaria de GLP (1934 BPD) la PSG tiene un estimado de almacenamiento de GLP aproximadamente de 5 días. Este producto es almacenado a 144,2 psig a una temperatura aproximada de 100 °F.

Por otra parte, el Diluyente 1A es almacenado en 2 tanques atmosféricos de techo cónico TK-7110 y TK-7120 con una capacidad de 2.500 Bbls cada uno. Esto significa que con la producción diaria de Diluyente (922 BPD) les da una capacidad de almacenamiento de Diluyente 1A aproximadamente de 5 días y medio. El Diluyente 1A por estar almacenado en tanques atmosféricos se mantiene a 13,65 psig a una temperatura de 100 °F.



**Figura 18.** Modelo 3D de almacenamiento de productos. 7 Vasijas de GLP y 2 Tanques de Diluyente 1A.

### 3.7.2 CALIDAD DE LOS PRODUCTOS DE LA PSG

No se mencionan garantías de composición del gas residual seco, pero según los balances, en el caso base la composición molar de este es de 85% metano, 10% etano y 3% CO2 aproximadamente. El gas residual seco al salir del aero enfriador E-5010 se enfría a una temperatura de 120 °F, y se envía al skid de medición de salida (ZZZ-0000) a una presión de 273 psig, el cual es el mismo skid de medición de entrada. Este skid tiene un medidor de flujo independiente para medir el flujo volumétrico de gas de salida hacia la planta térmica de generación eléctrica. Se utiliza el mismo cromatógrafo para verificar la composición del gas residual seco en el AC-0101 en las corrientes de despacho. Finalmente esta corriente de gas residual seco es enviado a la Planta Térmica en una tubería de 10 pulgadas de acero al carbón a unas condiciones de operación de 283 psig y 119°F.

	Unidad	Valor	
<b>Flujo</b>	MMscfd	35.5	
<b>Presión</b>	psig	273	
<b>Temperatura</b>	°F	120	
<b>Poder Calorífico</b>	BTU/MMscfd	1065	
<b>Composición</b>	% molar	CH4	85
		C2H6	10
		CO2	3

**Tabla 7.** Composición (% molar) del Gas Seco Residual de la PSG hacia ventas.

Con referencia a los dos productos líquidos de la planta PSG: Diluyente 1A y GLP, se presenta en la Tabla 8<sup>8</sup>. Las calidades garantizadas por contrato.

COMPUESTO	FORMULA	GLP	DILUYENTE 1A
Nitrógeno	N2	0,00	0,00
Dióxido de carbono	CO2	0,00	0,00
Metano	CH4	0,00	0,00
Etano	C2H6	2,72	0,00
Propano	C3H8	60,10	0,00
i-Butano	C4H10	17,72	1,02

COMPUESTO	FORMULA	GLP	DILUYENTE 1A
n-Butano	C4H10	19,30	4,01
i-Pentano	C5H12	0,14	13,52
n-Pentano	C5H12	0,02	14,13
Hexanos y superiores	C6+	0,00	67,32

**Tabla 8.** Composición (% molar) de los productos líquidos de la PSG.

En el caso del GLP, la composición molar de Etano no debe ser mayor a 3% y la de pentanos y hexanos no debe superar el 2%. Esta composición garantiza que el RVP (Presión de vapor Reid) no supere los 200 psia<sup>8</sup>.

Para el disolvente los parámetros de calidad en el contrato exigen que la RVP (presión de vapor) sea máximo de 13 psia y un API máximo de 83°<sup>8</sup>.

### 3.8 VENTAS Y DESPACHO

Los tres productos de ventas de la PSG se despachan de la siguiente manera:

*El gas residual seco* de menor poder calorífico se mide y se factura través del medidor de flujo FT-0020 el cual tiene señal al cuarto de control (HMI) y es observado por el Supervisor de Monitoreo y Control del turno. Este una vez es medido, se dirige hacia la planta térmica de generación a través de una tubería de 10 pulgadas en acero al carbón en las condiciones de la Tabla 5. El gas residual seco de la PSG es transportado a través de un gasoducto privado de 1.480 metros desde el límite de batería de la PSG hasta el patín de entrada de la Planta Térmica.



**Figura 19.** Gasoducto privado (1.480 m) entre la PSG y la Planta Térmica ambas propiedad de Termoyopal.

En cuanto a los productos líquidos, el GLP y el Diluyente 1A se despachan a través de un sistema de bombeo, se dirigen al patín de medición de despacho y por último se entregan en carrotanques en el área del llenadero.

*El GLP* se despacha a través de las bombas P-7080/7085/7090 y posteriormente van al patín de medición por medidores de flujo másico tipo coriolis. El GLP tiene una característica para la liquidación y es que según la legislación colombiana, este producto se debe liquidar en masa (Kg o Lbs). Por esta razón, del medidor coriolis Promass 83F de Endress+Hauser FQIT-7310 se deriva una señal de pulsos con el flujo másico hacia el Computador de Flujo OMNI 3000. El computador de flujo también recibe una señal de densidad entregada por el medidor Coriolis a través del protocolo HART 4-20 mA. Una vez el GLP es medido, se verifica su calidad y composición en el cromatógrafo en línea AE-7210 para luego ser conducido hacia las dos bahías de despacho de GLP. En el despacho de este producto se conectan dos mangueras en la parte trasera del carrotanque. Una manguera es la manguera de llenado y la otra manguera es la manguera de retorno. La manguera de retorno es requerida debido a que el GLP se encuentra en estado líquido y genera una expansión brusca con una pequeña caída de presión. Al inicio del cargue, el carrotanque se encuentra vacío y hace que el GLP se vuelva gaseoso. Esos gases son retornados a las vasijas de almacenamiento y se descuenta de la liquidación final.

*El Diluyente 1A* se despacha a través de las bombas P-7130 y P-7140 y también se dirigen al patín de medición. El Diluyente 1A se mide en otro medidor de flujo másico tipo coriolis FQIT-7210 similar al medidor de GLP y se liquida como cualquier otro hidrocarburo líquido, en volumen. Para el Diluyente 1A la señal de pulsos es en flujo volumétrico y se liquida en el mismo Computador de Flujo OMNI 3000. Una vez el Diluyente 1A es medido, se analiza su calidad y composición en el cromatógrafo en línea AE-7310 en la corriente de Diluyente. Finalmente, la corriente de Diluyente 1A es conducida a las dos bahías de despacho y se realiza el llenado del carrotanque por las tapas superiores. El operario debe subir a través de la plataforma para realizar el llenado con los brazos mecánicos.



**Figura 20.** Llenadero de GLP (2 bahías) y Diluyente 1A (2 bahías).

### 3.9 SERVICIOS AUXILIARES

La planta de secado de gas cuenta con algunos servicios auxiliares que a pesar de no estar involucrados directamente en el proceso de obtención de líquidos blancos a partir del gas de recibo, son servicios que son requeridos para la correcta operación de la planta de secado y para el completamiento de los procesos en general. Los servicios auxiliares no deben detenerse en ningún momento salvo y se realice o planee una parada general de la planta. A continuación se describe cada uno de los servicios auxiliares de la PSG:

- **Aceite Térmico**

El aceite térmico utilizado en la PSG es Therminol 55. Este sistema auxiliar que opera en circuito cerrado es utilizado en los re hervidores para calentar la corriente de fondos de las torres y retornar los productos livianos a las torres de precalentador de condensados, estabilizadora de condensados, DesButanizadora y DesEtanizadora. Este intercambio de calor entre los productos de fondo y el Therminol 55 se realiza en los 4 intercambiadores de tubo (aceite caliente) y coraza (gas de proceso) en cada torre mencionada anteriormente.

- **Gas Combustible**

No todo el gas de proceso que recibe la planta de secado de gas se destila en los productos mencionados en el aparte de ventas y despacho. Parte del gas combustible

de la planta de secado de requiere gas combustible para su operación que en total su consumo asciende a 1,086 MMscfd. A continuación se detalle el consumo aproximado de cada equipo.

Tag	Nombre	Consumo (MMscfd)
H-0110	Calentador de fluido térmico	0,400
C-1100	Compresor de gas de entrada	0,255
C-1200	Compresor de gas de entrada	0,255
H-2030	Hervidor 1MM	0,012
H-3035	Calentador de gas de regeneración	0,162
FL-8020	Tea	0,002
<b>TOTAL</b>		<b>1,086</b>

**Tabla 9.** Equipos que consumen gas residual en la PSG.

- Tea

El sistema de tea, como parte esencial en una facilidad de procesamiento de crudo y gas cumple con dos funciones; la primera sirve de alivio para las sobrepresiones que se producen normalmente en los equipos y que son controladas por los instrumentos de presión, y segundo para recibir los gases que se puedan expulsar del sistema por la apertura de una válvula de seguridad PSV.

La tubería de cada uno de los equipos que van conectados a la tea se reúne en un cabezal de 14" que se envía al Tambor de knock-out de tea V-8015 donde se recuperan y separan los líquidos que se hayan podido arrastrar con los gases que van destinados a la tea, se evacúan del tambor por medio de las bombas P-8025/30 y son enviados al Separador de aguas aceitosas SEP-80001, los gases se dirigen a la tea donde se queman<sup>8</sup>.

- Inyección de Metanol

Teniendo en cuenta que al arrancar la planta de secado, es posible que el secado no sea óptimo por las condiciones de temperatura para la operación (criogénico), lo cual expone a la PSG a operar las líneas con formación de hidratos en tuberías o equipos. En el caso en que haya formación de hidratos por presencia de agua e hidrocarburos a bajas temperaturas y altas presiones, es posible realizar una inyección de metanol (MeOH) con la que se disuelve el compuesto. El sistema está conformado por un tanque de almacenamiento T-4005, una bomba accionada por un motor eléctrico de

velocidad regulable P-4025 y un cabezal de distribución. Este producto requiere un control de estupefacientes y es controlado por la Policía Nacional de Colombia.

- Nitrógeno

El nitrógeno es utilizado generalmente para inertizar los equipos en las fases de arranque y parada de una planta de procesamiento. La PSG en su arranque requirió Nitrógeno. También se utiliza durante la operación normal de la planta como gas protector en algunos equipos menores como el tanque de metanol T-4005 y el tanque vejiga de lubricante AC-5000 en el Turboexpansor. Para la operación del bypass de la planta, en la PCV-1010 se tiene un tanque de Nitrógeno para alimentar el Bypass. Esto debido a que esta válvula de control que permite hacer bypass de la PSG cuando hay un evento de falla, es piloteada con gas de proceso. No obstante, si hay una falla en el sistema de entrada de gas, la PCV-1010 operaría en caso de falla a través de Nitrógeno almacenado en una pipeta junto a la PCV-1010. Esto garantiza la apertura de la válvula de control en caso de alguna condición subestándar de la PSG que impida el recibo de gas.

- Aire comprimido:

El aire comprimido se utiliza para la instrumentación de la unidad y también para la combustión del piloto de la tea. La disponibilidad de aire comprimido y seco el 100% del tiempo es indispensable para el buen funcionamiento de los instrumentos, y por lo tanto para el funcionamiento de toda la PSG. El sistema de aire comprimido tiene para ello dos compresores de tornillo, cada uno con capacidad 197 cfm para atender la totalidad de los requerimientos de la Planta<sup>8</sup>.

Los compresores C-0210/20 se mueven por medio de los motores CM-0210/20. Los compresores tienen un sistema de secado del gas comprimido en el que se enfría el aire a la descarga hasta una temperatura cercana a la congelación, el aire obtenido tiene un punto de rocío de -40 °F. En la descarga de los compresores se encuentran los filtros F-0210/20 que retienen algunas partículas sólidas antes de ser enviado al Receptor de aire V-0200. Opera un compresor principal y el otro back up. El Receptor de aire V-0200 actúa como un colchón entre la producción de aire compresor y el consumo de los instrumentos<sup>8</sup>.

- Sistema Contraincendios:

El sistema contra incendio está compuesto por un grupo de equipos que permiten el envío de los agentes extintores (agua y espuma) en cantidad y tiempo suficiente para

combatir cualquier tipo de incendio. Debido a que la combustión de hidrocarburos emite una gran cantidad de calor, en caso de una conflagración se dispone también de un sistema de enfriamiento en las áreas de almacenamiento de GLP y Diluyente, en las bahías de despacho y en planta física.

El sistema utiliza una mezcla de agua y espuma para combatir el fuego que se produzca en la unidad. La mezcla utilizada es una solución con un 3% de espuma. El agua se origina en el tanque TK-9060 de 14 000 Bbls, alimentado por un pozo profundo ubicado en sus inmediaciones. Del TK-9060 se envía agua a la succión de tres bombas de caudal y dos de refuerzo (jockie pumps). Las tres bombas de refuerzo son dos eléctricas alimentadas a 480 VAC con tag P-9010/20 de 1250 gpm de capacidad que son las principales, y una bomba accionada por motor a Diesel con Tag P-9050 que es la auxiliar, con una capacidad de 2500 gpm. Cada bomba eléctrica estará dotada de una bomba jockey eléctrica proporcionadora de presión P-9030/40. La red forma un circuito cerrado y presurizado que se extiende por toda la planta hasta llegar a las bahías de llenado de carro tanques.

La mezcla con el agua se hace con una espuma fluoroproteínica. Los once monitores que están instalados en la PSG tienen capacidad para aplicación de agua en chorro directo o en neblina, para proteger estructuras amenazadas por fuego, a una rata de 150 gpm y un alcance de 35 metros<sup>8</sup>.

- Sistema Fire & Gas

El sistema Fire & Gas de la PSG es un sistema de apoyo al sistema de contraincendios. Se debe entender como un sistema independiente al sistema contra incendios que tiene la capacidad de detección y extinción. La detección se realiza a través de 39 detectores de fuego infrarrojos, 33 detectores de gas tipo nariz, 16 detectores de humo en planta física y CCM, 19 estaciones manuales de parada de emergencia, 9 señales luminosas y 9 señales sonoras ubicados todos estos estratégicamente en 8 áreas a lo largo de la PSG. La extinción de fuego y gas se realiza a través de la activación de las válvulas de diluvio que proporcionan una mezcla de agua y espuma a través de los rociadores o sprinklers, de acuerdo a la lógica de control de proceso del sistema de Fire & Gas, independiente del sistema de control de proceso de gas.

El objetivo del Sistema de Detección y Alarma de Fuego y Gas (SF&G) es asegurar que en el caso de presentarse una circunstancia potencialmente peligrosa debido a fuga de gas, chispa, conato o incendio, se de la anunciación a los sistemas de control (BPCS) y paro seguro (ESD) como también al personal de operaciones la información

instantánea, para que cada uno de ellos ejecute las acciones apropiadas con el fin de reducir la gravedad de la consecuencia o mitigar el evento a través de la aplicación de las acciones seguras de control que incluyen el arranque de las bombas de agua contra incendios y la apertura de válvulas de diluvio<sup>13</sup>.

#### **4. SIMULACIONES DEL PROCESO ACTUAL DE LA PSG**

---

<sup>13</sup> [2012] Filosofía de Operación Sistema Fire & Gas. *Planta de Secado de Gas de Termoyopal Gas S.A. E.S.P.*

En primera medida, se pretende describir la corriente actual de entrada de gas a la PSG en el programa HYSYS V8.0 validando esta composición con un reporte de producción diaria (Marzo 05 del 2016) y estimar la producción de Gas Residual a la planta térmica y la producción de los líquidos actuales GLP y Diluyente 1A. Estos valores simulados en Hysys se deben comparar con el mismo reporte de producción de ese día.

Posteriormente se plantea la propuesta de implementación de la Torre DesPropanizadora utilizando HYSYS v8.0 como programa de diseño y simulación. Se definirán las nuevas corrientes y se estimará la producción de los productos propano líquido de alta pureza (98%) y butano líquido (98%). Se realizó una simulación de 4 escenarios tomando la producción de GLP al 0%, 25%, 50% y 75% como carga de la nueva Torre DesPropanizadora.

#### 4.1 SIMULACIÓN DE LA PRODUCCIÓN ACTUAL DE LA PSG

En la simulación del proceso de Gas de la Planta de Secado de Termoyopal, fue necesario el uso del programa Aspen HYSYS V8.0. Para la simulación, se tuvo en cuenta un informe de producción del día 05 de Marzo del 2016. De allí, se genera la corriente entrada a la PSG con el valor de Gas Rico Entrada. A partir de la corriente de entrada y los parámetros de operación de la planta, se estima simular la producción actual de los productos Gas Seco, GLP y Diluyente 1A. Posteriormente, se realizará el diseño de la Torre DesPropanizadora para implementarla en el modelo de HYSYS y por último realizar un análisis de sensibilidad para estimar producción diaria de propano líquido de alta pureza (98%).

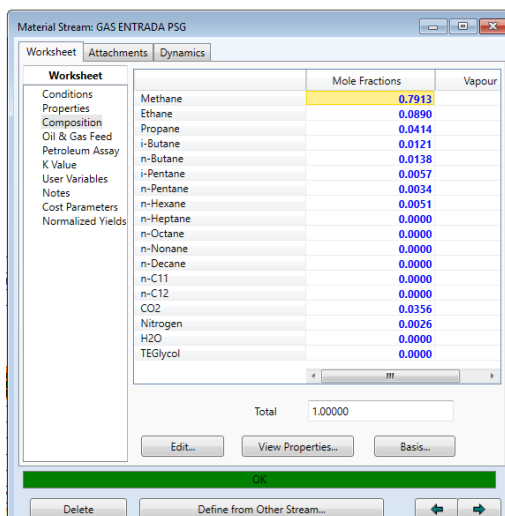
Inicialmente se tiene el reporte de producción del día 05 de Marzo del 2016. Allí se observa la siguiente composición de entrada de gas a la PSG:

	A	B	H	I
1	<b>GAS RICO ENTRADA</b>			
2			5	6
3	Metano		79,13%	79,88%
4	Etano		8,90%	8,63%
5	Propano		4,14%	4,06%
6	i-Butano		1,21%	1,07%
7	n-Butano		1,38%	1,22%
8	i-Pentano		0,57%	0,53%
9	n-Pentano		0,34%	0,31%
10	Hexano +		0,51%	0,51%
11	CO2		3,56%	3,56%
12	Nitrógeno		0,26%	0,24%
13	<b>TOTAL</b>		100,00%	100,00%
14	HHV (BTU/ft3)		1.208,2	1.196,2
15	LHV (BTU/ft3)		1.095,7	1.084,4
16	Peso Molecular		21,47	21,24
17				
18	<b>GAS DOBLE A TERMTICA</b>			

**Figura 21.** Reporte de Operaciones TY de entrada Gas Rico a la PSG (Marzo 05 del 2016)

Para ingresar los valores de la figura anterior en Hysys, lo primero es crear un caso. Allí en propiedades se crea un *componen list* con todos los componentes de la cromatografía del gas. Adicional, se agregó TEG y H2O. Posteriormente el Fluid Package a seleccionar es *Peng-Robinson*. Luego, en el ambiente de simulation, se crea un *FlowSheet Main* con los componentes requeridos para simular el proceso de la Planta de Secado de Gas.

Esta corriente gaseosa es definida en Hysys como *GAS ENTRADA PSG* con la composición de la figura anterior. De allí, podemos validar el peso molecular 21,44 y el poder calorífico de 1198 BTU/ft<sup>3</sup> calculado en el reporte vs el simulador Hysys. Las condiciones de operación para presión de 900 psi (salida de los compresores de gas) y la temperatura de 110 °F. Este dato fue validado con el Process Flow Diagram (PFD)<sup>14</sup> de la PSG para el caso base. Esta corriente de *Gas Entrada* es alimentada con 42,07 MMscfd de Gas que corresponden a 4680 lbmole/hr.



The screenshot shows the 'Material Stream: GAS ENTRADA PSG' window in Hysys. The 'Worksheet' tab is active, displaying a table of component mole fractions. The total mole fraction is 1.00000. The components and their mole fractions are as follows:

Component	Mole Fractions	Vapour
Methane	0.7913	
Ethane	0.0890	
Propane	0.0414	
i-Butane	0.0121	
n-Butane	0.0138	
i-Pentane	0.0057	
n-Pentane	0.0034	
n-Hexane	0.0051	
n-Heptane	0.0000	
n-Octane	0.0000	
n-Nonane	0.0000	
n-Decane	0.0000	
n-C11	0.0000	
n-C12	0.0000	
CO2	0.0356	
Nitrogen	0.0026	
H2O	0.0000	
TEGlycol	0.0000	

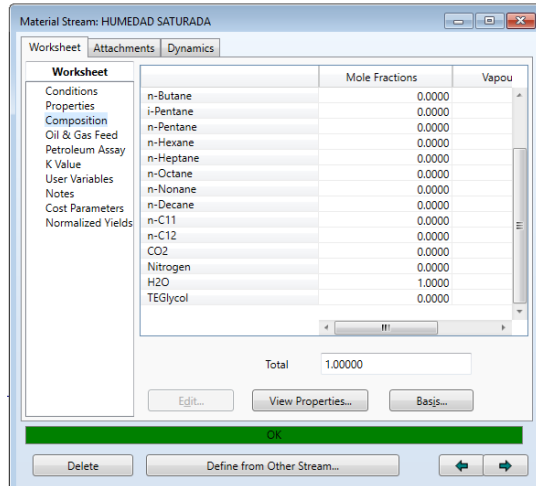
**Figura 22.** Composición Gas Entrada PSG en Hysys

Para validar que con las condiciones de operación dadas (temperatura 110 °F y presión 900 psig) el gas es encuentre completamente en estado gaseoso, es importante generar un análisis por diagrama de fase. De allí se consulta la temperatura crítica para 2 fases y el punto cricondertérmico (79,52 °F) que es el punto de temperatura máxima en la curva envolvente de la región de dos fases en el diagrama de composición presión-temperatura. En otras palabras es la temperatura máxima a la cual dos fases puedan existir. También está el punto

<sup>14</sup> [2012] Process Flow Diagram. *Planta de Secado de Gas de Termoyopal Gas S.A. E.S.P.*

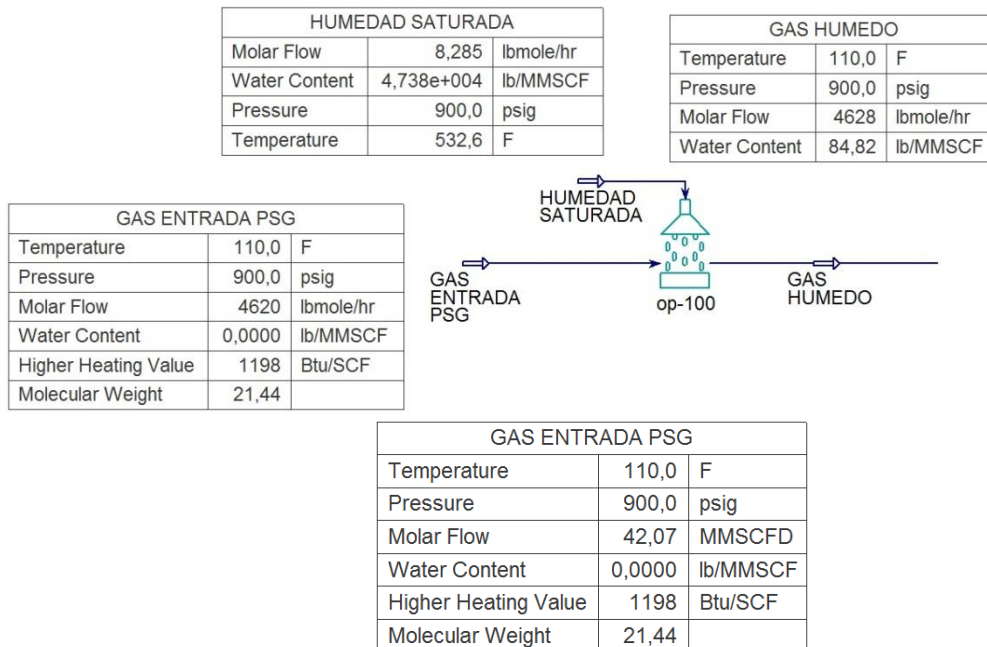


Teniendo en cuenta que en la composición inicial de la corriente *Gas Entrada PSG* no se incluyó % molar para el H<sub>2</sub>O, vamos a utilizar la herramienta *Saturated Unit Operation* y en composición de fracción molar se asigna 1.0 a la corriente de agua.



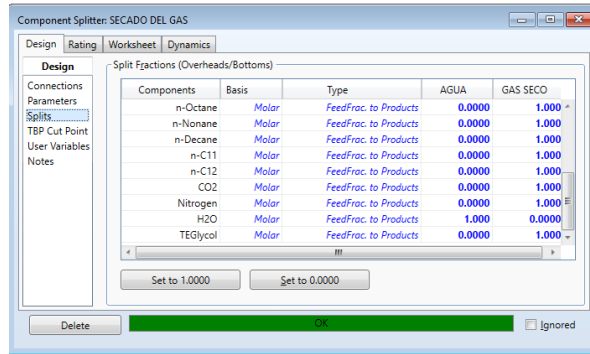
**Figura 25.** Composición de la corriente Humedad Saturada para saturar el Gas de Entrada con Agua.

El diagrama de Hysys en el flowsheet main de la entrada de gas y la saturación de agua se presenta a continuación:



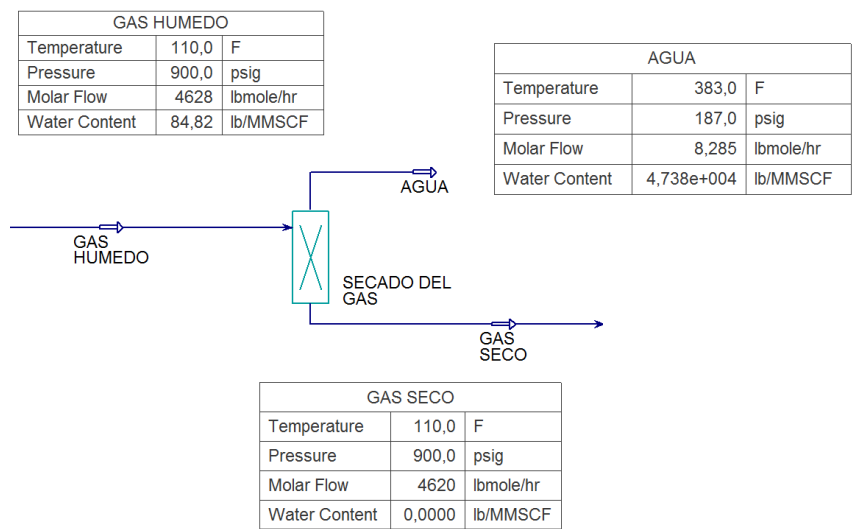
**Figura 26.** Flowsheet de saturación de gas entrada PSG en Hysys.

Teniendo en cuenta que la corriente gaseosa GAS HUMEDO con 84,82 lb/MMscf de contenido de agua pasa por un proceso de deshidratación por absorción (Torre contactora de Glicol) y por adsorción (Torres desecantes con Mol Sieve). Luego del doble proceso de secado, el contenido de agua de la corriente seca es de 0,01 lbmole/hr. Dado que esta condición de proceso no es objeto de la monografía ni se requiere para el diseño de la Torre DesPropanizadora, se procede a utilizar la herramienta *Component Splitter* del Model Palette ubicada en *columns*. Este componente es utilizado para separar la corriente de gas húmedo y simular el proceso de secado. Esto se puede verificar en el contenido de agua de la corriente AGUA que tiene 47380 lb de H2O/MMscf similar a la corriente de HUMEDAD SATURADA. Por el fondo del splitter tenemos Gas Seco con contenido de agua 0 lb H2O/MMscf.



**Figura 27.** Component splitter para simular proceso de secado de gas.

El proceso de secado o separación de agua en HYSYS se describe de la siguiente manera:



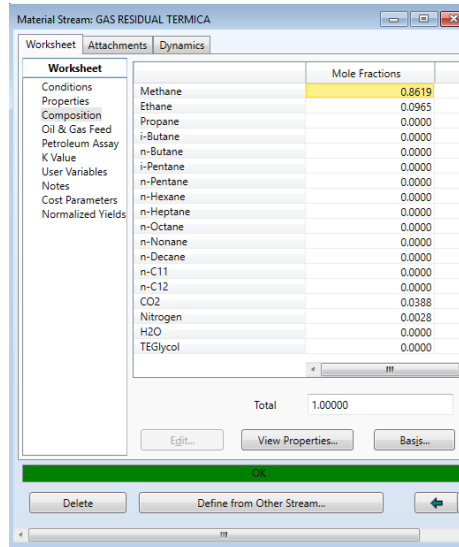
**Figura 28.** Diseño del component splitter para separar agua del gas del proceso de secado de gas en Hysys.

El gas seco entra a la corriente criogénica de separación DesEtanizadora, la cual por la cima se desprende el Fuel Gas o Gas Residual que alimenta la planta de generación eléctrica de Termoyopal con un poder calorífico menor y con una composición en su mayor parte de metano y etano. Para ello, se utiliza nuevamente el *Component Splitter* y se configura la separación de tal modo que la corriente de Gas Residual sea similar a la cromatografía del reporte del 05 de Marzo del 2016 que corresponde a Gas Pobre Térmica donde se midió un producto con 86,3% de metano y 9,6% de etano. Así mismo, un poder calorífico alto de 1044 BTU/ft<sup>3</sup> y un peso molecular de 18,53.

	A	B	H	I
17				
18	<b>GAS POBRE A TERMICA</b>			
19			5	6
20	Metano		86,30%	86,71%
21	Etano		9,60%	9,26%
22	Propano		0,13%	0,11%
23	i-Butano		0,00%	0,00%
24	n-Butano		0,00%	0,00%
25	i-Pentano		0,00%	0,00%
26	n-Pentano		0,00%	0,00%
27	Hexano +		0,00%	0,00%
28	CO2		3,92%	3,88%
29	Nitrógeno		0,05%	0,02%
30	<b>TOTAL</b>		100,00%	100,00%
31	HHV (BTU/ft <sup>3</sup> )		1.044,1	1.042,1
32	LHV (BTU/ft <sup>3</sup> )		942,6	940,7
33	Peso Molecular		18,53	18,46
34				

**Figura 29.** Reporte de Operaciones Gas Residual o Gas Pobre a la Planta Térmica (Marzo 05 del 2016)

De la corriente de separación se desprende el Gas Residual por la cima, que es vendido directamente a la planta de generación eléctrica y en la corriente de fondo sale los productos líquidos hacia la DesButanizadora. Verificando la composición del Gas Residual Térmica con la composición de la cromatografía del reporte de operaciones del día 05 de Marzo del 2016 Vs la corriente obtenida en la cima de la DesEtanizadora tenemos:



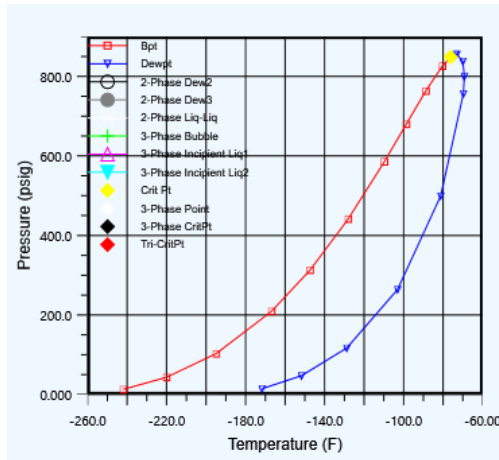
Component	Mole Fractions
Methane	0.0619
Ethane	0.0965
Propane	0.0000
i-Butane	0.0000
n-Butane	0.0000
i-Pentane	0.0000
n-Pentane	0.0000
n-Hexane	0.0000
n-Heptane	0.0000
n-Octane	0.0000
n-Nonane	0.0000
n-Decane	0.0000
n-C11	0.0000
n-C12	0.0000
CO2	0.0388
Nitrogen	0.0028
H2O	0.0000
TEGlycol	0.0000

Total: 1.00000

**Figura 30.** Composición de la corriente de Gas Residual a Planta Térmica en TY.

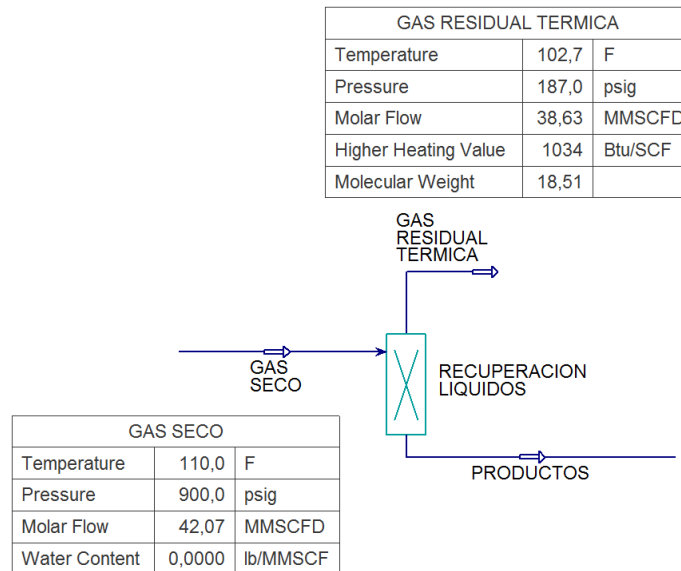
En respuesta de la simulación, la corriente de gas residual corresponde a un flujo de 38,63 MMSCFD. La composición de la corriente de la figura anterior registra valores muy similares al reporte de operaciones para la corriente de gas pobre hacia la térmica. Además, las condiciones de operación se validan con los Operadores de la Planta de Secado de Gas y son prácticamente similares. El peso molecular de 18,51 y el Poder Calorífico de 1034 Btu/ft<sup>3</sup> del Gas Residual a Térmica corresponden a la simulación en Hysys versus un peso molecular de 18,53 y un poder calorífico de 1044 reportado en la Producción de la PSG del día 05 de Marzo del 2016. Adicionalmente se verifica la envolvente de fase con un análisis de envolvente de fase en Hysys para el Gas Residual Térmica y se verifica que a las condiciones de operación este gas continúa en su fase gaseosa. Según los datos de operación, las condiciones de entrega del Gas Residual a la Planta Térmica son a 283,3 psig y a 119°F que fueron tomadas del diagrama de flujo de proceso<sup>20</sup>. Teniendo en cuenta la siguiente gráfica, se observa que las condiciones de operación garantizan que la corriente de Gas Residual se encuentre en estado gaseoso. Esto obedece a las propiedades físico químicas del metano y el

etano que tienen puntos de condensación muy bajos. Esto se puede observar en la siguiente figura.



**Figura 31.** Diagrama de fases de la corriente Gas Residual Térmica.

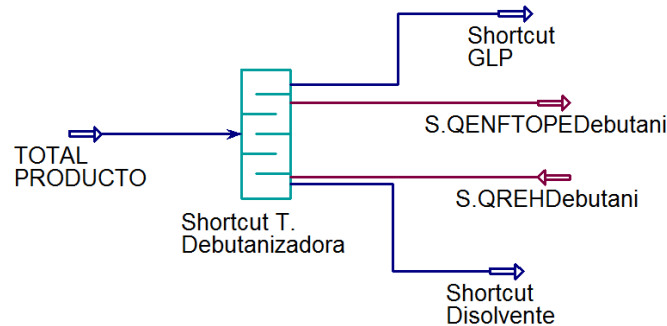
El modelo de la simulación en el Flowsheet Main de Hysys es el siguiente:



**Figura 32.** Diseño del splitter para separar y obtener corriente de fondo de DesEtanizadora en Hysys.

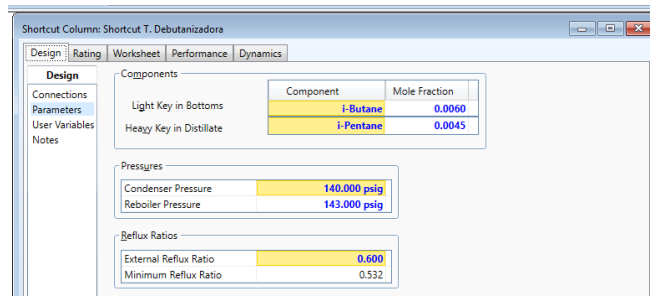
Los productos de fondos de la DesEtanizadora son los componentes C3+ que posteriormente ingresan al plato de alimentación de la columna DesButanizadora.

Esta corriente denominada *Productos* alimenta la torre DesButanizadora T-4100. La Torre DesButanizadora de la PSG es una torre de 24 Platos la cual la corriente de fondo de la DesEtanizadora alimenta la torre DesButanizadora por el plato #11. Para el validar el diseño de la actual torre DesButanizadora de la PSG con tag T-4070, utilicé en Hysys la herramienta *shortcut column* para calcular la tasa de destilación y la tasa de reflujo requerida y validar con el número de platos teóricos requeridos. A continuación se define la configuración del shortcut DesButanizadora en HYSYS.



**Figura 33.** Diseño del shortcut para la Columna DesButanizadora T-4100 en Hysys.

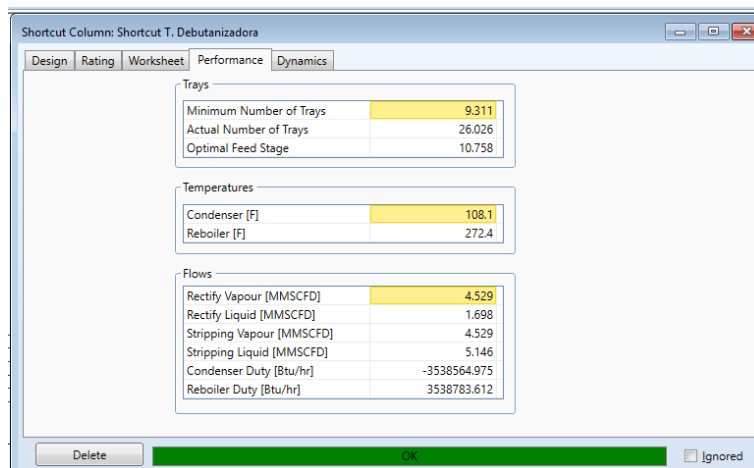
Para validar el diseño, se debe crear una corriente *TOTAL PRODUCTO* que debe "*definirse de otra corriente*". En este caso deberá ser la corriente *PRODUCTOS* el cual es la corriente de carga a la T-4100 DesButanizadora. Esta corriente *TOTAL PRODUCTO* alimenta la carga de una shortcut T. DesButanizadora el cual obtendrá por la cima GLP y en el fondo el shortcut Diluyente 1A. En esta torre shortcut la idea es simular el proceso de separación de la corriente *TOTAL PRODUCTO* y validar la tasa de destilación y la tasa de reflujo en la Torre DesButanizadora a simular en el proceso. En la pestaña de diseño, se configuran los parámetros para indicarle a la columna de destilación cuál es la concentración en fracción molar del componente liviano en el residual de fondo y cuál es la concentración molar del componente pesado de la corriente destilada de cima. En este caso, seleccioné el i-Butano en 0.0060 como componente liviano de fondo y el i-Pentano en 0.0045 como concentración molar de producto pesado de cima teniendo en cuenta las condiciones de operación de la PSG. Muy importante que el sistema tenga un relación externa de reflujo superior a la mínima relación de reflujo, que en este caso es 0.532 según el simular Hysys. Se puede usar cualquier valor por encima de 0,532 y que seleccioné en 0,6 para que la torre converja. Es importante tener en cuenta que este parámetro no debe ser muy alto para optimizar la eficiencia energética. Sin embargo, este parámetro afecta la altura de la Torre DesButanizadora de forma inversa, es decir, entre mayor sea el reflujo de cima que se devuelve por el plato #1, menor es la altura requerida de la columna de destilación.



**Figura 34.** Parámetros de diseño del shortcut DesButanizadora en Hysys.

Para la eficiencia energética, se debe tener el concepto que la tasa óptima de reflujo en una columna de destilación depende del valor de la energía pero generalmente está entre 1.05 y 1.25 veces la tasa mínima de reflujo<sup>15</sup>. Para el diseño del shortcut DesButanizadora, el valor de la mínima tasa de reflujo  $0.532 \times 1.25$  se obtiene 0.665 como tasa de reflujo óptimo y será ingresado como parámetro de diseño en la Torre DesButanizadora.

En la pestaña de performance se puede observar la cantidad de platos teóricos requeridos que para este diseño son 26 y cuál debe ser el plato de alimentación de la corriente *TOTAL PRODUCTOS* que en este caso por aproximación es el plato #11. La actual Torre DesButanizadora T-4100 de la PSG tiene 24 platos y se alimenta por el plato 11. Esto quiere decir que en su diseño pudo ser más eficiente con dos platos adicionales.



**Figura 35.** Platos teóricos y plato de alimentación del Shortcut DesButanizadora en Hysys.

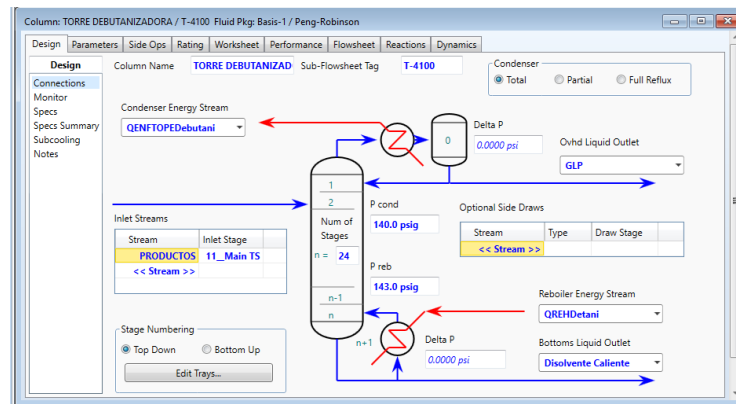
<sup>15</sup> KIRK-OHTMER, Encyclopedia of Chemical Technology. 4th Edition. Vol 9 Energy Management. 2010.

Por último, en la corriente de cima del shortcut GLP se verifica la tasa de destilación en molar flow que para esta caso es 310.8 lbmole/hr. Este dato también es el input para la Torre DesButanizadora.

Worksheet	Stream Name	Shortcut GLP
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000
Properties	Temperature [F]	108.1
Composition	Pressure [psig]	140.0
Oil & Gas Feed	Molar Flow [lbmole/hr]	310.8
Petroleum Assay	Mass Flow [lb/hr]	1.535e+004
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [USGPM]	57.44
User Variables	Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	-5.565e+004
Notes	Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	23.13
Cost Parameters	Heat Flow [Btu/hr]	-1.729e+007
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [USGPM]	57.05
	Fluid Package	Basis-1
	Utility Type	

**Figura 36.** Condiciones del Distillation Rate en Shortcut DesButanizadora en Hysys.

Una vez se tiene el caso de simulación convergiendo correctamente y activo, se agrega una columna de destilación que será la columna DesButanizadora. Allí se configuran los parámetros reales de construcción tales como el número de platos que son 24, presión del condensador de 140 psig y presión del reboiler en 143 psig. El plato de alimentación real es el plato número 11. La corriente de cima de la DesButanizadora es el GLP y la columna de fondo el Diluyente 1A. En las especificaciones se deben incluir los dos parámetros anteriormente calculados en el *shortcut column* que son la tasa de destilación calculada que es de 310.8 lbmole/hr y la tasa de reflujo con el factor de 1.25 que finalmente es de 0.665. A continuación estos datos se ingresan en las especificaciones de diseño de la columna T-4100 DesButanizadora.



**Figura 37.** Diseño y conexionado de corrientes de columna DesButanizadora T-4100 en Hysys.

Column: TORRE DEBUTANIZADORA / T-4100 Fluid Pkg: Basis-1 / Peng-Robinson

Design Parameters Side Ops Rating Worksheet Performance Flowsheet Reactions Dynamics

Design

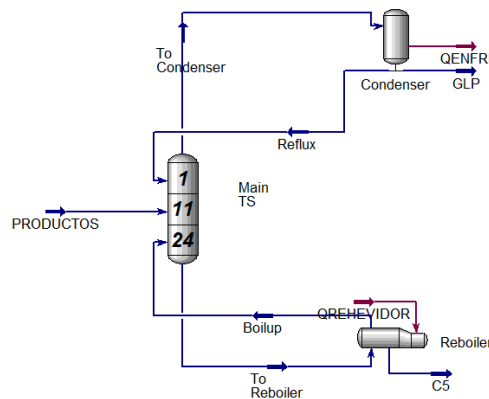
Connections Monitor Specs Specs Summary Subcooling Notes

Specs Summary

	Specified Value	Active	Current	Fixed/Ranged	Prim/Alt	Lower	Upper
Reflux Ratio	0.6650	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>
Distillate Rate	311.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>
Reflux Rate	<empty>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>
Btms Prod Rate	<empty>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Fixed	Primary	<empty>	<empty>

**Figura 38.** Especificaciones de diseño de columna DesButanizadora T-4100 en Hysys.

Para verificar la configuración del sistema de destilación de DesButanizadora, se debe dirigir a *Column environment* y se obtiene la configuración que indica que el condensar quien enfría los condensados o componentes pesados de la corriente de cima se envían como reflujo en contra corriente por el plato 1. La corriente *PRODUCTOS* de alimentación de la torre T-4100 ingresa por el plato 11 y del fondo se caliente los livianos y se retornan con temperatura al plato 24. La siguiente figura detalla el sistema de la columna DesButanizadora T-4100. De esta misma columna, se obtiene como producto de fondo Diluyente 1A caliente el cual requiere enfriarse a través del aero enfriador E-4170 antes de enviarse a los Tanques TK-7110 y TK-7120 como se describe el proceso en los P&IDs<sup>16</sup> de la PSG.



**Figura 39.** Column environment de la torre DesButanizadora T-4100 en Hysys.

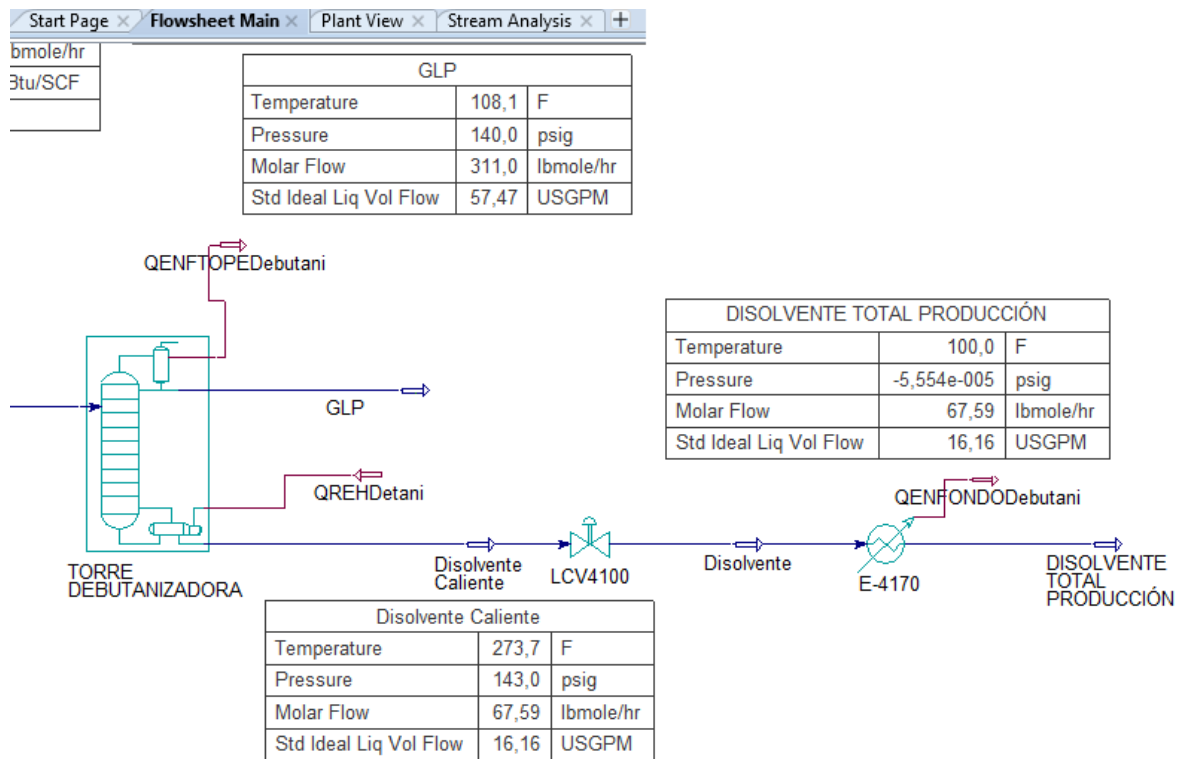
Una vez simulada la Torre DesButanizadora T-4100, se debe comparar con el reporte de Producción de Marzo 05 del 2016. En el reporte se observa una producción de GLP de 1952 barriles por día y una producción de Diluyente 1A de 550 barriles por día.

<sup>16</sup> [2012] Piping & Instrumentation Diagram, INT95-127. *Planta de Secado de Gas de Termoyopal.*

	A	B	H	I
56	C5+		1,42%	1,35%
57				
58	<b>Volumen teórico GLP y Disolvente 1</b>			
59	Propano		1,73	1,67
60	i-Butano		0,50	0,44
61	n-Butano		0,57	0,50
62	i-Pentano		0,24	0,22
63	n-Pentano		0,14	0,13
64	Hexano +		0,21	0,21
65	TOTAL		3,40	3,16
66	GPM C3+ (galones liq /Mpce gas)		2,52	2,37
67	Volumen teórico de GLP -barriles		1952	1809
68	Volumen real de GLP -barriles		1923	1714
69	<b>% rec. GLP</b>		98,5%	94,8%
70	Volumen teórico Disolvente -bls		550	515
71	Volumen real disolvente - barriles		684	646
72	<b>% rec. Disolvente 1A</b>		100,0%	100,0%
73				

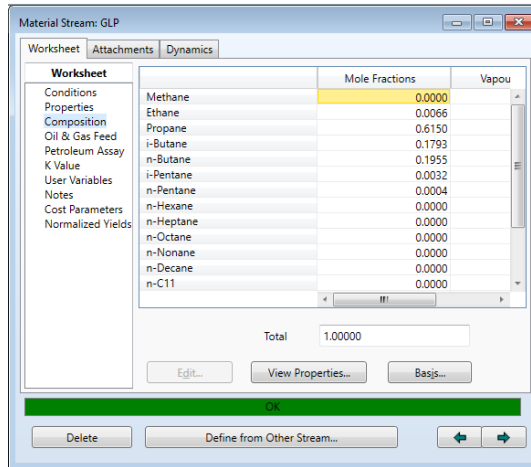
**Figura 40.** Reporte de producción de GLP y Diluyente 1A del día 05 de Marzo del 2016.

De la simulación en Hysys para la condición actual de la PSG, se puede observar que la producción de GLP es de 57,47 USGPM que su equivalente es de 1970 en BPD con una diferencia menor al 0,9% entre la simulación en Hysys y la producción real de la PSG. Así mismo la producción de Diluyente 1A en la simulación es de 16,16 USGPM que su equivalente es de 554,1 en BPD con una diferencia menor al 0,7% entre la simulación de la torre T-4100 en Hysys vs la producción de la PSG. A continuación se muestran las tablas con las condiciones de operación de salida de cada producto de la Torre DesButanizadora, así como el flujo obtenido en cada corriente, en galones por minuto.



**Figura 41.** Flowsheet y tablas de la simulación de producción de la Torre DesButanizadora de la PSG.

Una vez obtenidas las corrientes de cima y fondo de la Torre DesButanizadora T-4100, se debe verificar que la composición de GLP tenga una porcentaje molar de etano menor al 3.5% en fracción molar requerido en las especificaciones de calidad de este producto. En este caso simulado, la fracción molar del etano es de 0,6% lo que significa una separación óptima. Junto con el personal de Operaciones de la PSG, se pudo corroborar las condiciones de operación actuales operando de la cima de la torre a 127°F con una presión de 143 psig asegurando la temperatura del condensador a 108°F. En cuanto a las concentraciones de Propano en la simulación Vs al reporte real, son bastante similares teniendo en cuenta un 61,6% vs 63,16% en fracción molar, según la siguiente figura.



**Figura 42.** Composición de la corriente de GLP en Hysys.

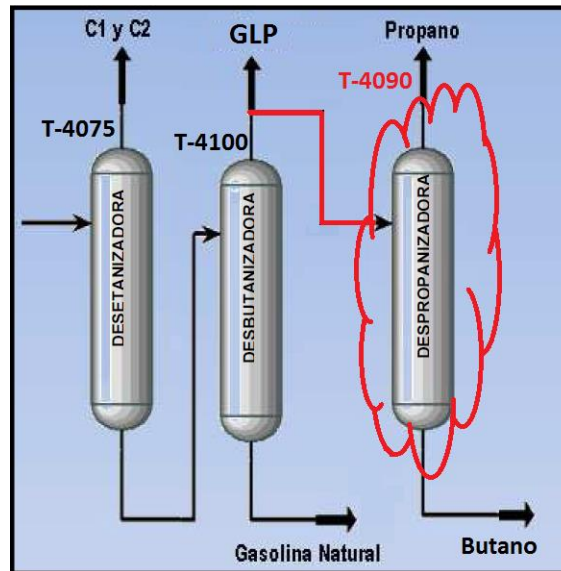
Esta composición anterior, obtenida de la simulación se debe comparar con el reporte de operaciones del día seleccionado para este estudio, el 05 de Marzo del 2016, el cual a continuación se relacionan los datos obtenidos en la cromatografía de la PSG para dicho día. Este producto cumple con las especificaciones del contrato ya que su contenido de propano es de 63,19% y su contenido de butano es de 33,65% para un GLP con una pureza del 96,81%. Para tal día, la Operación de la PSG tuvo un % de etano de 3,18% el cuál no pudo ser retirado en la columna DesEtanizadora, sin embargo, el GLP pudo ser comercializado por encontrarse en las especificaciones de calidad según el contrato de venta de la PSG.

Component	Percentage 1	Percentage 2
GLP PRODUCTO	5	6
Metano	0,00%	0,00%
Etano	3,18%	3,03%
Propano	63,16%	62,67%
i-Butano	16,91%	17,06%
n-Butano	16,74%	16,48%
i-Pentano	0,00%	0,62%
n-Pentano	0,00%	0,14%
Hexano +	0,00%	0,00%
CO2	0,00%	0,00%
Nitrógeno	0,00%	0,00%
<b>TOTAL</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>
HHV (BTU/ft3)	2.741,7	2.753,3

**Figura 43.** Composición de la corriente de GLP en reporte de Marzo 05 del 2016 en la PSG.

## 4.2 SIMULACIÓN DE PRODUCCIÓN CON NUEVA TORRE DESPROPANIZADORA EN LA PSG

Teniendo en cuenta que para una carga de gas rico de 40 MMscfd a la Planta de Secado de Gas, se obtiene una producción esperada de 1952 BPD para GLP y 550 BPD para Diluyente 1A según el reporte de operaciones de Marzo 05 del 2016. Para este caso de estudio y como core del proyecto, se propone realizar varias corridas de simulación en HYSYS v8.0 de una torre DesPropanizadora para estimar la producción diaria de propano líquido en la cima y butano líquido en el fondo. En la siguiente imagen, se observa la adición de una nueva columna de destilación al proceso actual de la PSG.



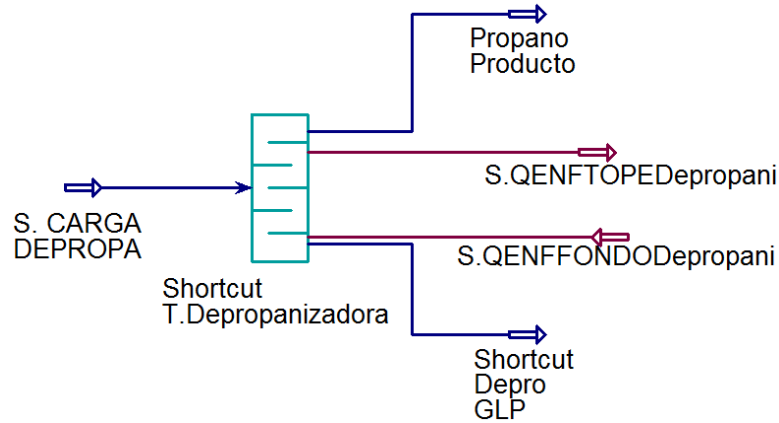
**Figura 44.** Propuesta para la adición de una nueva torre T-4090 DesPropanizadora en la PSG.

Una vez se obtiene la corriente de GLP descrita en la simulación de la planta PSG, se define un nuevo proceso de shortcut column para diseñar la nueva torre DesPropanizadora con tag T-4090. Esto se realiza similar al shortcut de DesButanizadora que se explicó en la simulación de la producción actual de la PSG.

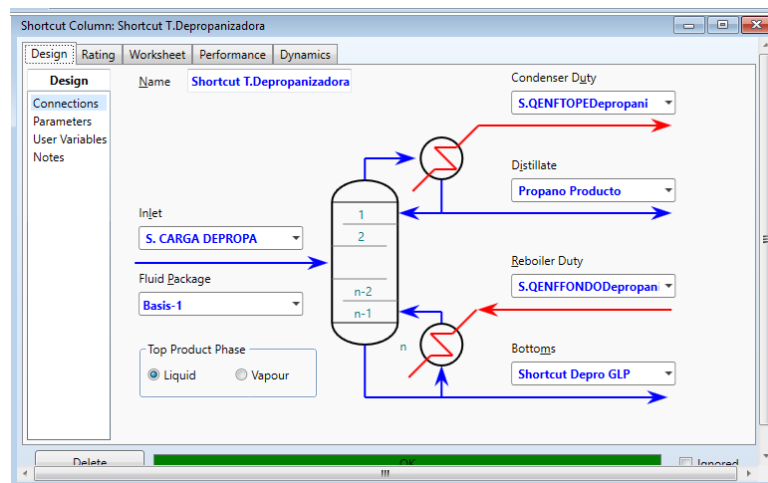
Se evaluarán 4 casos de operación de la nueva torre DesPropanizadora, considerando diferentes cargas de GLP como alimentación de la T-4090. El caso 1 es para una carga de 100% de GLP, el caso 2 de una carga de 75%, el caso 3 de una carga de 50% y el caso 4 de una carga de un 25% de GLP a la nueva torre DesPropanizadora. Esto con el fin de definir las concentraciones de producción en cada caso y realizar una evaluación técnico económico para recomendar el mejor diseño, de acuerdo a los platos teóricos obtenidos. En primera instancia se realizará el shortcut con toda la producción de GLP a la nueva torre.

Inicialmente se define la corriente *S.CARGA DEPROPA* como la fracción de GLP que se quiere cargar en la Torre DesPropanizadora. En esta nueva torre se desea obtener en cima

propano líquido de alta pureza y por el fondo Butano líquido de alta pureza lo que indica que sus concentraciones deben estar por encima del 97% tanto para el propano como el butano obtenidas por el nuevo proceso de destilación.

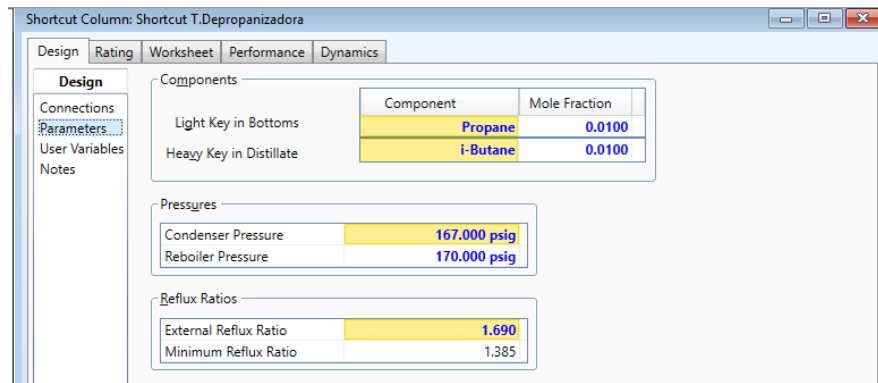


**Figura 45.** Diseño del shortcut para la Columna DesPropanizadora T-4100 en Hysys.



**Figura 46.** Diseño y conexionado de corrientes de columna shortcut DesPropanizadora T-4090 en Hysys.

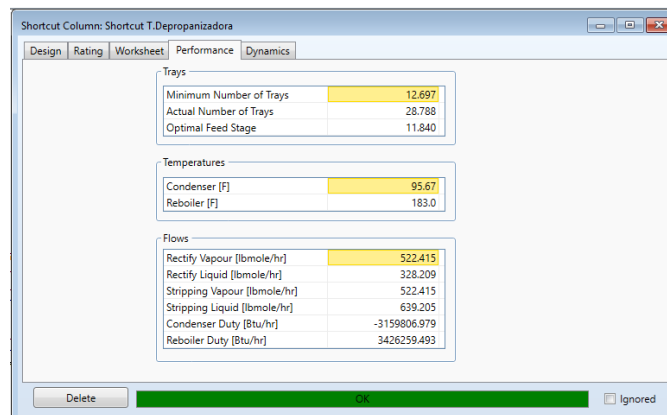
En la pestaña de diseño, se configuran los parámetros para indicarle a la Torre DesPropanizadora T-4090 cuál es la concentración en fracción molar del componente liviano en el residual de fondo y cuál es la concentración molar del componente pesado de la corriente destilada de cima. En este caso, seleccioné el Propano en 0.0100 como componente liviano de fondo y el i-Butano en 0.0100 como concentración molar de producto pesado de cima para mejorar la calidad del producto destilado. Muy importante que el sistema tenga una relación externa de reflujo superior a la mínima relación de reflujo, que en este caso es 1.385 según los parámetros obtenidos en el shortcut.



**Figura 47.** Parámetros de diseño del shortcut DesPropanizadora T-4090 en Hysys.

Para la eficiencia energética, se debe tener el concepto que la tasa óptima de reflujo en una columna de destilación depende del valor de la energía pero generalmente está entre 1.05 y 1.25 veces la tasa mínima de reflujo<sup>20</sup>. Para esta simulación el valor de  $1.385 \times 1.25$  se obtiene 1.731 como tasa de reflujo óptimo y será ingresado como parámetro de diseño en la Torre DesButanizadora. Para el shortcut DesPropanizadora solamente se dejó un valor de 1.690 que está por encima de la tasa de reflujo mínimo.

En la pestaña de performance se puede observar la cantidad de platos requeridos de diseño que para la Torre DesPropanizadora deben ser 28 platos y cuál debe ser el plato de alimentación de la corriente *CARGA DEPROPA* que será el plato 12.



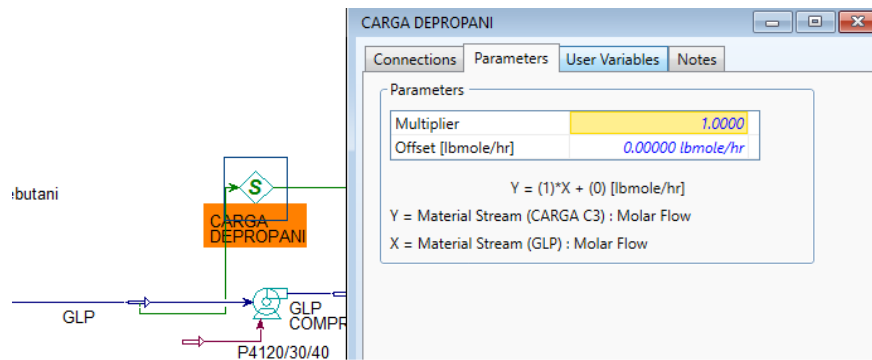
**Figura 48.** Platos teóricos y plato de alimentación del Shortcut DesPropanizadora en Hysys.

Por último, en la corriente de cima del shortcut Propano Producto se verifica la tasa de destilación en molar flow que para esta caso es 194.2 lbmole/hr. Este dato también es el input para la Torre DesPropanizadora T-4090.

Worksheet	Stream Name	Value	Units
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000	
Properties	Temperature [F]	95.67	
Composition	Pressure [psig]	167.0	
Oil & Gas Feed	Molar Flow [lbmole/hr]	194.2	
Petroleum Assay	Mass Flow [lb/hr]	8564	
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [USGPM]	33.81	kgm
User Variables	Molar Enthalpy [Btu/lbmole]	-5.107e+004	lbm
Notes	Molar Entropy [Btu/lbmole-F]	22.97	Calculated by
Cost Parameters	Heat Flow [Btu/hr]	-9.919e+006	
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [USGPM]	33.70	
	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

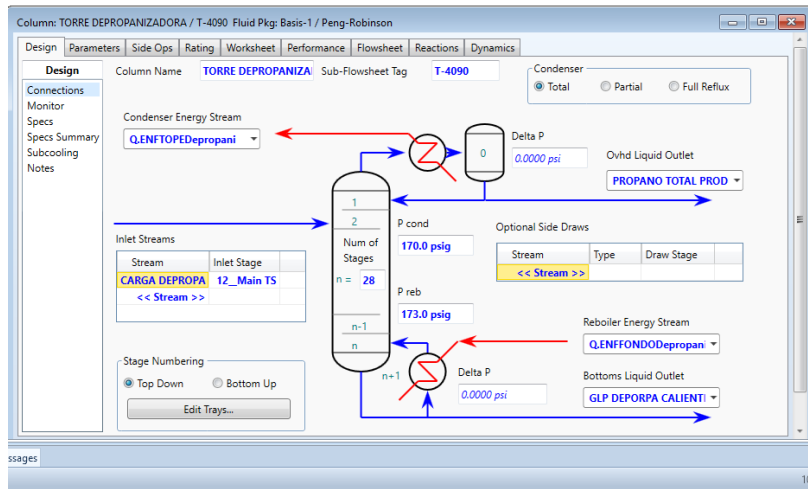
**Figura 49.** Condiciones del Distillation Rate en Shortcut DesPropanizadora en Hysys.

Teniendo todos los parámetros de diseño de la Torre DesPropanizadora, se procede a implementar la columna de destilación con carga *DEPROPA*. En esta simulación utilicé la herramienta multiplicadora donde se toma como valor fuente la producción de GLP en lbmole/hr y el valor objetivo depende del % de GLP que se desea alimentar la Torre DesPropanizadora. En el primer caso, el factor multiplicador será 1.0 para tener todo el % de GLP como carga de la DesPropanizadora. Esta herramienta multiplicadora hace la función de una válvula de control de flujo de GLP hacia la carta de la Torre DesPropanizadora. El parámetro del multiplicador será el setpoint de la válvula. Para el caso de multiplicador 1, la válvula de control de flujo operaría full open y la Torre DesPropanizadora recibiría toda la carga del GLP como alimentación de la Torre T-4090.



**Figura 50.** Multiplicador de Hysys para desviar carga a nueva Torre DesPropanizadora.

De esta manera se ingresan los parámetros de diseño a la Torre DesPropanizadora con los datos obtenidos del shortcut DesPropanizadora teniendo en cuenta la altura en platos y el plato 12 como plato de alimentación. Se recomienda operar esta columna DesPropanizadora en 170 psig por la misma experiencia del personal de Operaciones de la Planta de Secado de Gas.



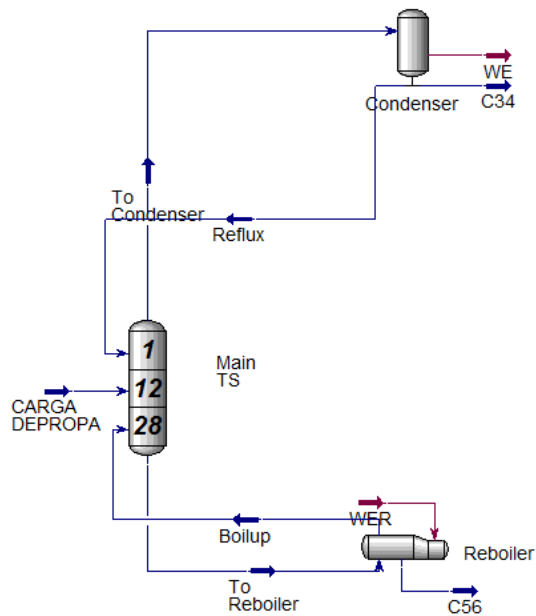
**Figura 51.** Diseño y conexionado de corrientes de columna DesPropanizadora T-4090 en Hysys.

Una vez se diseña ingresa el número de platos y se selecciona el plato de alimentación, se debe ingresar las presiones del condensador y el reboiler. Seguido de esto, se ingresan la relación de destilación y la tasa de reflujo. En la pestaña *Performance* se puede observar que esta columna DesPropanizadora debe operar a 98.71 °F en la cima. La corriente de fondo que contiene Butano líquido sale caliente a 185°F por lo cual se debe adquirir un aereo enfriador hasta 100°F como parámetro de diseño generando tan sólo una caída de presión de 3 psig la cual también depende del tipo de torre seleccionada. Teniendo en cuenta que la tasa de reflujo mínima era de 1,385, decidí seleccionar la tasa de reflujo óptima equivalente al 1,25% para un total de 1,731. De la imagen 49 se obtiene que la tasa de destilación es de 194,2 para la cual decidí ingresar el valor de 195 con el fin de obtener un poco más de producto de cima e ingresar un valor entero.

	Specified Value	Active	Current	Fixed/Ranged	Prim/Alt	Lower	Upper
Reflux Ratio	1.731	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Fixed Primary	<empty>	<empty>
Distillate Rate	195.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		Fixed Primary	<empty>	<empty>
Reflux Rate	<empty>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Fixed Primary	<empty>	<empty>
Btms Prod Rate	<empty>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Fixed Primary	<empty>	<empty>

**Figura 52.** Especificaciones de diseño de columna DesPropanizadora T-4090 en Hysys.

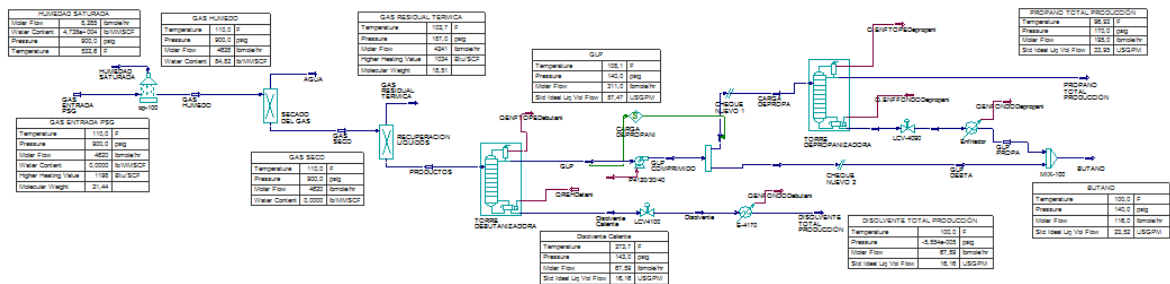
A continuación se presenta el detalle del ambiente de la columna DesPropanizadora simulada en Hysys.



**Figura 53.** Column environment de la torre DesPropanizadora T-4090 en Hysys.

Por último, los productos obtenidos de la columna DesPropanizadora tiene un 98% de pureza para el Propano en la cima como para el Butano en el fondo. Para una carga total de GLP a la Torre DesPropanizadora, la producción total de Propano Líquido es de 33,95 USGPM que su equivalente es de 1164 BPD. En cuanto al Butano Líquido, la producción es de 23,52 USGPM que su equivalente es de 806,4 BPD.

El modelo y simulación completa de la PSG con la nueva torre DesPropanizadora T-4090 se muestra a continuación:



**Figura 54.** Flowsheet y tablas de la simulación de producción de la Torre DesPropanizadora de la PSG.

A continuación se evaluarán los 4 casos de operación de la nueva torre DesPropanizadora, considerando diferentes cargas de GLP como alimentación de la T-4090.

#### 4.2.1 CASO 1: Multiplier en 1 (Producción GLP = 0 BPD ó 0%)

Esta es la condición de máxima carga a la Torre DesPropanizadora T-4090 con un total de 28 platos teóricos. El plato de alimentación de carga es el tray #12. En el shortcut T. DesPropanizadora se tienen condiciones de operación de 167 psi en el condensador a una Temperatura de 95,53 °F y 170 psi en el reboiler a una temperatura de 183,4 °F. La tasa mínima de reflujo es de 1.385. Con un factor de 25%, para la T-4090 seleccioné un reflujo de 1.731. Para la tasa de destilación, en la corriente de propano del shortcut el valor de flujo molar es 194,2 lbmole/hr el cual se ingresa en el parámetro de distillation rate de la T-4090. Con estos parámetros se tienen las siguientes tasas de producción:

PROPANO TOTAL PRODUCCIÓN		
Temperature	95,53	F
Pressure	167,0	psig
Molar Flow	194,2	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	33,79	USGPM

**Tabla 10.** Producción de Propano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 1.

El equivalente de producción de Propano es de 1159 BPD con una pureza del 98,15%.

	Mole Fractions	Liquic
Methane	0.0000	
Ethane	0.0106	
Propane	0.9815	
i-Butane	0.0075	
n-Butane	0.0004	
i-Pentane	0.0000	
n-Pentane	0.0000	
n-Hexane	0.0000	
n-Heptane	0.0000	
n-Octane	0.0000	
n-Nonane	0.0000	
n-Decane	0.0000	
n-C11	0.0000	
Total	1.00000	

**Figura 55.** Composición de la corriente de Propano en el Caso 1.

BUTANO PRODUCCION		
Temperature	100,0	F
Pressure	140,0	psig
Molar Flow	116,8	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	23,67	USGPM

**Tabla 11.** Producción de Butano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 1.

El equivalente de producción de Butano es de 811.7 BPD con una pureza del 98,48%.

Component	Mole Fractions	Liquid
Methane	0.0000	
Ethane	0.0000	
Propane	0.0056	
i-Butane	0.4651	
n-Butane	0.5197	
i-Pentane	0.0087	
n-Pentane	0.0010	
n-Hexane	0.0000	
n-Heptane	0.0000	
n-Octane	0.0000	
n-Nonane	0.0000	
n-Decane	0.0000	
n-C11	0.0000	
<b>Total</b>	<b>1.00000</b>	

**Figura 56.** Composición de la corriente de Butano en el Caso 1.

En su defecto, como el multiplier tiene un factor de 1.0, toda la producción de GLP fue desviada para la torre DesPropanizadora T-4090. Su equivalente en producción de GLP es de cero.

GLP DEBTA		
Temperature	108,5	F
Pressure	170,0	psig
Molar Flow	0,0000	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	0,0000	USGPM

**Tabla 12.** Producción de GLP y condiciones de operación para Caso 1.

#### 4.2.2 CASO 2: Multiplier en 0,75 (Producción GLP = 492,6 BPD ó 25%)

Para el caso 2, nuevamente se debe copiar la corriente de *Carga Depropa* al shortcut para calcular la nueva tasa de destilación y la nueva tasa de reflujo. Para una producción de GLP del 25% y un 75% de carga de GLP a la Torre T-4090, en el shortcut T. DesPropanizadora se tienen condiciones de operación similares a las de full carga (Multiplier = 1.0). Se debe operar con una presión de 167 psi en el condensador a una Temperatura de 95,54 °F y 170 psi en el reboiler a una temperatura de 183,5 °F según el perfil de la columna T-4090. La tasa mínima de reflujo es de 1.385 para el shortcut. Con un factor de 25%, para la T-4090 ingreso un reflujo de 1.731. Para la tasa de destilación, en la corriente de propano del shortcut el valor de flujo molar es 145,7 lbmole/hr el cual se ingresa en el parámetro de distillation rate de la T-4090. Con estos parámetros se tienen las siguientes tasas de producción:

PROPANO TOTAL PRODUCCIÓN		
Temperature	95,54	F
Pressure	167,0	psig
Molar Flow	145,7	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	25,36	USGPM

**Tabla 13.** Producción de Propano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 2.

El equivalente de producción de Propano es de 869,4 BPD con una pureza del 98,14%.

BUTANO PRODUCCION		
Temperature	100,0	F
Pressure	140,0	psig
Molar Flow	87,54	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	17,75	USGPM

**Tabla 14.** Producción de Butano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 2.

El equivalente de producción de Butano es de 608,4 BPD con una pureza del 98,51%.

GLP DEBTA		
Temperature	108,5	F
Pressure	170,0	psig
Molar Flow	77,75	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	14,37	USGPM

**Tabla 15.** Producción de GLP y condiciones de operación para Caso 2.

El equivalente de producción de GLP es de 492.6 BPD con etano < 0,1%. Esta mezcla es 61% Propano y 39% Butanos.

#### 4.2.3 CASO 3: Multiplier en 0,5 (Producción GLP = 985,2 BPD ó 50%)

Para el caso 3, nuevamente se debe copiar la corriente de *Carga Depropa* al shortcut para calcular la nueva tasa de destilación y la nueva tasa de reflujo. Para una producción de GLP del 50% y un 50% de carga de GLP a la Torre T-4090, en el shortcut T. DesPropanizadora se tienen condiciones de operación similares a las de full carga (Multiplier = 1.0). Se debe operar con una presión de 167 psi en el condensador a una Temperatura de 95,53 °F y 170 psi en el reboiler a una temperatura de 183,4 °F. La tasa mínima de reflujo es de 1.385. Con un factor de 25%, para la T-4090 ingreso un reflujo de 1.731. Para la tasa de destilación, en la corriente de propano del shortcut el valor de flujo molar es 97,1 lbmole/hr el cual se ingresa en el parámetro de distillation rate de la T-4090. Con estos parámetros se tienen las siguientes tasas de producción:

PROPANO TOTAL PRODUCCIÓN		
Temperature	95,53	F
Pressure	167,0	psig
Molar Flow	97,10	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	16,90	USGPM

**Tabla 16.** Producción de Propano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 3.

El equivalente de producción de Propano es de 579,3 BPD con una pureza del 98,15%.

BUTANO PRODUCCION		
Temperature	100,0	F
Pressure	140,0	psig
Molar Flow	58,40	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	11,84	USGPM

**Tabla 17.** Producción de Butano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 3.

El equivalente de producción de Butano es de 405,9 BPD con una pureza del 98,41%.

GLP DEBTA		
Temperature	108,5	F
Pressure	170,0	psig
Molar Flow	155,5	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	28,73	USGPM

**Tabla 18.** Producción de GLP y condiciones de operación para Caso 3.

El equivalente de producción de GLP es de 985.2 BPD con etano < 0,1%. Esta mezcla es 61% Propano y 39% Butanos.

#### 4.2.4 CASO 4: Multiplier en 0,25 (Producción GLP = 1478 BPD ó 75%)

Para el caso 4, nuevamente se debe copiar la corriente de *Carga Depropa* al shortcut para calcular la nueva tasa de destilación y la nueva tasa de reflujo. Para una producción de GLP del 75% y un 25% de carga de GLP a la Torre T-4090, en el shortcut T. DesPropanizadora se tienen condiciones de operación distintas a los anteriores casos. Se debe operar con una presión de 170 psi en el condensador a una Temperatura de 82 °F y 173 psi en el reboiler a una temperatura de 165 °F. La tasa mínima de reflujo es de 1.385. Con un factor de 30%, para la T-4090 ingreso un reflujo de 1.8. Esto hizo que el diseño de la torre fuese más pequeño en 1 plato, para un total de 27 platos teóricos y el nuevo plato de alimentación será el plato #11. Para la tasa de destilación, en la corriente de propano del shortcut el valor de flujo molar es 48,55 lbmole/hr el cual se ingresa en el parámetro de distillation rate de la T-4090. Con estos parámetros se tienen las siguientes tasas de producción:

PROPANO TOTAL PRODUCCIÓN		
Temperature	96,80	F
Pressure	170,0	psig
Molar Flow	48,55	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	8,449	USGPM

**Tabla 19.** Producción de Propano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 4.

El equivalente de producción de Propano es de 289,7 BPD con una pureza del 98,11%.

BUTANO PRODUCCION		
Temperature	100,0	F
Pressure	140,0	psig
Molar Flow	29,20	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	5,918	USGPM

**Tabla 20.** Producción de Butano Líquido y condiciones de salida de Torre DesPropanizadora Caso 4.

El equivalente de producción de Butano es de 202,9 BPD con una pureza del 98,4%.

GLP DEBTA		
Temperature	108,5	F
Pressure	170,0	psig
Molar Flow	233,2	lbmole/hr
Std Ideal Liq Vol Flow	43,10	USGPM

**Tabla 21.** Producción de GLP y condiciones de operación para Caso 4.

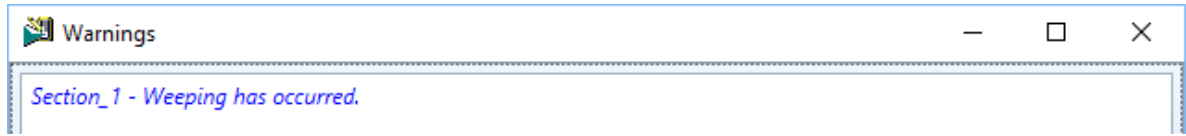
El equivalente de producción de GLP es de 1478 BPD con etano < 0,01%. Esta mezcla es 61% Propano y 39% Butanos.

#### **4.3. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE TORRE DESPROANIZADORA T-4090.**

Para la especificación técnica de la columna DesPropanizadora fue requerido usar la herramienta *Tray Sizing* que se encuentra en el diseño de equipos de la pestaña *Analysis*. Esta herramienta permite definir los internos de la Torre DesPropanizadora, las dimensiones longitudinales y geometría de esta, el tipo de empaques y por último un análisis hidráulico de la torre. Las torres de destilación se diseñan empacadas (packed) o tipo platos (trayed). Las columnas empacadas presentan dimensiones y alturas pequeñas en comparación con las columnas de platos, permitiendo un contacto continuo entre la fase líquido-gas, la cual presenta un delta de presión más bajo a lo largo de la torre.

Las columnas más comunes y económicas son las torres de platos con internos *Sieve* o de tamiz más conocido como plato perforado. También las hay con platos de tipo copa de burbujeo (bubble), tipo campana, tipo válvula y empacadas como platos de relleno o empaques estructurados.

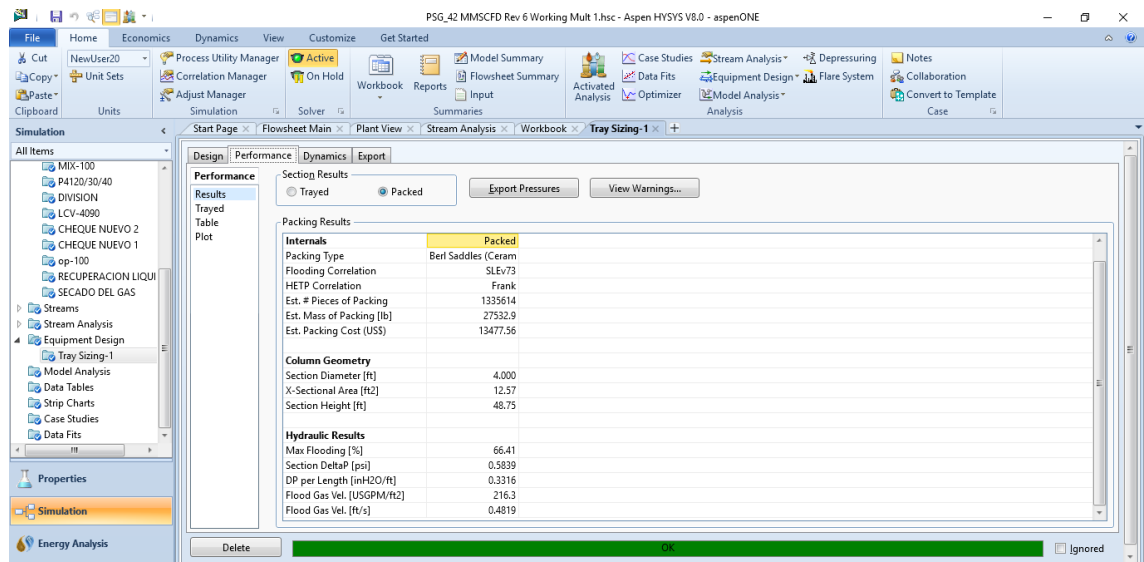
Para el diseño de la Torre DesPropanizadora, inicialmente se diseñó como una torre convencional de plato perforado. Sin embargo, en el análisis hidráulico presentó una advertencia (*warning*) de lloriqueo o "*weeping*".



**Figura 57.** Advertencia en el diseño de T-4090 con platos perforados por hidráulica.

Para evitar la advertencia hidráulica se realiza el cambio de tipo de internos. Se calcularon los dimensionamientos para torre empacada y torre de plato tipo válvula.

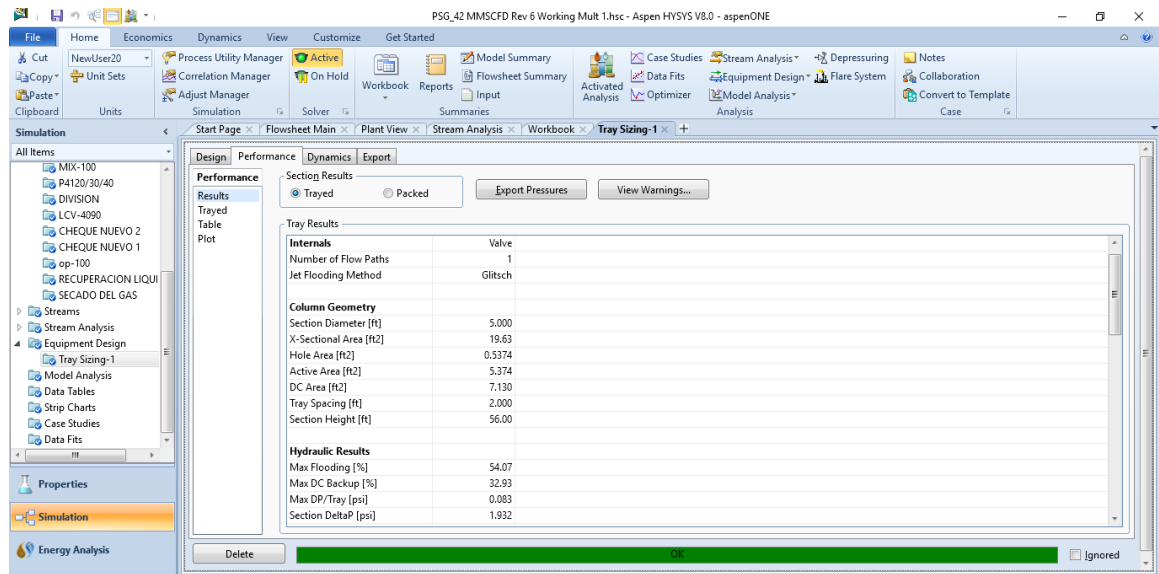
Para la torre empacada se seleccionó el empaque más común que es el Berl Saddles. Los datos geométricos para este tipo de torre empacada son de una torre de diámetro de 4 pies equivalente a 1,22 metros y una altura de 48,75 pies con su equivalencia de 14,85 metros de altura. Este tipo de torre tiene una menor caída de presión por unidad de altura.



**Figura 58.** Especificaciones técnicas de T-4090 DesPropanizadora como Torre empacada.

La siguiente alternativa de diseño es una torre de platos tipo válvula siendo esta alternativa un 15% más económica que la alternativa anterior en inversión inicial. Este tipo de columnas tiene la ventaja de un mantenimiento y limpieza más fácil comparada con la torre empacada. El método de inundación es Glitsch. Los datos geométricos para esta torre de platos tipo

válvula se diseñó con un diámetro de 5 pies equivalente a 1,52 metros y una altura de 56 pies con su equivalencia de 17 metros de altura.



**Figura 59.** Especificaciones técnicas de T-4090 DesPropanizadora como Torre de platos tipo válvula.

## 5. ANALISIS FINANCIERO

### 5.1. INVERSIÓN

Teniendo en cuenta que las torres de tipo válvula tiene mayor ventaja que las torres empacadas, se selecciona en principio una torre DesPropanizadora de platos tipo válvula. Las empresas fabricantes de columnas de destilación son *Sulzer Chemtech* localizada en Suiza y la empresa *Koch-Glitsch*, con su base principal ubicada en Kansas, Estados Unidos las cuales fueron consultadas para estimar un precio de la Torre DesPropanizadora diseñada en esta monografía.

La inversión para este proyecto asciende a un total de aproximadamente \$5.0 MMUSD que se componen del desarrollo de una ingeniería básica y de detalle con sus respectivos Hazops. Se requiere también una inspección por integridad de la tubería que se interconectará al nuevo sistema de la Torre DesPropanizadora propuesta. Seguido de esto se encuentra las obras de construcción que se componen de obras civiles, eléctricas, mecánicas y tubería e instrumentación y control. Por último los materiales requeridos. A continuación se detalla los valores aproximados de la inversión del Proyecto.

<b>Descripción</b>	<b>Detalle (\$USD)</b>	<b>Total (\$USD)</b>
Servicios		\$90.000
Ingeniería básica y detallada	\$70.000	
Inspección de tubería y equipos	\$20.000	
<b>Construcción</b>		<b>\$1.600.000</b>
Obras Civiles	\$500.000	
Obras Eléctricas	\$300.000	
Obras Tubería y Mecánica	\$500.000	
Obras Instrumentación y Control	\$300.000	
<b>Materiales</b>		<b>\$3.210.000</b>
Instrumentación	\$150.000	
Torre DesPropanizadora T-4090	\$2.900.000	
Válvulas	\$70.000	
Alquiler de Equipos	\$90.000	
<b>TOTAL</b>		<b>\$4.900.000</b>

**Tabla 22.** Costos estimados para la inversión de la implementación de la Torre DesPropanizadora.

## 5.2. FLUJO DE CAJA

Para completar el análisis financiero, es requerido conocer los valores de venta del GLP y los nuevos productos a destilar en la PSG, que son el propano líquido y el butano líquido. Para ello, fue requerido contactar al Ingeniero Comercial de Termoyopal Gas S.A. E.S.P. En Colombia, los precios del GLP son regulados por la CREG bajo la resolución 065 del 2016. Las tarifas de GLP pueden ser consultadas en la página de Ecopetrol como "Tarifas GLP" las cuales varían mes a mes. Para Termoyopal Gas, los precios de referencia están sujetos al precio de *Campo Cusiana* (Casanare) que hoy en día es operada y mantenida por Ecopetrol S.A. Estos datos se relacionan en la siguiente tabla:

PRECIOS MAXIMOS REGULADOS GLP DE OCTUBRE 15 A NOVIEMBRE 14 DE 2016					
Concepto	Precio Refinería de Barranca	Precio Reficar	Precio Apiay	Precio Dina	Precio Cusiana
Ingreso al Productor (\$/GL)	1.157,37	1.565,21	1.051,79	1.059,51	1.060,50
Ingreso al Productor (\$/KG)	527,01	781,79	520,64	524,56	525,94
Transporte	(*)	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
<b>Precio de venta al comercializador mayorista (sin incluir transporte) \$/GL</b>	<b>1.157,37</b>	<b>1.565,21</b>	<b>1.051,79</b>	<b>1.059,51</b>	<b>1.060,50</b>
<b>Precio de venta al comercializador mayorista (sin incluir transporte) \$/KG</b>	<b>527,01</b>	<b>781,79</b>	<b>520,64</b>	<b>524,56</b>	<b>525,94</b>

*Precios máximos regulados de suministro de GLP, sin perjuicio de lo establecido en las OPC con precio regulado, Precios Resolución CREG 065 de 2016*

(\*) <http://www.ecopetrol.com.co/contenido.aspx?catID=192&conID=36336&pagID=128099>

**Tabla 23.** Precios máximos regulados GLP Octubre 15 a Noviembre 14 de 2016.

Teniendo como referencia los precios de la tabla anterior, se puede construir una nueva tabla que relaciona los ingresos actuales que genera la planta de secado de gas en base a la venta del GLP con la producción diaria del reporte de Marzo 05 del 2016 que corresponde de igual manera a la simulación realizada en Hysys para esta monografía.

ACTUAL	BPD	GPD	\$/GAL	VENTA DIA (COP)	VENTA MES (COP)
GLP	1950	81900	\$ 1.060	\$ 86.814.000	\$ 2.604.420.000

**Tabla 24.** Ventas promedio mensuales en producción actual de GLP.

En cuanto a los precios de los otros dos combustibles, propano líquido y butano líquido, no están publicados en la página de Ecopetrol S.A. desde Mayo del 2015. Esto se denominaban *Precios de combustibles Petroquímicos e Industriales*. No obstante, así como para la comercialización de crudos existen dos referencias internacionales muy conocidas como el BRENT (crudos del mar del norte) y el WTI (crudo dulce del occidente de Texas, USA), para

el mercado de Gas también existe una referencia internacional y es *Mont Belvieu* (MB) de los E.U.A. hacia el resto del mundo.

Se trata del mayor mercado del mundo y región de influencia natural para varias regiones dentro de las que se encuentra América Latina (LATAM) por representar su costo de oportunidad comercial<sup>17</sup>.

*Mont Belvieu* tiene una dinámica de precios muy importante que es influenciada por diversos elementos tales como: Fundamentales de la oferta y demanda (precios del crudo, eventos mundiales, etc); Estacionalidad verano – invierno de la demanda, y Consumo final por región ya sea como combustible o para usos en la petroquímica.

Como referencia de los precios del Propano y el Butano se consultó la bolsa de hidrocarburos de petroquímica<sup>18</sup> donde se observa que el precio por galón de Butano se cotizó en 0,71603 USD. Por otra parte, el precio por galón de Propano líquido<sup>19</sup> fue de 0,53481 USD. Para los cálculos de ventas de los combustibles con precio de dólar por galón, se considera un precio promedio del dólar de \$3.000 pesos colombianos.

CASO 1	BPD	GPD	\$/GAL	VENTA DIA	VENTA MES
GLP	0	0	\$ 1.060	\$ 0	\$ 0
PROPANO	1159	48678	\$ 1.604	\$ 78.100.444	\$ 2.343.013.306
BUTANO	811,7	34091,4	\$ 2.148	\$ 73.231.395	\$ 2.196.941.863
				<b>TOTAL</b>	<b>\$ 4.539.955.169</b>

CASO 2	BPD	GPD	\$/GAL	VENTA DIA	VENTA MES
GLP	492,6	20689,2	\$ 1.060	\$ 21.930.552	\$ 657.916.560
PROPANO	869,4	36514,8	\$ 1.604	\$ 58.585.441	\$ 1.757.563.217
BUTANO	608,4	25552,8	\$ 2.148	\$ 54.889.714	\$ 1.646.691.425
				<b>TOTAL</b>	<b>\$ 4.062.171.201</b>

CASO 3	BPD	GPD	\$/GAL	VENTA DIA	VENTA MES
GLP	985,2	41378,4	\$ 1.060	\$ 43.861.104	\$ 1.315.833.120
PROPANO	579,3	24330,6	\$ 1.604	\$ 39.036.745	\$ 1.171.102.337
BUTANO	405,9	17047,8	\$ 2.148	\$ 36.620.209	\$ 1.098.606.261
				<b>TOTAL</b>	<b>\$ 3.585.541.718</b>

CASO 4	BPD	GPD	\$/GAL	VENTA DIA	VENTA MES
GLP	1478	62076	\$ 1.060	\$ 65.800.560	\$ 1.974.016.800

<sup>17</sup> <http://www.gas.pemex.com.mx/PGPB/Productos+y+servicios/Gas+licuado/Mercado+gas+LP/>

<sup>18</sup> <http://www.cmegroup.com/trading/energy/petrochemicals/mont-belvieu-normal-butane-5-decimals-swap.html>

<sup>19</sup> <http://www.cmegroup.com/trading/energy/petrochemicals/mont-belvieu-propane-5-decimals-swap.html>

PROPANO	289,7	12167,4	\$ 1.604	\$ 19.521.742	\$ 585.652.247
BUTANO	202,9	8521,8	\$ 2.148	\$ 18.305.593	\$ 549.167.801
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 3.108.836.848</b>	

**Tabla 25.** Ventas promedio esperadas para los 4 casos simulados con la implementación de T-4090.

Evidentemente la alternativa que presenta una mayor ganancia para Termoyopal es la opción del caso 1, que significa no producir GLP de venta para producir Propano líquido y Butano líquido. No obstante, en la vida real no es el caso ideal debido a que se tienen contratos de venta de GLP hasta 5 años.

La operación de la facilidad demanda algunos costos fijos de personal, servicios de mantenimiento preventivo y correctivo. En total se estima un costo anual de \$100.000 para el primer año, con un incremento de 50% para el segundo año durante los siguientes para un total de \$150.000 USD.

Respecto a los ingresos por venta esperado de propano y butano, fue necesario investigar los pronósticos de precio de venta de cada producto en el portal de cmegroup25 en la sección de *Average Prices Quotes*. Referente a los precios futuros de venta de GLP, fue necesario consultar el informe de Junio 2016 de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) en el informe de Proyección de precios de los energéticos para generación eléctrica de 2016 al 2035. De allí se construye la siguiente tabla:

Año	Futures Prices GLP (\$USD/Gal)	Futures Prices Propane (\$USD/Gal)	Futures Prices Butane (\$USD/Gal)
2016	0,3533	0,5348	0,716
2017	0,61	0,4979	0,7125
2018	0,642	0,535	0,7112
2019	0,654	0,4899	0,5
2020	0,654	0,4806	0,54
2021	0,715	0,4806	0,5416
2022	0,654	0,4806	0,5416

**Tabla 26.** Precios futuros para el GLP, Propano y Butano hasta el 2022.

Se estima que pasados 5 años se realice una parada de planta general que requiera inspección o cambio de válvulas e internos de la columna DesPropanizadora que se propone. Así mismo, algunos overhaul y mantenimiento general a los equipos asociados a este nuevo sistema. Estos gastos pueden ascender a 1.2 millones de dólares.

A partir de los datos anteriores se construye el flujo de caja para este Proyecto. Adicionalmente, incluí una columna de flujo de caja actual para evaluar qué tan rentable puede ser continuar con la producción actual y no implementar el nuevo proyecto.

Año	Producción GLP	Precio GLP (\$USD/Gal)	Producción Propano	Precio Propano (\$USD/Gal)	Producción Butano	Precio Butano (\$USD/Gal)	Ingreso (\$ USD)	OPEX (\$ USD)	CAPEX (\$ USD)	Flujo de caja Proyecto (\$ USD)	Flujo de caja Actual (\$ USD)
	Galones		Galones		Galones						
2016	29.484.000	0,3533	0	0,5348	0	0,716	\$0	100.000	5.000.000	-5.000.000	-5.000.000
2017	14.896.224	0,61	8.759.016	0,4979	6.137.208	0,7125	\$17.820.571	150.000		17.670.571	18.023.393
2018	14.896.224	0,642	8.759.016	0,535	6.137.208	0,7112	\$18.614.232	150.000		18.464.232	18.976.752
2019	14.896.224	0,654	8.759.016	0,4899	6.137.208	0,5	\$17.101.776	150.000		16.951.776	19.334.261
2020	14.896.224	0,654	8.759.016	0,4806	6.137.208	0,54	\$17.265.806	150.000	1.200.000	14.715.806	19.334.261
2021	14.896.224	0,715	8.759.016	0,4806	6.137.208	0,5416	\$18.184.295	150.000		18.034.295	21.151.600
2022	14.896.224	0,654	8.759.016	0,4806	6.137.208	0,5416	\$17.275.625	150.000		17.125.625	19.334.261
									<b>Total</b>	<b>97.962.306</b>	<b>111.154.528</b>
									<b>VPN al 10%</b>	<b>63.614.466</b>	<b>71.679.101</b>
									<b>TIR</b>	<b>355,1%</b>	<b>364,9%</b>
									<b>PT</b>	<b>1 Año</b>	<b>1 Año</b>

**Tabla 27.** Flujo de caja del Proyecto Columna DesButanizadora y Flujo de caja producción actual de GLP.

## 6. CONCLUSIONES

Se realizó la simulación de la producción actual y de la rectificación del GLP producido en la planta de secado de gas para ser ingresado como carga a la torre DesPropanizadora, propuesta en esta monografía.

Para la propuesta de la nueva columna, se analizaron 4 escenarios de carga. El caso 1 que maneja una carga de 100% de GLP, el caso 2 de una carga de 75%, el caso 3 de una carga de 50% y el caso 4 de una carga de un 25% de GLP a la nueva torre DesPropanizadora. Se logró determinar las concentraciones de producción en cada caso y realizar una evaluación técnico económico para recomendar el mejor diseño, de acuerdo a los platos teóricos obtenidos.

De la evaluación técnica económica, se logró detectar que para el caso seleccionado, que fue el caso 3 que carga un 50% a la torre DesPropanizadora para producir propano líquido con una pureza de 98,15% y butano líquido con una pureza de 98,41%, a pesar de ser un proyecto rentable con un  $VPN > 0$ , el flujo de caja al finalizar el año 2022 será menor que el flujo de caja de venta de 100% GLP.

Una conclusión importante de esta monografía es que se observa que según las proyecciones de cotización de combustibles líquidos a nivel mundial, tiene una tendencia a la alza en el valor comercial del GLP. Esto obedece a que la tecnología automotriz está dedicada a la fabricación de motores de combustión interna automotriz que consuman un combustible más amigable con el medio ambiente y eso se puede lograr a través del GLP. En cierta medida, los valores de los combustibles actuales diesel y fuel oil tienden a la baja para ser reemplazados por combustibles limpios.

Adicionalmente, el mercado en Colombia para el Butano es bastante restringido a las Refinerías de crudo los cuales son usados en los procesos de las plantas viscorreductoras. A raíz de este estudio, se evidenció que el producto de fondo de la DesPropanizadora tiene un valor comercial al producto de cima de la torre, siendo este un componente importante para la decisión de evaluar financieramente el Proyecto.

Por último, se concluye que así se cargue toda la producción de GLP a la torre DesPropanizadora propuesta, según las proyecciones del mercado transaccional de combustibles en Estados Unidos, a partir del año 2019 el valor comercial del GLP será superior a los valores comerciales del propano y el butano líquido.

## 7. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que el proyecto de implementar la columna DesPropanizadora T-4090 en la planta de secado de gas tiene un  $VPN > 0$ , es posible ubicar potenciales clientes interesados en los nuevos productos que son butano y propano de alta pureza (98%).

A pesar de tener contacto directo con el Director Comercial de productos de Termoyopal Gas, no es fácil contar con todo el apoyo para ubicar clientes interesados en estos productos. No obstante, es una tarea y compromiso que sigue en curso para el Director Comercial de esta compañía con el fin de soportar de una mejor manera el proyecto.

En cuanto al desarrollo de la ingeniería detallada, es recomendable utilizar equipos explosión proof con la característica SIL y un nivel de 3 o 4 preferiblemente. Esta recomendación está enfocada a la seguridad de procesos y a mitigar cualquier tipo de eventos que afecten la integridad de los equipos y esencialmente de las personas.

Otra recomendación para tener en cuenta es que si se decide implementar este proyecto en uno o dos años, es importante volver a simular el proceso con las condiciones del gas de proceso de entrada. Esto podría incurrir en cambios de platos teóricos, alturas y dimensiones. Adicionalmente, el tiempo de entrega de la torre DesPropanizadora puede tardar de 4 a 5 meses en su proceso construcción e importación.

Finalmente, como última recomendación, es que en caso de modificar la altura de la torre propuesta, esta no debe superar los 19 metros de largo debido a que la planta de secado se encuentra ubicado en el corregimiento el Morro, con una vía terrestre que sufre de problemas meteorológicos. Así como el paso por el puente conocido como “La Cabuya” que no permite maniobrar vehículos de carga con una dimensión superior a los 24 metros.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Cleanfuel [En línea], CPF Floreña (Central Processing Facility of Floreña)
2. Ecured [En línea], < <https://www.ecured.cu/Propano>>
3. Grupo Termoyopal [En línea] [http://termoyopal.com.co/site/nosotros/historia\\_291](http://termoyopal.com.co/site/nosotros/historia_291)
4. <http://www.gas.pemex.com.mx/PGPB/Productos+y+servicios/Gas+licuado/Mercado+gas+LP/>
5. <http://www.cmegroup.com/trading/energy/petrochemicals/mont-belvieu-normal-butane-5-decimals-swap.html>
6. <http://www.cmegroup.com/trading/energy/petrochemicals/mont-belvieu-propane-5-decimals-swap.html>
7. KIRK-OHTMER, Encyclopedia of Chemical Technology. 4th Edition. Vol 9 Energy Management. 2010.
8. Propanogas [En línea], < <http://propanogas.com/faq/caracteristicas-propano>>
9. Requena, L. Vamos a estudiar química orgánica (2001). Ediciones Eneva.
10. SANTOS, NICOLAS. Absorción. Capítulo 3. Especialización Ingeniería de Gas. Universidad Industrial de Santander -UIS-. 2011
11. SANTOS, NICOLAS. Deshidratación. Capítulo 5. Especialización Ingeniería de Gas. Universidad Industrial de Santander - UIS-. 2010.
12. SANTOS, NICOLAS. Adsorción. Capítulo 4. Especialización Ingeniería de Gas. Universidad Industrial de Santander - UIS-. 2011
13. SANTOS, NICOLAS. Fraccionamiento. Capítulo 8. Especialización Ingeniería de Gas. Universidad Industrial de Santander - UIS-. 2010

14. Simulación [En línea]

<http://simulacionprocesosindustriales.blogspot.com.co/2016/02/obtencion-de-etileno-apartir-de-etano.html>

15. TERMOYOPAL S.A. Filosofía de Operación Sistema Fire & Gas. Planta de Secado de Gas de Termoyopal Gas S.A. E.S.P. Yopal 2012.

16. TERMOYOPAL S.A. Process Flow Diagram. Planta de Secado de Gas de Termoyopal Gas S.A. E.S.P. Yopal 2012.

17. TERMOYOPAL S.A. Manual de Operaciones. Planta de Secado de Gas de Termoyopal Gas S.A. E.S.P. Yopal 2010.

18. TERMOYOPAL S.A. Piping & Instrumentation Diagram, INT95-127. Planta de Secado de Gas de Termoyopal. Yopal 2012.