

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería de Petróleo, Gas Natural y Petroquímica




TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Implementación de la nueva unidad de deshidratación de TEG en
un sistema criogénico en planta de gas de Malvinas - Camisea**

Para obtener el Título Profesional de
Ingeniero Petroquímico


Elaborado por

José Iván Malma Ventocilla

 0009-0007-0438-3650

Asesor

M.Sc. César Augusto Luján Ruiz

 0000-0002-2595-2708

LIMA – PERÚ

2024

DEDICATORIA

Este trabajo tiene una dedicación especial a:

A Dios y al Espíritu Santo, por ser la base de mi fe e impulso hacía el progreso.

A mi madre, hermana e hijos, por apoyarme y ser mi motivo en cada paso alcanzado hasta llegar a la presentación de este documento, con la confianza de que no será el último logro de la familia a nivel profesional.

Al estado peruano, por permitirme formarme como profesional en una de sus prestigiosas casas de estudio, así como mantener el objetivo de poder seguir aportando al sector hidrocarburos del país desde la posición en la que me encuentre.

AGRADECIMIENTO

Quiero dar un agradecimiento especial a mi asesor, M.Sc. Ing. César Luján, catedrático de la Escuela Profesional de Ingeniería Petroquímica, quien apoyo el desarrollo y conceptualización de este documento y a lo largo de mi formación universitaria.

En adición, agradecer a Pluspetrol Perú Corporation (PPC) por brindar todos los recursos, herramientas y software necesarias para llevar a cabo el proceso de investigación.

Por último, quiero agradecer a todos en mi familia y en especial a mi madre, por darme el soporte y la fortaleza para avanzar en logro de objetivos realizados, así como la visualización de próximos pasos.

RESUMEN

Pluspetrol, en adelante PPC, planea instalar un nuevo sistema de compresión de gas húmedo en cabeza de pozo debido al proceso de depletación de los pozos del lote 88 y 56. Posterior a la instalación de dicho sistema de compresión, se estima que el contenido de humedad en el gas húmedo a procesar en la Planta de gas Malvinas se incrementa de 65 lb agua/MMSCF a alrededor de 95 lb agua/MMSCF gas procesado diariamente.

En dicha evaluación realizada, se evidencia además que el sistema existente de deshidratación del tren criogénico 5 se encuentra en el límite de su capacidad para obtener un contenido de humedad aceptable en el gas deshidratado de menos de 7 lb agua/MMSCF. Esto debido a las condiciones actuales de operación, donde dicho tren ya opera con una mayor carga de gas húmedo y un contenido de humedad en el límite superior de diseño.

La solución definitiva para dicha problemática es instalar un nuevo patín de deshidratación de glicol que permita obtener un glicol regenerado con una pureza mayor a 99,1 wt%, necesaria para reducir el incremento contenido de humedad descrito anteriormente.

Las condiciones de diseño de dicho sistema prevén alcanzar un contenido de humedad del gas húmedo a la salida del sistema de deshidratación teórico de 7 lb agua/MMSCF gas procesado. Sin embargo, es necesario ejecutar la prueba de rendimiento o *Performance Test* del nuevo patín de deshidratación con glicol a fin de identificar el punto óptimo operativo del sistema y emitir recomendaciones que permitan alcanzar la pureza de glicol deseada considerando otros factores como el indicador de consumo asociado de glicol en Gal TEG/MMSCF y costos operativos en USD.

Palabras clave – Gas natural, absorción, Deshidratación, Trietilenglicol

ABSTRACT

Pluspetrol, summarized as PPC, plans to install a new wet gas compression system at the wellhead due to the depletion process of the wells in blocks 88 and 56. After the installation of said compression system, it is estimated that the content of Moisture in the wet gas to be processed at the Malvinas Gas Plant increases from 65 lb water/MMSCF to around 95 lb water/MMSCF gas processed daily.

In said evaluation, it is also evident that the existing dehydration system of cryogenic train 5 is at the limit of its capacity to obtain an acceptable moisture content in the dehydrated gas of less than 7 lb water/MMSCF. This is due to the current operating conditions, where said train already operates with a higher load of wet gas and a moisture content at the upper design limit.

The definitive solution for this problem is to install a new glycol dehydration skid that allows obtaining a regenerated glycol with a purity greater than 99.1 wt%, necessary to reduce the increase in humidity described above.

The design conditions of said system foresee reaching a humidity content of the humid gas at the outlet of the theoretical dehydration system of 7 lb water/MMSCF processed gas. However, it is necessary to run the performance test or Performance Test of the new dehydration skid with glycol to identify the optimal operating point of the system and issue recommendations that allow reaching the desired glycol purity considering other factors such as the associated consumption indicator. of glycol in Gal TEG/MMSCF and operating costs in USD.

Keywords – Natural gas, absorption, Dehydration, Trietilenglycol

PRÓLOGO

En el presente trabajo de suficiencia profesional, denominada “Implementación de la nueva unidad de deshidratación de TEG en una unidad criogénica 5 en planta de gas de Malvinas - Camisea”, se evalúa a través de una prueba de rendimiento en campo soportado de simulación de procesos, el punto óptimo operativo requerido en el nuevo patín de deshidratación con glicol para alcanzar la calidad de glicol deseada considerando otros factores como el factor de pérdidas de glicol o *TEG loses* así como costos operativos.

La tesis se divide en cuatro capítulos.

En el capítulo I, se describe el planteamiento del problema, así como los objetivos de la investigación. En adición, se presenta de manera resumida los antecedentes de problemáticas similares referido a pruebas de rendimiento y evaluación de sistemas de deshidratación con glicol.

En el capítulo II, se detalla a través del marco teórico los principales conceptos utilizados en la presente investigación orientada al sistema de deshidratación de gas con glicol y a los escenarios de variación de su rendimiento.

En el capítulo III, se muestra la metodología utilizada para evaluar el rendimiento del nuevo sistema de deshidratación de glicol modificando las principales variables operativas a través de una prueba controlada.

En el Capítulo IV, se evalúa los resultados obtenidos en la prueba de rendimiento del patín de deshidratación con glicol en las diferentes etapas probadas. Finalmente, se presenta las conclusiones y recomendaciones que permitan asegurar una calidad óptima de TEG considerando otros parámetros operativos como las pérdidas asociadas de glicol.

ÍNDICE

CAPÍTULO I. Introducción.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Descripción del Problema de Investigación.....	7
1.2.1 <i>Problema General</i>	7
1.2.2 <i>Problemas Específicos</i>	8
1.3 Objetivos del Estudio.....	8
1.3.1 <i>Objetivo General</i>	8
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	9
1.4 Justificación de la investigación.....	9
1.5 Antecedentes referenciales.....	9
CAPÍTULO II. Marco teórico y conceptual.....	13
2.1 Punto de rocío.....	13
2.2 Contenido de humedad en el gas.....	13
2.3 Hidratos de gas natural.....	16
2.4 Deshidratación.....	17
2.4.1 <i>Absorción</i>	17
2.4.2 <i>Adsorción</i>	18
2.5 Deshidratación con tamices moleculares.....	20
2.6 Punto de rompimiento o Breakthrough.....	22
2.7 Deshidratación con TEG.....	24
2.7.1 <i>Contactora principal</i>	26
2.7.2 <i>Economizador de glicol</i>	28
2.7.3 <i>Intercambiador de calor TEG rico/TEG pobre</i>	29
2.7.4 <i>Separador flash</i>	30
2.7.5 <i>Filtros de carbón activado y filtro de polvo</i>	31
2.7.6 <i>Rehervidor y columna de regeneración</i>	32
2.7.7 <i>Columna Stahl</i>	34
CAPÍTULO III. Desarrollo del trabajo de investigación.....	35
3.1 Metodología de trabajo para puesta en servicio.....	37
3.1.1 <i>Simulación de procesos</i>	37
3.1.2 <i>Prueba de rendimiento</i>	38
3.1.3 <i>Definición de punto operativo</i>	38
3.1.4 <i>Estimación de costos operativos</i>	39
3.2 Etapa 1 - Simulación de procesos.....	39
3.2.1 <i>Simulación condiciones de diseño</i>	39

3.2.2	<i>Simulación de procesos - 520 MMSCFD</i>	41
3.3	Etapa 2 - Prueba de rendimiento	42
3.3.1	<i>Arranque y alineamiento de la nueva unidad de TEG</i>	42
3.3.2	<i>Ejecución de prueba de rendimiento por etapas</i>	48
3.3.3	<i>Desarrollo de oportunidades de mejora</i>	56
3.4	Etapa 3 - Definición punto óptimo operativo.....	57
3.4.1	<i>Caudal total TEG</i>	57
3.4.2	<i>Condiciones regeneración y deshidratación TEG</i>	57
3.4.3	<i>Operación de filtros e hidráulica del sistema</i>	58
3.5	Etapa 4 - Estimación costos operativos	60
CAPÍTULO IV. Análisis y discusión de resultados		63
4.1	Etapa 1 – Simulación de procesos.....	63
4.2	Etapa 2 – Prueba de rendimiento.....	64
4.3	Etapa 3 – Definición del punto óptimo operativo	67
4.4	Etapa 4 – Estimación de costos operativos.....	68
CONCLUSIONES.....		69
RECOMENDACIONES		71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema inicial de procesamiento en Planta de gas Malvinas	2
Figura 2: Diagrama de bloques de trenes criogénicos	3
Figura 3: Unidades de procesamiento inicial en Planta de Gas Malvinas	4
Figura 4: Diagrama de bloques subsistemas Tren criogénico 5.....	6
Figura 5: Estimación de contenido de agua en el gas por correlación.	15
Figura 6: Ampliación de una partícula de tamiz molecular	19
Figura 7: Esquema de deshidratación simplificado con 2 lechos	21
Figura 8: Zona de transferencia de masa en un lecho adsorbente	23
Figura 9: Esquema de sistema de deshidratación con TEG	25
Figura 10: Esquema típico de una contactora de TEG.....	26
Figura 11: Esquema de burbujeo de gas en TEG en un absorbedor	27
Figura 12: Tipos de empaques y plato usados en contactoras TEG	28
Figura 13: Ubicación típica de un condensador de reflujo.....	29
Figura 14: Intercambiador de calor Multitubo en forma de U	30
Figura 15: Separador flash Gas-glicol-condensado típico	31
Figura 16: Tipo de filtro de microfibra utilizado en Sistemas TEG.....	32
Figura 17: Columna de regeneración y rehervidor de TEG.....	33
Figura 18: Columna Stahl de glicol.....	34
Figura 19: Esquema general de la nueva unidad de TEG – Crio 5	36
Figura 20: Plan de trabajo PEM nueva unidad de TEG Criogénica 5.....	37
Figura 21: Esquema de arranque en caliente de unidad de TEG.....	44
Figura 22: Condiciones de regeneración unidad de TEG post arranque.....	47
Figura 23: Calidad de TEG pobre vs Caudal TEG pobre	51
Figura 24: Caudal TEG vs nivel operativo unidades TEG	53
Figura 25: Caudal TEG vs Presión diferencial filtros Unidad TEG	53
Figura 26. Esquema de operación rehervidor y columna Stahl	55
Figura 27. Esquema de oportunidades de mejora nueva unidad de TEG	56
Figura 28: Tendencia de consumo de TEG Tren criogénico 5; Error! Marcador no definido.	
Figura 29. Análisis temperatura rehervidor vs calidad TEG pobre	63
Figura 30. Capacidad variador frecuencia vs caudal total TEG.....	65
Figura 31. Monitoreo de vibraciones descarga de bombas TEG.....	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Condición inicial de los pozos Lote 88/56 hacia Planta Malvinas.....	1
Tabla 2: Performance actual de deshidratación unidades de TEG 1 al 5.....	5
Tabla 3: Propiedades físicas de los inhibidores de humedad	17
Tabla 4: Condiciones de adsorción y desorción de la humedad en el tamiz	20
Tabla 5: Tamaño poral de tamices en función del tipo de zeolita.....	20
Tabla 6: Ventajas y desventajas del uso de tamices moleculares.....	22
Tabla 7: Condiciones de diseño Nuevo patín de TEG Criogénica 5.....	40
Tabla 8: Resumen simulación de procesos Diseño/Operación normal	41
Tabla 9: Actividades para arranque en caliente Nueva Unidad de TEG	43
Tabla 10: Volumen de gas optimizado por arranque en caliente.....	46
Tabla 11: Límites de la prueba de rendimiento nuevo Patín de glicol	48
Tabla 12: Resumen etapas de prueba de rendimiento unidad de TEG.....	49
Tabla 13: Resumen de resultados prueba de rendimiento unidad de TEG	49
Tabla 14: Comparativa Nueva unidad TEG vs Unidad existente.....	58
Tabla 15: Frecuencia de reemplazo filtros TEG	59
Tabla 16: Estimación anual costos por consumo TEG.....	61
Tabla 17: Estimación de costos de calidad de TEG	61
Tabla 18: Consumo y costo asociado de filtros en unidad TEG	62
Tabla 19: Resumen simulación de procesos Diseño/Operación normal	64
Tabla 20: Calidad de TEG pobre vs carga de gas húmedo.....	66
Tabla 21: Consumo real TEG vs consumo estimado	67
Tabla 22: Comparativa Nueva unidad TEG vs Unidad existente.....	67
Tabla 23. Resumen resultados evaluación etapa optima	68
Tabla 24: Estimación y distribución de costos unidad de TEG	68

CAPÍTULO I.Introducción

1.1 Generalidades

La Planta de Gas de Camisea, operada por la empresa Pluspetrol (PPC en adelante), se encuentra ubicada en la selva de Cusco, distrito de Megantoni, provincia de La Convención. Dicho activo inicio su operación en el año 2004 con el fin de procesar la producción de gas natural de los clústers San Martín y Cashiriari del Lote 88 así como los clústers Mipaya y Pagoreni del lote 56.

Las condiciones principales de los pozos de producción descritos se indican en la

Tabla (PPC, 2004).

Tabla 1

Condición inicial de los pozos Lote 88/56 hacia Planta Malvinas

Parámetro	San Martín	Mipaya	Pagoreni	Cashiriari
Presión de cabeza de Pozo (psig)	1400 - 1500	1850	1400 – 1700	1400 – 1700
Presión de operación en Malvinas (psig)	1300	1300	1300	1300
Temperatura de Operación en Malvinas (°F)	80-110	100	80-110	80-110
Contenido de agua libre (Barriles de agua/ MMSCF de gas saturado)	0.5	1.0	0.5	0.5

Fuente: Elaboración propia en base a información histórica (PPC, 2004)

De acuerdo con la Tabla 1, la condición promedio de producción de gas húmedo de los pozos a gas a la llegada a la Planta Malvinas es de 100°F y 1300 psig. Según el Data Book GPSA, el contenido de agua estimado para el gas saturado a esas condiciones es de 65 lb H₂O/MMscf (GPSA, 2004).

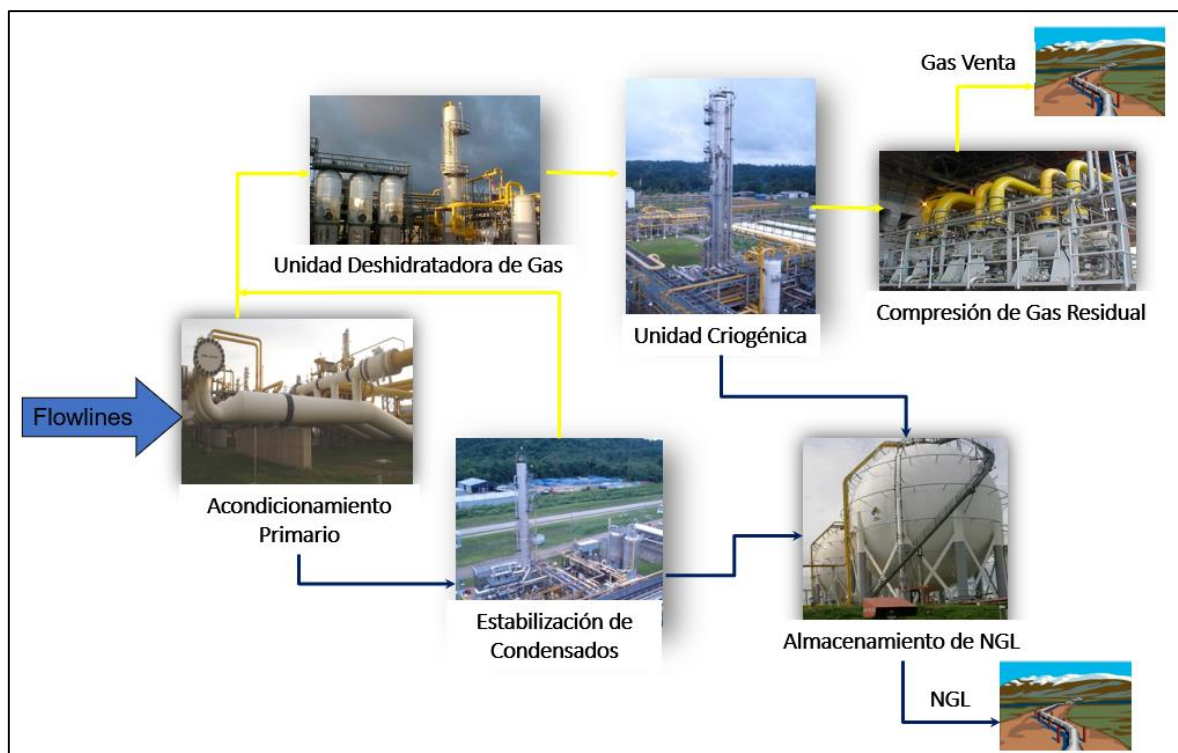
La planta de Malvinas inicio su operación con las unidades de acondicionamiento y procesamiento del gas húmedo para obtener gas residual (GN) y líquidos de gas natural (LGN). Finalmente, como producto residual se obtiene agua de producción que es dispuestos en pozos reinyectores de agua para cumplir con la normativa vigente medioambiental.

El esquema inicial de la Planta Malvinas contempló en 2004 diferentes sistemas de acondicionamiento y procesamiento de gas natural como se describen en la Figura 1, los cuales son:

- Acondicionamiento primario: Es el sistema donde se genera la separación primaria de gas húmedo del condensado y agua. Se utilizan los separadores de tipo dedo o *finger* también denominado *slugs catchers*.
- Tren criogénico: Un tren criogénico es una unidad de procesamiento de gas húmedo que contiene una unidad de deshidratación con glicol y tamices moleculares y una zona criogénica que comprende el uso del turbo expansor y de la torre de deetanizadora, donde se genera la separación del gas residual y líquidos de gas natural.
- Estabilización de condensados: Es el sistema que despoja los componentes ligeros del condensado a través de la separación física en una torre de estabilización. El líquido estabilizado pasa al sistema de deshidratación de condensado o CDU para ser llevado a venta posteriormente.
- Almacenamiento de NGL: Es el sistema que almacena el líquido de gas natural producido de las torres deetanizadoras y sistemas de estabilización para su posterior venta.
- Sistema de compresión de gas residual: Es el sistema que comprende el sistema de turbo compresores que permiten llevar el gas residual a las condiciones de presión requeridas para su venta y reinyección.

Figura 1

Esquema inicial de procesamiento en Planta de gas Malvinas



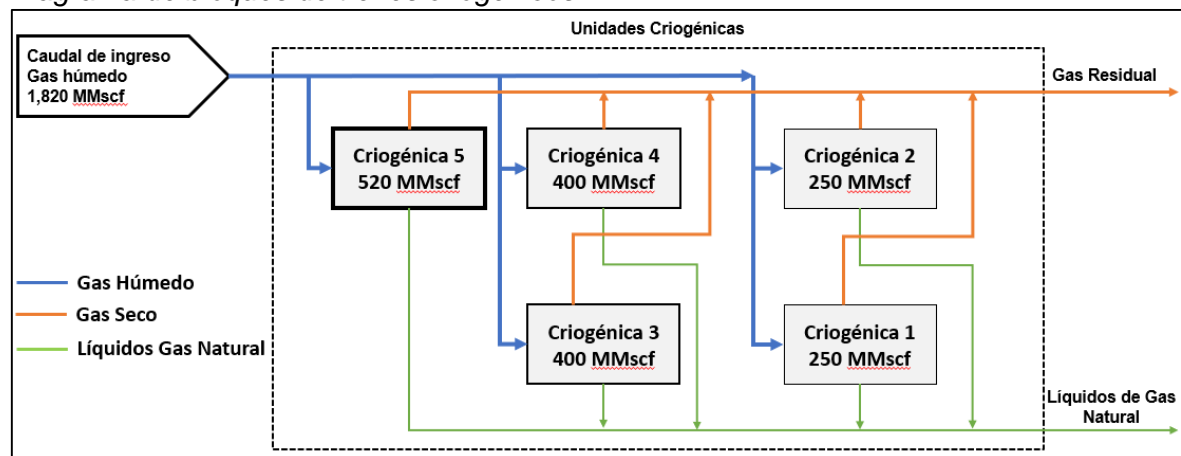
Fuente: *Elaboración propia en base a información histórica (PPC, 2004)*

En el año 2012, se culminó la segunda ampliación de la Planta de Gas Malvinas donde se instaló la unidad criogénica 5, la cual tiene una capacidad nominal de procesamiento de gas húmedo de 520 MMSCFD.

En la Figura 2, se muestra el diagrama de bloques de los 5 trenes criogénicos posterior a la segunda ampliación de Planta de Gas Malvinas.

Figura 2

Diagrama de bloques de trenes criogénicos



Fuente: Elaboración propia en base a información histórica (PPC, 2004)

Como se muestra en la Figura 2, posterior a la segunda ampliación la carga máxima total de la planta de Gas Malvinas para procesar gas húmedo es de 1820 MMSCFD. Dicha carga fue validada a través de pruebas operativas de optimización. En adición, para condiciones futuras se prevé ejecutar la prueba del tren criogénico 5 hasta una carga de 560 MMSCFD para tener una mejor flexibilidad del sistema de trenes criogénicos.

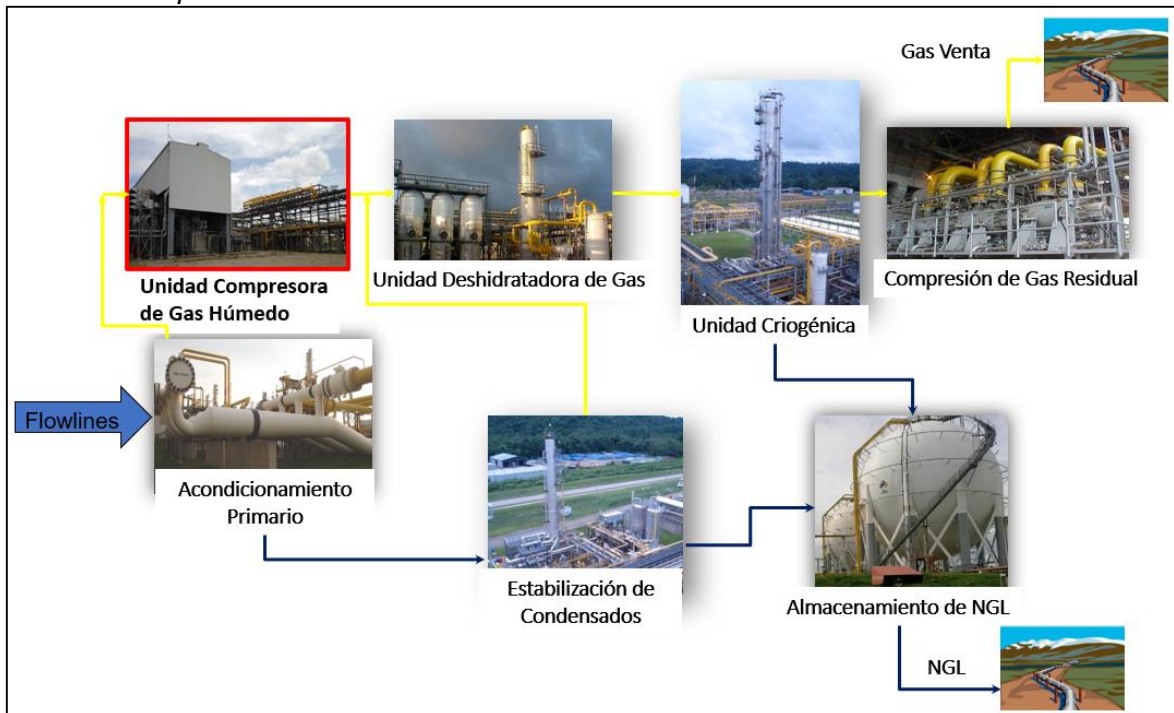
El incremento de procesamiento de gas húmedo en planta permitió capitalizar una mayor producción de gas residual y líquidos para su venta pero que a su vez, aceleró el proceso de depletación de los pozos productores de gas húmedo principalmente del Lote 88 y 56, por lo que en el año 2014 se puso en servicio el primer sistema de compresión de gas húmedo.

La unidad de compresión de gas húmedo que son de tipo centrífugo que permiten mantener la presión del gas húmedo proveniente de los pozos de Pagoreni a la llegada a la Planta de Gas Malvinas en un valor de 1300 psig a fin de no afectar las condiciones de

acondicionamiento primario y procesamiento de gas. En la Figura 3, se muestra el esquema actualizado de la Planta de Gas Malvinas considerando el sistema de compresión de gas húmedo.

Figura 3

Unidades de procesamiento inicial en Planta de Gas Malvinas



Fuente: Elaboración propia en base a información histórica (PPC, 2015)

En la operación normal de la unidad de compresión de gas húmedo de Pagoreni Y Cashiriari, la presión es incrementada de un valor de 350 psig y 900 psig a la succión de cada compresor respectivamente hasta una presión final común de 1300 psig a la descarga en el colector del gas húmedo de ingreso a los trenes criogénicos.

Debido a esta operación, la temperatura en la corriente de gas húmedo comprimido de ingreso a las criogénicas se incrementa de 110° hasta una temperatura de 125°F.

De acuerdo con el libro Data Book GPSA, a las condiciones de operación anteriormente descritas el gas húmedo se encuentra saturado en agua a 125°F y 1300 psig y posee un contenido de agua de 95 lbH₂O/MMSCF a la entrada de los trenes criogénicos (GPSA, 2004). Dicho contenido de humedad debe de ser retirado en las unidades de deshidratación de cada uno de los trenes criogénicos a fin de evitar problemas

operativos como la formación de hidratos en las líneas de procesamiento criogénico de gas.

Cada uno de los 5 trenes criogénicos cuenta con una unidad de deshidratación con glicol que fue diseñada para reducir el contenido de humedad a la salida de la contactora principal de TEG a un valor menor a las 7 lbH₂O/MMSCF.

En la deshidratación con tamices moleculares, el contenido de agua máxima de ingreso que pueden manejar estos adsorbentes es de 10 lbH₂O/MMSCF. Un adecuado proceso de deshidratación con tamices permite obtener a la salida un contenido de humedad equivalente o menor a -70°C de punto de rocío del agua en el gas.

De lo anterior, el diseño de deshidratación en serie de un sistema de TEG con un sistema de tamices moleculares plantea un margen de 3 lbH₂O/MMSCF entre el proceso de absorción y el proceso de adsorción para evitar problemas de saturación prematura en los tamices.

En la Tabla 2, se muestran las condiciones operativas estimadas de deshidratación de los 5 trenes criogénicos posterior a la instalación del compresor de gas húmedo instalado.

Tabla 2

Performance actual de deshidratación unidades de TEG 1 al 5

Tren criogénico	Caudal Gas (MMSCFD)	T. gas húmedo (°F)	Caudal TEG (gpm)	Humedad	
				Inicial	Final
				lbH ₂ O/MMSCF	
1 & 2	250	125	34	95	6.7
3 & 4	400	125	43.3	95	8.2
5	540	125	40	95	12.3

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC, 2019)

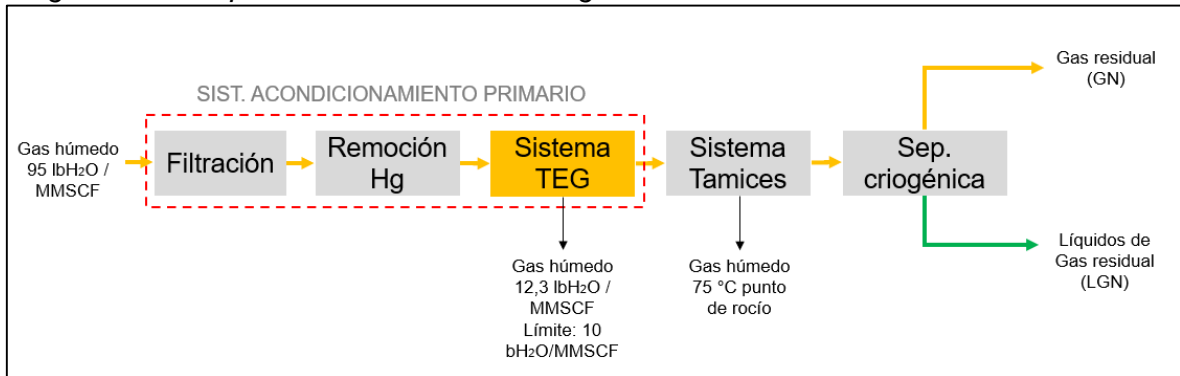
De acuerdo con la Tabla 2, para una temperatura de 125°F y un caudal de TEG pobre de 40 gpm, la humedad presente en el gas del tren criogénico 5 se reduce de 95 a 12,3 Lb agua/MMSCF, el cual es un valor superior a las 10 Lb agua/MMSCF de diseño al ingreso de los tamices moleculares.

En la Figura 4, se muestra el diagrama de bloques y la ubicación del sistema de deshidratación con TEG respecto del resto de sistema del tren criogénico 5 con el

contenido de humedad actual obtenido a través de las mediciones del método de Bureau Of Mines y el balance de agua correspondiente.

Figura 4

Diagrama de bloques subsistemas Tren criogénico 5



Fuente: Elaboración propia en base a (PPC, 2015)

Como se muestra en la Figura 4, el sistema de deshidratación con TEG reduce el contenido de humedad en el gas de 95 a 12,3 lbH₂O/MMSCF. Sin embargo, esta condición tiene una afectación importante en el sistema de deshidratación con tamices moleculares haciendo que estos se saturen más rápido y tengan que operar con un tiempo menor de adsorción para evitar el punto de rompimiento o Breakthrough de los mismos. Dicha condición incrementa la probabilidad de la formación de hidratos en la zona de separación criogénica, generando problemas operativos y un tiempo muerto o *downtime* del sistema no programado (PPC, 2021); (PPC, 2022).

Con el objetivo de controlar el incremento de humedad en el gas húmedo que ingresa hacia los tamices moleculares debido a la instalación del sistema de compresores de gas húmedo, se diseñó e instaló la nueva unidad de deshidratación de TEG con nueva tecnología y mayor capacidad en reemplazo del sistema de glicol existente a fin de deshidratar el gas húmedo a un valor menor a las 10 lb agua/MMSCF. ´

Para asegurar un adecuado rendimiento del nuevo sistema de deshidratación instalado, es necesario ejecutar la prueba de rendimiento o *Performance Test* para identificar su punto óptimo operativo con el fin de mantener el margen de deshidratación de dicho sistema respecto del sistema de deshidratación con TEG en un valor igual o superior a las 3 lbH₂O/MMSCF. Asimismo, identificar los costos operativos asociados y recomendaciones para la propia operación del sistema a dichas condiciones.

1.2 Descripción del Problema de Investigación

1.2.1 Problema General

La depletación de los pozos debido a la producción normal empieza a generar un cambio en las condiciones de producción del gas húmedo que están asociadas a una menor presión y mayor temperatura. Debido a esto, el gas húmedo tiene un mayor potencial de saturarse con vapor de agua y, por consiguiente, en el propio procesamiento de gas se genera un mayor contenido de humedad al ingreso principalmente del tren criogénico 5 que debe ser removido a fin de alcanzar un una humedad igual o menor a las 7 Lb agua/MMSCF.

Bajo esta necesidad, se decidió implementar un nuevo sistema de deshidratación con TEG que reemplazará a la unidad existente cuyos principales cambios son los siguientes:

- Instalar una columna Stahl que permita incluir gas de despojamiento o *stripping gas* en el proceso de regeneración del TEG pobre a fin de alcanzar un mayor grado de pureza por encima de los 98,6% wt (porcentaje en peso)
- Instalar bombas recíprocas de mayor capacidad junto con un tanque pulmón o *surge tank* para incrementar la capacidad de flujo de TEG utilizado en la contactora de TEG.

Una vez diseñada e instalada la nueva unidad, es necesario realizar una prueba de rendimiento o *Performance test* a fin de identificar el punto óptimo operativo de este sistema que permita asegurar un bajo contenido de humedad a la salida del gas deshidratado, así como estimar los costos operativos asociados.

El nuevo sistema de deshidratación se instaló completamente y listo para poner en servicio el 18/11/22. En ese sentido, es importante desarrollar un plan de arranque controlado en caliente, para realizar la transferencia de carga del sistema de glicol existente al nuevo sistema de glicol en operación. Posterior a ello, realizar el performance test para identificar el punto óptimo de operación que permita asegurar un gas deshidratado con contenido de humedad menor a las 7 lb agua/MMSCF a fin de mantener

el margen la deshidratación en los tamices moleculares, que, de acuerdo con su diseño, el máximo contenido de humedad que pueden admitir es de 10 lb agua/MMSCF.

¿Cómo reducir un elevado contenido de humedad en el gas húmedo a través de una nueva unidad de deshidratación con TEG de la unidad criogénica 5 con las condiciones de operación optimizadas a fin de evitar problemas operativos en los tamices moleculares como el *Breakthrough* y formación de hidratos en la unidad criogénica 5?

En adición, se requiere identificar el punto óptimo operativo para optimizar los costos de consumo de glicol, consumo de filtros y un menor número de maniobras operativas para la operación normal.

1.2.2 Problemas Específicos

- ¿Cuáles son las variables operativas que pueden ajustarse en el nuevo patín de deshidratación con TEG con el fin de modificar el contenido de humedad en el gas húmedo deshidratado a las condiciones esperadas de proceso?
- ¿Cuál es el punto óptimo de operación de la nueva unidad de deshidratación con TEG de la unidad criogénica 5, considerando los parámetros de calidad y caudal total de TEG?
- ¿Cuál es el nuevo costo operativo de la nueva unidad de deshidratación con TEG de la unidad criogénica 5 considerando las pérdidas de glicol estimadas o Teg Losses y costos asociados de consumibles?

1.3 Objetivos del Estudio

1.3.1 Objetivo General

Evaluar y realizar ajustes operativos en la nueva unidad de deshidratación con TEG de la unidad criogénica 5 a fin de asegurar una adecuada deshidratación del gas húmedo para que pueda alcanzar un contenido de humedad igual o menor a las 7 Lb agua/MMSCF.

1.3.2 **Objetivos Específicos**

- Evaluar el funcionamiento del nuevo patín de deshidratación con TEG e Identificar las variables operativas que afecten directamente al contenido de humedad final alcanzado en el gas húmedo de la unidad criogénica 5.
- Desarrollar la prueba de rendimiento de *Performance Test* del nuevo patín de deshidratación con TEG para identificar el punto óptimo operativo considerando parámetros de calidad y caudal de TEG, en la nueva unidad de deshidratación con TEG de la unidad criogénica 5.
- Estimar el costo operativo según las condiciones óptimas alcanzadas en la nueva unidad de deshidratación con TEG de la unidad criogénica 5, considerando pérdidas de glicol y costos de consumibles.

1.4 **Justificación de la investigación**

El sistema de deshidratación con glicol es uno de los sistemas principales utilizados en el procesamiento de gas a nivel mundial debido a que uno de los contaminantes que siempre va a estar presente en el gas en diferentes proporciones es la humedad o el contenido de agua.

De acuerdo con la GPSA, típicamente un sistema de deshidratación con glicol convencional puede alcanzar una pureza de TEG pobre en el orden de los 98,4 – 98,8% wt y permite remover alrededor del 85 – 88% de la humedad total presente en el gas húmedo producido de los pozos de producción, previo paso por el sistema de separación primaria.

1.5 **Antecedentes referenciales**

A. Diseño de unidades de deshidratación de glicol que utilizan columnas Stahl con gas de despojamiento

Los dos pilares de la deshidratación de gas utilizan glicol o tamiz molecular como desecantes. La deshidratación con glicol es un proceso mucho más común, con un estimado de más de 20 000 unidades instaladas actualmente. Si bien la deshidratación con glicol tiene una presencia dominante en la industria del *Oil & Gas*, la deshidratación con tamices moleculares se convierte en un proceso necesario sobre todo en procesos

donde se opera a condiciones criogénicas donde se pretende evitar problemas operativos por presencia de humedad como la formación de hidratos.

El primer documento presentado respecto de temas de deshidratación en la primera Conferencia de acondicionamiento de gas en 1952 dejó en claro que la deshidratación de gas natural con glicol puede tener éxito "si el gas se va a deshidratar para cumplir con las necesidades normales de transporte a través de tuberías", que por lo general tiene una especificación de humedad de 7 Lb agua/MMSCF gas procesado.

Este artículo también dejó en claro que los desecantes de lecho como los tamices moleculares se utilizan para lograr un "gas completamente seco". Aunque el avance en el uso de los tamices moleculares en aquel entonces no estuvo disponible para uso comercial inicialmente, los desecantes de lecho seco de esa época, como el gel de sílice, ya eran los preferidos para las especificaciones de deshidratación más severas.

Una vez que el tamiz molecular había sido perfeccionado alrededor del periodo de 1985, se convirtió en el único desecante utilizado para especificaciones criogénicas.

Mientras tanto, continuaron los avances en la tecnología de deshidratación de glicol. De estos, el desarrollo de la columna Stahl ha sido el más exitoso en mejorar la eliminación de agua de glicol a valores menores a 7 lb agua /MMSCF. Fue desarrollado en 1957 con una patente otorgada a Willi Stahl. El principio de operación consiste en que el glicol que sale del rehervidor entre en contacto a contracorriente con el gas de despojamiento o *stripping gas* dentro del columna Stahl. El gas de despojamiento sube en la columna Stahl en contacto íntimo con el glicol que desciende a través de la columna con un contenido de humedad que es absorbida por el gas de despojamiento, generando una calidad de TEG pobre superior a la obtenida únicamente por el proceso de evaporación de agua en el rehervidor (Carmody, 2020).

B. Optimización de la deshidratación de gas natural con trietilenglicol

La deshidratación con trietilenglicol (TEG) se usa ampliamente en el procesamiento de gas natural para evitar la corrosión y taponamiento de las líneas de flujo para el transporte de gas.

La optimización de uno sistema de glicol utilizando el simulador Aspen HYSYS y la herramienta de optimización es utilizada para minimizar el costo de procesamiento considerando diferentes conjuntos de parámetros:

- Circulación de caudal de TEG
- Número de platos teóricos (en el absorbedor y en la columna de gas de arrastre)
- Presión del gas de alimentación y temperatura
- Tasa de flujo de gas de despojamiento
- Nivel de precio del gas

Además del punto de rocío típico obtenido por el resultado a través de simulación de procesos en otras publicaciones referentes a sistemas de deshidratación, la presente investigación también proporciona datos sobre los costos de la operación del patín de glicol.

Los resultados obtenidos están basados en el estudio de optimización de criterios de rendimiento para el diseño y condiciones óptimas de operación para la deshidratación (Chebbi et al., 2019).

C. Optimización de la absorción efectiva durante el gas natural húmedo por deshidratación por trietilenglicol

La deshidratación efectiva del gas húmedo para venta es una de las principales preocupaciones de las empresas en el sector de producción de hidrocarburos o *Upstream* antes de su transmisión por tuberías de larga distancia. El sistema de deshidratación más común y eficiente se basa en la absorción a contracorriente por TEG (Trietilenglicol). Este artículo detalla y se enfoca principalmente en los problemas que generalmente ocurren durante el proceso de deshidratación y regeneración del glicol.

En un proceso de identificar el punto óptimo operativo de un sistema de deshidratación de TEG problemático e inestable, este artículo describe algunos problemas comunes, como la tasa de circulación de TEG inapropiada, la deposición de material ceroso en los empaques de la columna, mayor contenido de hidrocarburos en el TEG rico, pérdidas asociadas de TEG o *Teg Losses* y las soluciones han sido discutidas con resultados.

Se ha utilizado un simulador para conocer teóricamente algunos resultados. Finalmente se realizan algunas recomendaciones para evitar problemas adicionales en la deshidratación con el uso de absorbentes (Khan & Maruf, 2012).

D. El impacto de la velocidad de flujo del gas de extracción en las pérdidas de trietilenglicol de Unidad de Regeneración de Glicol: Estudio de Simulación

El gas natural se puede considerar como uno de los combustibles fósiles más importantes que se consume cada vez más en todo el mundo. Es un combustible de alto poder calorífico cuya orden varía en función de la composición de este. Sin embargo, el gas natural sin refinar producido a partir de los depósitos profundos puede contener algunas impurezas, incluidos compuestos de azufre y nitrógeno, así como vapor de agua.

La presencia de estos compuestos indeseables puede generar problemas como la corrosión y contaminación ambiental, por lo que es necesario removerlos o reducirlos a un valor aceptable para minimizar o eliminar esas impurezas de las corrientes de gas natural.

El trietilenglicol (TEG) con pureza de 99% en peso se utiliza normalmente para reducir el contacto con el vapor de agua a menos de 1 ppm. De hecho, las purezas de glicol de hasta 99,9% en peso pueden lograrse mediante el uso de gases de extracción que incluyan nitrógeno o gas de despojamiento.

Sin embargo, las pérdidas de glicol están detrás de algunos problemas técnicos en el proceso de deshidratación. La investigación tiene como objetivo simular el proceso de deshidratación de gas húmedo utilizando el simulador de proceso Aspen HYSYS. El efecto de la tasa de extracción de nitrógeno en las pérdidas de TEG de la torre del regenerador de glicol, % en peso pobre de TEG y el contenido de agua en el gas seco natural fueron investigados y correlacionados. El diseño del sistema de deshidratación en evaluación fue simulado adecuadamente para lograr una reducción en el contenido de agua de gas natural a menos de 0,1 ppm (Ibrahim et al., 2017).

CAPÍTULO II. Marco teórico y conceptual

2.1 Punto de rocío

Se denomina punto de rocío a la condición de presión y temperatura en la cual se genera la primera gota de agua condensada en un líquido. Al reducir el punto de rocío por un proceso de deshidratación, por ejemplo, incluimos el concepto de depresión de punto de rocío.

La depresión del punto de rocío es la diferencia entre el punto de rocío original y el punto de rocío alcanzado al remover un contenido de vapor de agua del gas o hidrocarburo. En otras palabras, es el contenido de agua que debe ser removida del gas natural para alcanzar un objetivo de deshidratación específico, por ejemplo, entrar en especificaciones para vender el gas (Stewart, 2011).

2.2 Contenido de humedad en el gas

El gas producido por los pozos de producción puede contener diversos tipos de contaminantes entre los que se encuentra el azufre, mercurio, sólidos libres y vapor de agua. Este último debe de ser removido para evitar problemas operativos durante el procesamiento y transporte de gas como la formación de hidratos.

La capacidad de una corriente gaseosa para contener vapor de agua puede variar de acuerdo con los siguientes aspectos:

- Es función de la composición del gas
- Afectado por la presión y temperatura del gas
- Es reducida a medida que el gas es comprimido o enfriado

Cuando un gas ha absorbido el límite de su capacidad de vapor de agua para una condición específica de presión y temperatura, se dice que el gas se encuentra saturado. Cualquier contenido de agua adicionado al sistema de gas no podrá mantenerse en estado vapor y pasará al estado líquido.

Los métodos para determinar el contenido de agua son:

1. Presión parcial y correlaciones de fugacidad

Se aplica la ley de Raoult de presión parcial para el agua, de acuerdo con la siguiente Ecuación 1:

$$Y_w = P_v X_w \quad (1)$$

Siendo:

Y_w = Fracción molar del agua en la fase vapor

P_v = Presión de vapor del agua a la temperatura del sistema

X_w = Fracción molar del agua en la fase líquida = 1. Se considera que la fracción del líquido puede ser la unidad debido a la inmiscibilidad de las fases líquidas. Asimismo, el rango de aplicación de la ecuación es para gases ideales y se recomienda su uso para sistemas con presión de hasta 60 psia (Stewart, 2011).

2. Correlaciones empíricas de contenido de agua P y T

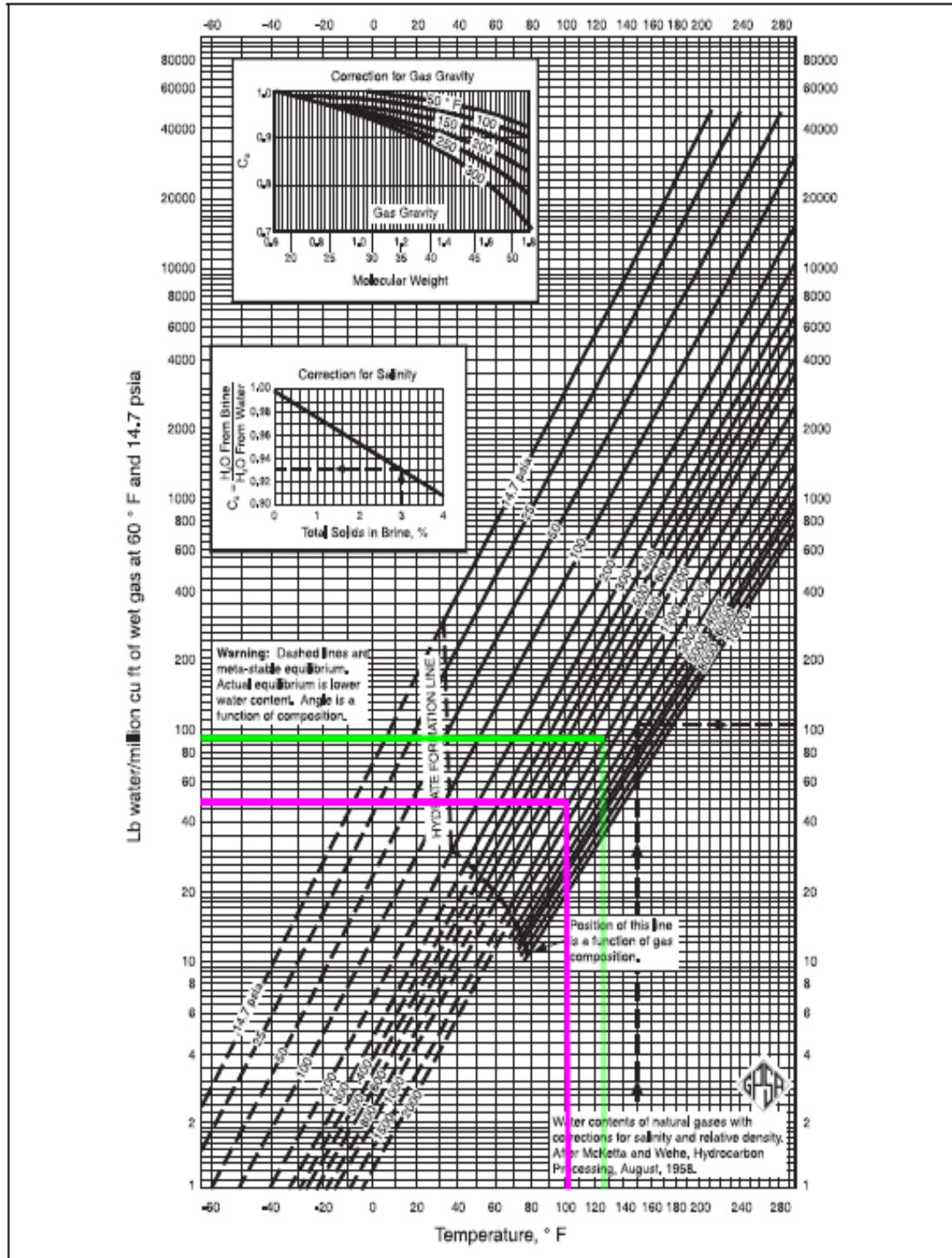
Las correlaciones empíricas de contenido de agua están orientadas a la evaluación de un gas natural teóricamente limpio. En este tipo de gráfico se dibuja el contenido de humedad (w) vs Presión y Temperatura (T), donde el contenido de agua representado es el máximo contenido de agua que el gas puede contener a dichas condiciones.

Existen diferentes correlaciones para determinar el contenido de agua en una corriente gaseosa. La correlación de McKetta y Wehe provee de resultados satisfactorios para la mayoría de las aplicaciones donde el gas es un hidrocarburo limpio y contiene un contenido de metano superior al 70%.

El margen de error de esta correlación empírica es de $\pm 5\%$ para un caso ideal. Asimismo, el margen de error empieza a aumentar cuando el contenido de H_2S y CO_2 en el gas aumenta. De esto, es buena práctica aplicar factores de corrección cuando se cuente un bajo contenido de contaminantes o baja presión.

Figura 5

Estimación de contenido de agua en el gas por correlación McKetta y Wehe



- Condiciones Iniciales
- Condiciones Actuales

Fuente: Elaboración propia en base a (GPSA, 2004)

En la Figura 5, se grafica en color morado las condiciones iniciales del gas húmedo al ingreso a planta descritas en la

Tabla en donde se indica que la presión es 1,300 psig y temperatura de 100°F la humedad resultante es de 49 lbH₂O/MMscf y en color verde las condiciones actuales del gas húmedo al ingreso a planta luego de la implementación del sistema de compresión son presión 1,300 psig y temperatura 125°F resultando con una humedad de 95 lbH₂O/MMscf; con esto de evidencia un cambio en la saturación del gas húmedo de ingreso a planta.

Asimismo, existen otras correlaciones que pueden ser utilizadas también para la estimación de humedad en el gas como la correlación de Sharma o la correlación SRK, la cual es aplicada para gases agrio (Stewart, 2011).

2.3 Hidratos de gas natural

Los hidratos de gas natural son estructuras compuestas por moléculas de agua atrapadas en una estructura cristalina de hidrocarburos que se acumulan en las líneas de flujo de gas, válvulas choque, instrumentación generando problemas operativos de taponamiento. Los hidratos pueden tener la siguiente formación estructural:

- Agua, metano y propano
- Agua, metano y etano

La apariencia física de los hidratos responde a un tipo de nieve húmeda que es atrapada y retenida en alguna restricción física del transporte o procesamiento de gas que, a medida que es expuesta a un diferencial de presión, se genera una estructura sólida similar a la nieve compacta.

Para se generen hidratos, se requiere los siguientes parámetros:

- Presión y temperatura
- Contenido de agua libre

Para prevenir la formación de hidratos, se puede realizar los siguientes parámetros:

- Añadir calor al sistema
- Reducir la temperatura de formación de hidratos con inhibidores de corrosión

- Deshidratar el gas natural a fin de eliminar la posibilidad de formar condensado de agua
- Incluir en el diseño de procesos un sistema de calentamiento para derretir hidratos en puntos específicos

2.4 Deshidratación

La deshidratación es el proceso por el cual se remueve el contenido de humedad de una corriente de gas (Stewart, 2011). Los 2 procesos más comunes para deshidratar el gas natural son:

- Absorción
- Adsorción

2.4.1 Absorción

En el proceso de absorción, el contenido de humedad en el gas es removido a través del uso de un líquido higroscópico. Dentro de los líquidos higroscópicos más comunes utilizados en la deshidratación con glicol es el TEG y el metanol. En la Tabla se muestra las propiedades físicas del metanol y diferentes tipos de glicoles.

Tabla 3

Propiedades físicas de los inhibidores de humedad

Propiedades	Metanol	Etilenglicol	Dietilenglicol	Trietilenglicol	Tetraetilenglicol
Peso molecular	32,04	62,1	106,1	150,2	194,2
Punto evaporación a 760 mmHg, °F	148,1	387,1	427,6	532,9	597,2
Presión de vapor a 77°F, mmHg	94	0,12	<0,01	<0,01	<0,01
Gravedad específica a 77°F	0,7868	1,11	1,113	1,119	1,12
Libras por galón a 77°F	6,55	9,26	9,29	9,34	9,34
Punto de congelamiento, °F	-144	8	17	19	22
Punto flash, °F	0	240	280	320	365
Temperatura de descomposición, °F	0	329	328	404	460
Calor de vaporización a 14,65 psi, Btu/Lb	473	364	232	179	-

Fuente: Elaboración propia en base a (Stewart, 2011)

En el proceso de absorción de la humedad en el gas, se utiliza un líquido higroscópico para remover el vapor de agua en contacto directo. De acuerdo con la Tabla 3. El líquido desecante más común es el glicol, básicamente por su resistencia térmica

alrededor a los 400°F que permite desarrollar un sistema de deshidratación con glicol con un rehervidor que pueda operar alrededor de esa ventana operativa.

El proceso reversible a la absorción es el despojamiento o *stripping*, que consiste en que el agua es transferida a la fase gaseosa. También se puede utilizar los términos regeneración o reconcentración debido a que el solvente es devuelto a sus condiciones iniciales de calidad para su reutilización.

2.4.2 Adsorción

El proceso de deshidratación por adsorción de un gas (o un hidrocarburo líquido) se realiza con una sustancia sólida.

La adsorción es un fenómeno físico que ocurre cuando las moléculas de un gas se ponen en contacto con una superficie sólida y algunos de estas moléculas condensan en la superficie. La deshidratación como tal de la humedad del gas es un proceso en el que las moléculas de agua son retenidas preferentemente por el desecante y eliminado de la corriente de gas.

La adsorción implica una forma de adhesión entre la superficie del desecante sólido y el vapor de agua en estado gaseoso. El agua forma una fina película que se adhiere a la superficie del desecante por las fuerzas de atracción, mas no por reacción química.

El desecante es un medio deshidratante de carácter sólido granulado con una gran superficie efectiva de adsorción (gran número de pequeños poros) por unidad de peso. Los desecantes más comunes son los sólidos:

- Alúmina
- Sílica Gel
- Tamices moleculares

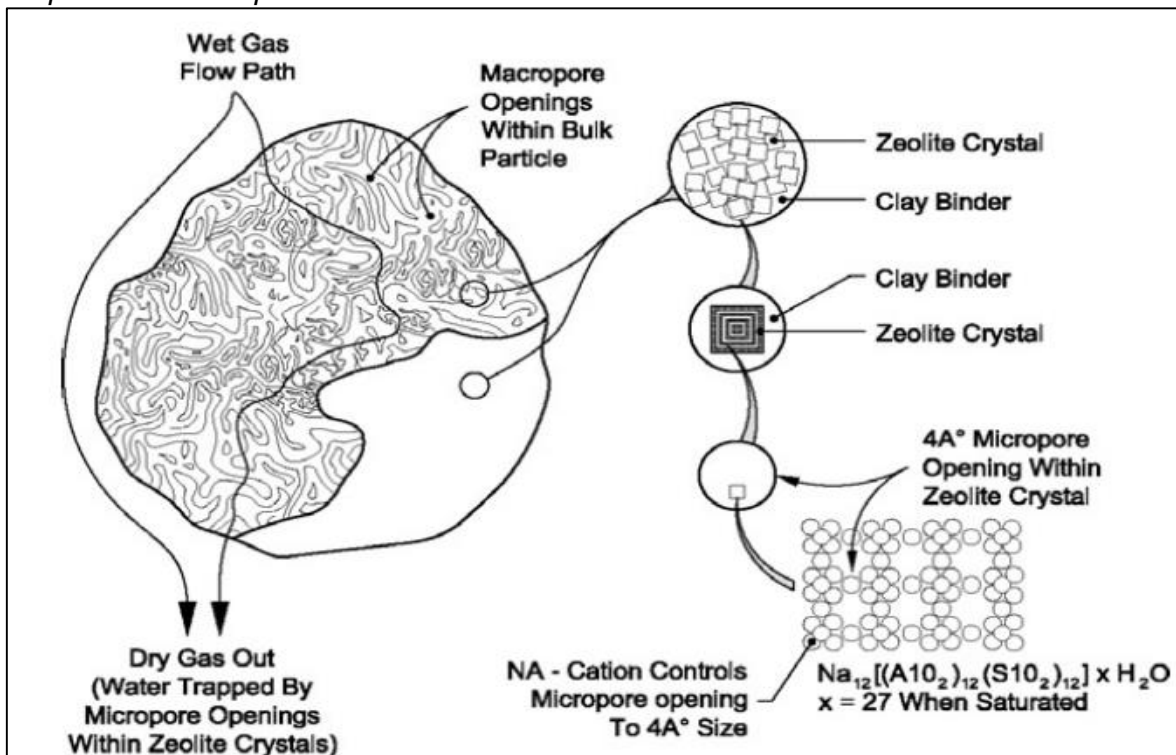
El proceso para obtener el equilibrio en una pequeña área de superficie activa de un desecante sigue la siguiente secuencia:

- Algunas moléculas de gas que pasan por la superficie activa condensarán en la superficie por las fuerzas de atracción.
- Después de un tiempo finito, la molécula puede adquirir suficiente energía para liberarse y ser reemplazada por otra molécula.
- Después de un tiempo suficiente, se alcanzará un estado de equilibrio donde el número de moléculas que salen de la superficie será igual a las que ingresa.
- El número de moléculas de gas que se encuentra en la superficie es función de:
 - La naturaleza del adsorbente y la naturaleza de la molécula adsorbida
 - La temperatura del sistema y la concentración del adsorbato en la superficie del adsorbente.

En la Figura 6, se muestra el detalle de una partícula de tamiz molecular haciendo énfasis en los

Figura 6

Ampliación de una partícula de tamiz molecular



Fuente: (Stewart, 2011)

El proceso reversible de la adsorción se da bajo los mismos principios que la desorción del agua en el proceso de absorción, de acuerdo con la Tabla 4.

Tabla 4*Condiciones de adsorción y desorción de la humedad en el tamiz*

Proceso	Condiciones de presión	Condiciones de temperatura
Adsorción	Alta presión	Baja temperatura
Desorción	Baja presión	Alta temperatura

*Fuente: Elaboración propia en base a (Stewart, 2011)***2.5 Deshidratación con tamices moleculares**

Los tamices moleculares o zeolitas son compuesto aluminosilicatos aluminio metálicos con una estructura de la forma $M_{x/n}[(AlO_2)_x(SiO_2)_y]zH_2O$, donde n es el estado de valencia del catión y M es el ion metálico de cada estructura aluminio silicatada.

La zeolita es una estructura tetraedro tridimensional de sílica y alúmina. El tetraedro de alúmina tiene una carga negativa y necesita ser balanceado positivamente con el Na^+ .

La forma estructural del octaedro puede ser de 2 tipos y presenta diferentes tipos de tamaño poral en función de los elementos positivos de acuerdo con la Tabla 5 (Mokhatab, 2015).

Tabla 5*Tamaño poral de tamices en función del tipo de zeolita*

Tipo de Zeolita	Catión	Tamaño poral nominal (Å = $10^{-10}m$)	Tamaño poral medido (Å = $10^{-10}m$)
A	K	3	3,3
	Na	4	3,9
	Ca	5	4,3
X	Na	10	7,4 – 12,5

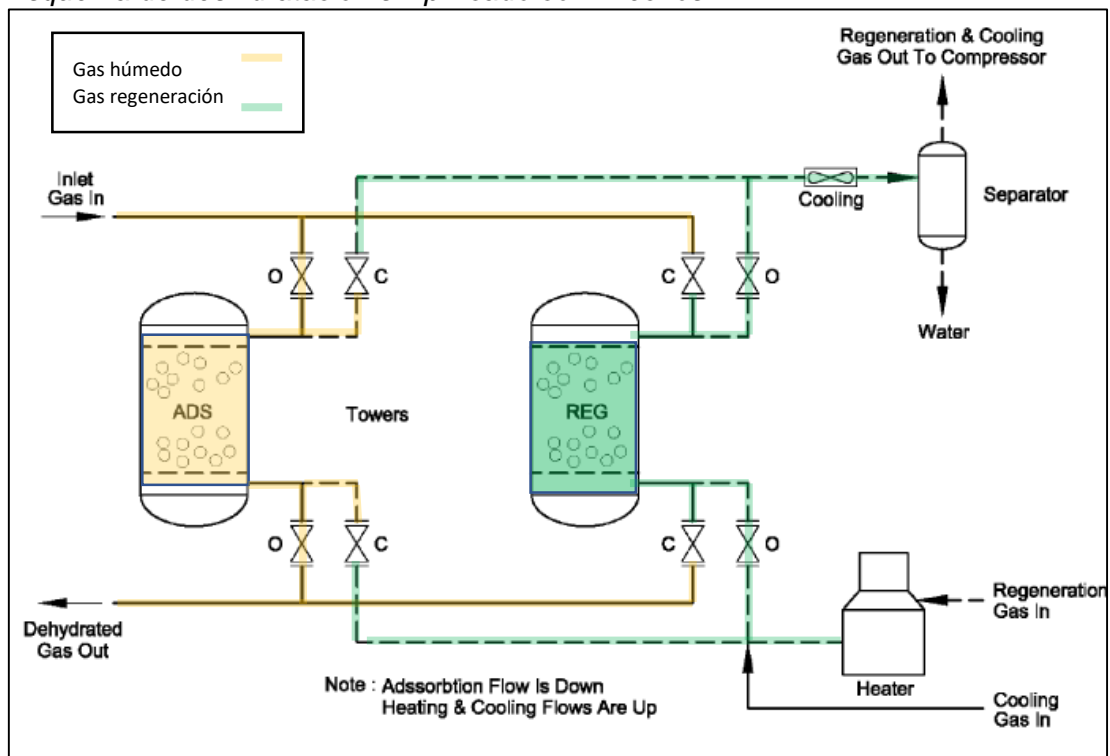
Fuente: Elaboración propia en base a (Mokhatab, 2015)

El principio de deshidratación con tamices moleculares es un proceso intermitente o *batch* con múltiples camas desecantes utilizadas en procesos cíclicos de operación para deshidratar el gas de manera continua. El número de lechos desecantes puede variar desde 2 en adelante.

En la Figura 6, se muestra un esquema simplificado del diagrama de flujo de 2 lechos desecantes solidos con tamices moleculares para deshidratar el gas húmedo.

Figura 7

Esquema de deshidratación simplificado con 2 lechos



Fuente: Elaboración propia en base a (Stewart, 2011)

De acuerdo con la Figura 7, se muestra que uno de los lechos se encuentra en proceso de adsorción y el otro se encuentra en proceso de regeneración. Asimismo, el alineamiento y secuencia de válvulas permite operar de manera continua dicho sistema de tal manera que para el proceso de adsorción se adsorba humedad a alta presión y baja temperatura mientras que para el proceso de regeneración se desorba la humedad de los lechos adsorbentes a baja presión y alta temperatura.

Para desarrollar este proceso de manera continua, en la secuencia de deshidratación se ejecuta 3 etapas de operación:

- Etapa de adsorción o deshidratación del gas
- Etapa de calentamiento o regeneración de los tamices
- Etapa de enfriamiento o enfriamiento de los tamices

El vapor de agua obtenida del proceso de regeneración de los tamices es separado y llevado a un sistema de tratamiento de agua residual para su disposición.

La operación con tamices moleculares tiene diferentes ventajas y desventajas descritos en la Tabla 6.

Tabla 6

Ventajas y desventajas del uso de tamices moleculares

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Se puede obtener puntos de rocío bajo o contenido de humedad equivalente menor a 1 ppm • Tiene margen para operar a temperaturas altas • Se adapta al cambio e incremento de cargas 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo inicial • Es un proceso no continuo o <i>batch</i>. Requiere como mínimo 2 lechos en paralelo • El desecante es sensible a envenenamiento o contaminantes presentes en el gas como glicol.

Fuente: Elaboración propia en base a (Stewart, 2011)

Asimismo, las variables que afectan al proceso de adsorción se describen a continuación:

- Calidad del gas húmedo
- Temperatura y presión
- Tiempo de cada ciclo de adsorción
- Velocidad del gas
- Fuente del gas de regeneración
- Selección del desecante
- Consideraciones de caída de presión en lecho empacado
- Presencia de CO₂, hidrocarburos pesados, componentes azufrados. Hay que considerar que cuanto mayor sea el peso molecular del componente del gas, mayor potencial de adsorción tendrá.

2.6 Punto de rompimiento o Breakthrough

Durante el proceso de adsorción de humedad en el gas, el lecho adsorbente puede dividirse en 3 zonas de acuerdo con la altura del recipiente que contiene al tamiz:

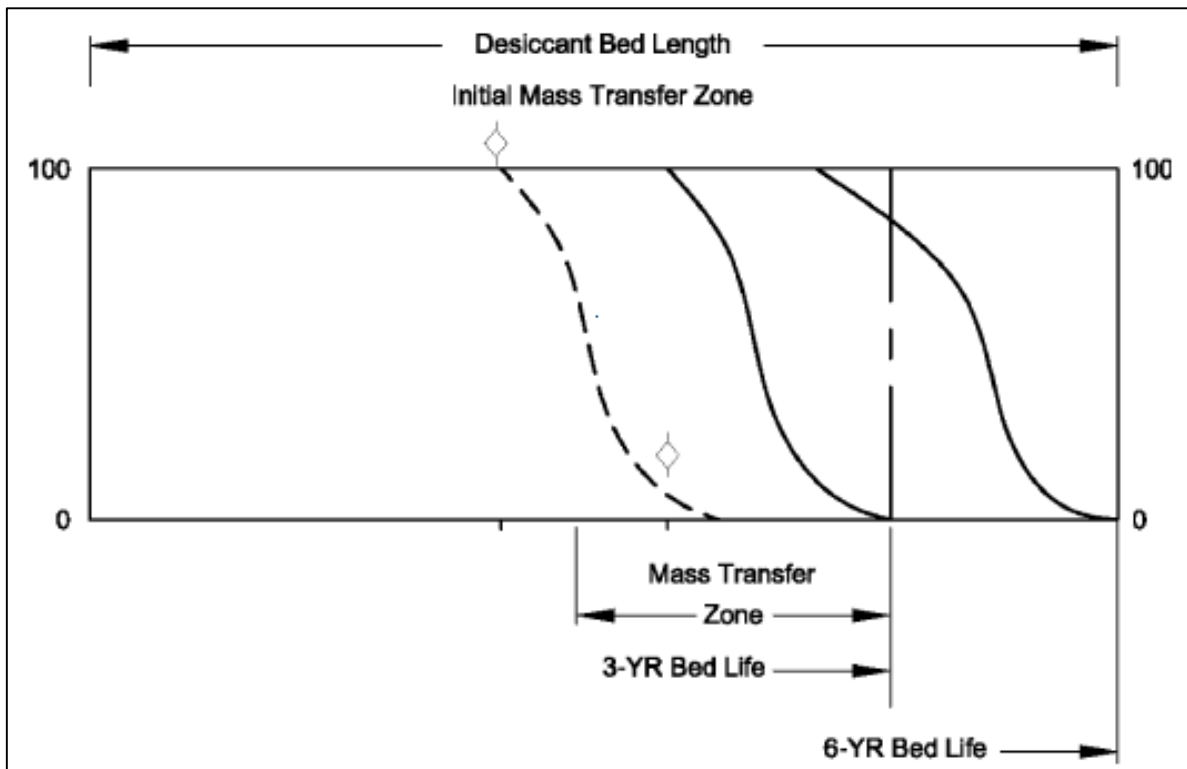
- La zona superior es llamada zona de saturación o zona de equilibrio. En esta zona, el desecante se encuentra en equilibrio con el gas húmedo.
- La zona media o zona de transferencia de masa o *mass Transfer Zone, MTZ*) es donde el contenido de agua en el gas se reduce a una concentración < 1 ppm.

- La zona inferior se encuentra el desecante que no ha sido utilizado y se conoce como zona activa.

En la Figura 8, se muestra un esquema de la zona de transferencia de masa de un lecho respecto de su longitud.

Figura 8

Zona de transferencia de masa en un lecho adsorbente



Fuente: (Stewart, 2011)

De acuerdo con la Figura 8, se muestra que la zona de transferencia de masa tiene una ubicación inicial y esta se desplaza hacia la derecha en función del tiempo de uso sé que le da al lecho adsorbente como tal.

Si el lecho opera por un periodo muy largo de adsorción, la zona de transferencia de masa se empieza a desplazar hacia la zona inferior del lecho causando un fenómeno denominado *Breakthrough* o punto de rompimiento.

En el punto de rompimiento o también llamado *Breakthrough*, el contenido de agua a la salida del gas empieza a incrementar y eventualmente se obtendrá un contenido de

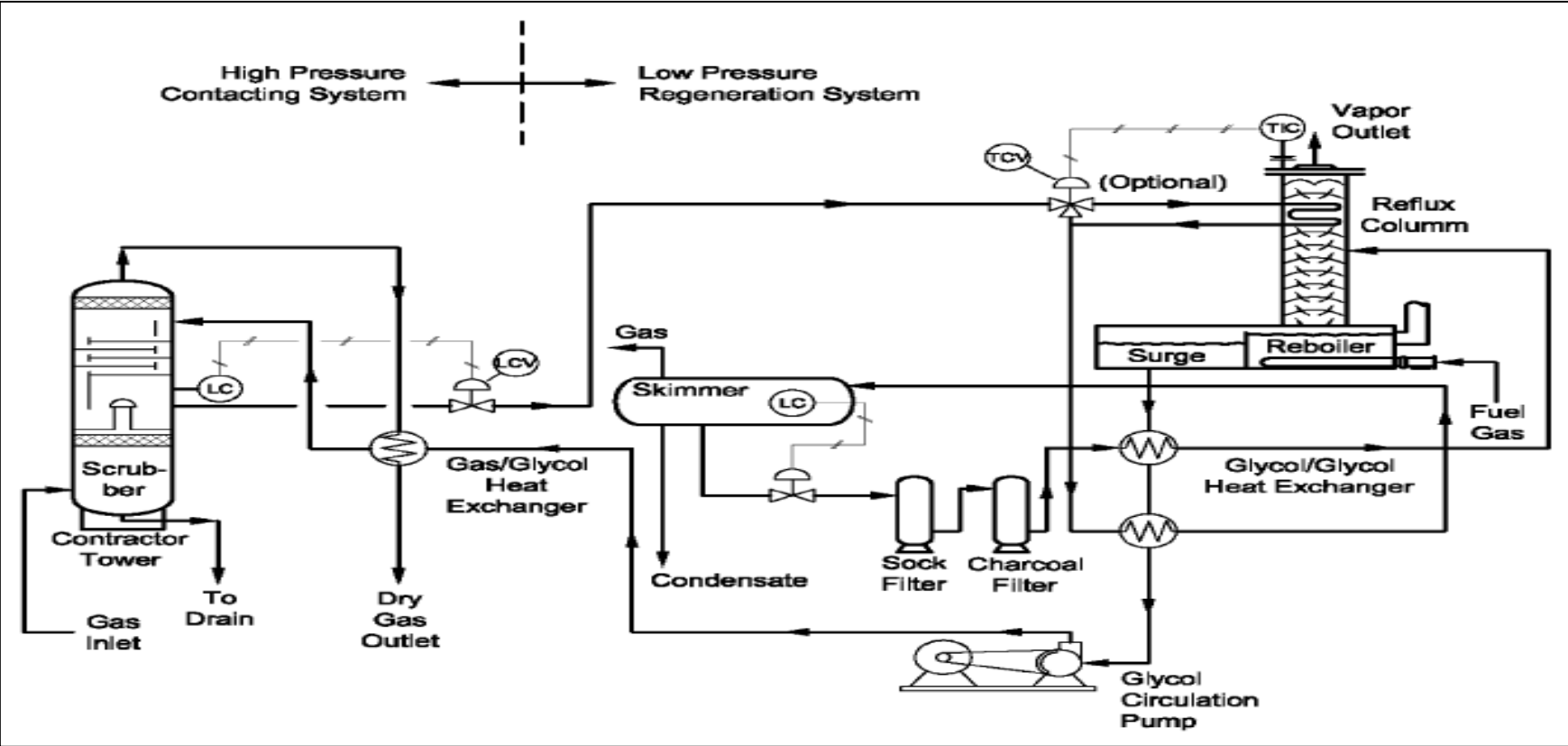
humedad similar a las condiciones de ingreso cuando la zona de transferencia de masa se haya desplazado completamente.

2.7 Deshidratación con TEG

El sistema de deshidratación con TEG tiene por objetivo reducir el contenido de humedad en el gas a un valor promedio menor a las 8 lb agua /MMSCF. En la Figura 9 se muestra un esquema general del sistema de deshidratación con TEG convencional.

Figura 9

Esquema de sistema de deshidratación con TEG



Fuente: (Stewart, 2011)

De acuerdo con la Figura 9, se muestran los diferentes equipos que participan en el proceso de regeneración del TEG para reestablecer los parámetros de calidad del glicol a fin de que esta corriente pueda retornar nuevamente al proceso de deshidratación para cumplir su proceso.

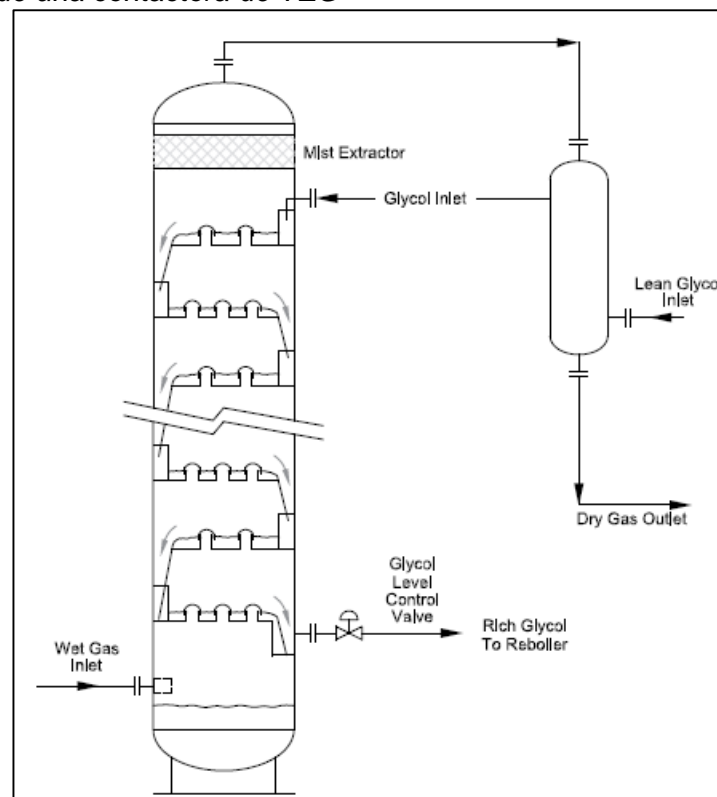
A continuación, se describe las propiedades y características de los equipos principales de un sistema estándar de deshidratación con TEG:

2.7.1 **Contactora principal**

La función principal de la contactora de glicol es disminuir la cantidad de vapor de agua en el flujo de gas húmedo mediante la interacción directa y en sentido opuesto con el glicol a una baja concentración de agua o alta pureza (>98,8% %wt). El glicol pobre o regenerado entra desde la parte superior de la contactora mientras que el gas húmedo asciende desde el fondo, como se ilustra en la Figura 10 (Stewart M. 2011).

Figura 10

Esquema típico de una contactora de TEG



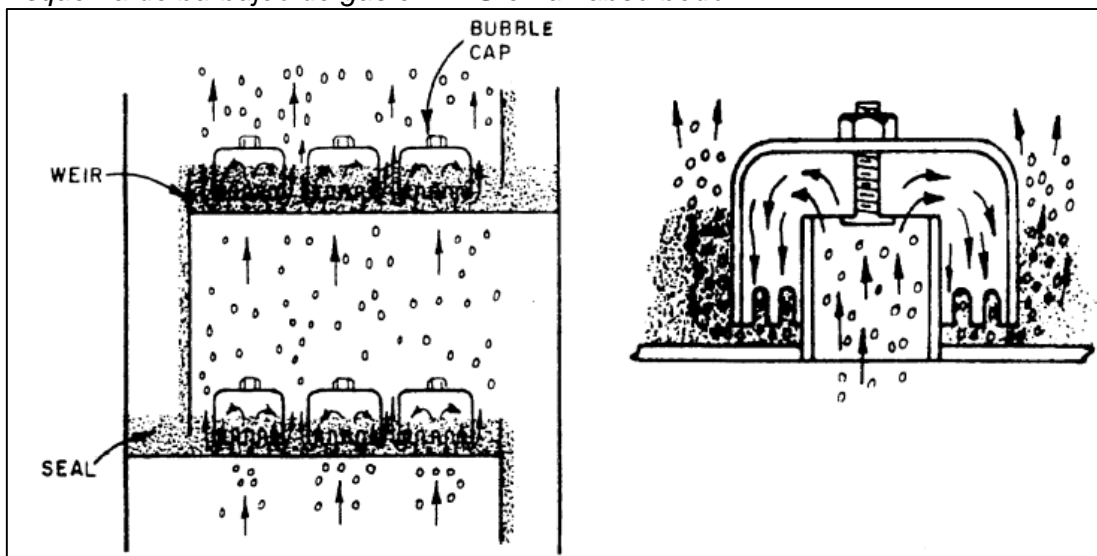
Fuente: (Stewart, 2011)

El gas húmedo ingresa al contactor de gas cerca del fondo del recipiente. El interior del contactor puede contener platos con varias bandejas con vertederos que mantienen un nivel específico de glicol para que el gas burbujee a través del glicol a medida que el gas fluye hacia arriba.

A medida que el gas húmedo pasa hacia arriba a través de cada bandeja siguiente, se transfiere vapor de agua al glicol y se torna progresivamente en un gas más seco en humedad. En la Figura 11, se muestra un esquema general del burbujeo de gas en glicol pobre en una contactora de TEG con platos.

Figura 11

Esquema de burbujeo de gas en TEG en un absorbedor



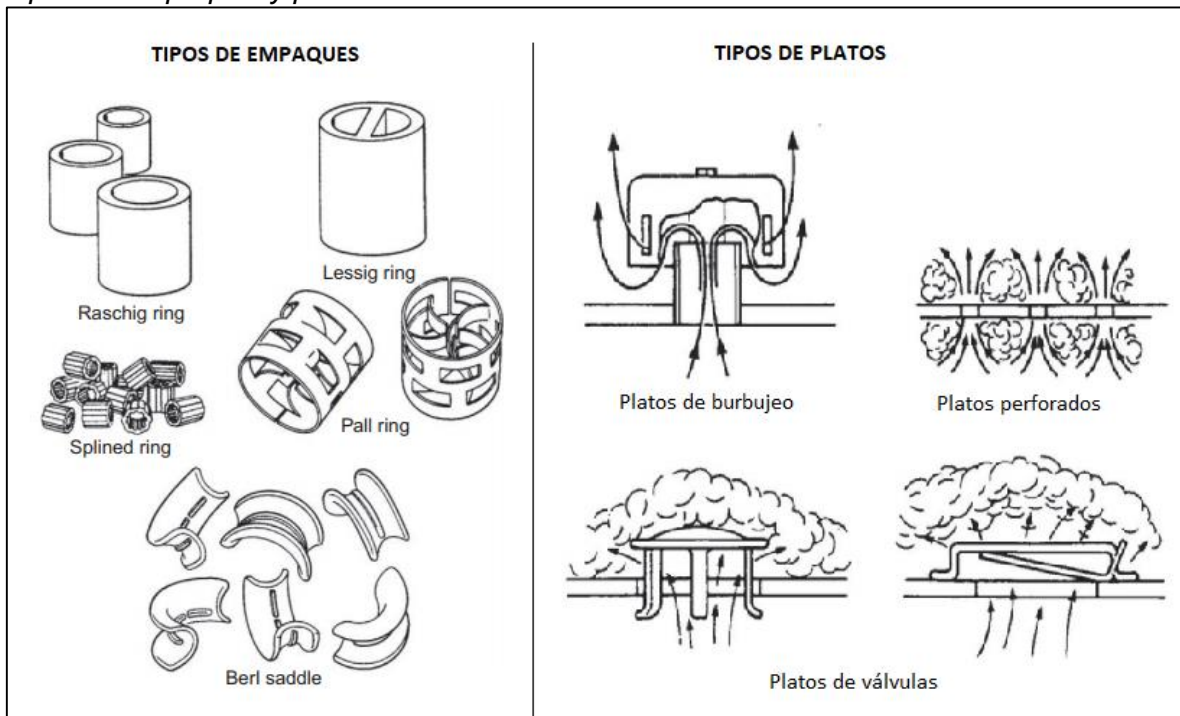
Fuente: (Stewart, 2011)

Antes de salir del contactor, el gas pasa por un extractor de niebla para eliminar el glicol que pueda estar arrastrando la fase gaseosa. El gas seco sale del contactor por la parte superior y pasa a través de un intercambiador de calor externo de gas glicol donde enfría el glicol seco entrante para aumentar su capacidad de absorción.

Asimismo, los elementos internos de la torre de absorción de TEG presentan dos categorías: empaque y platos. La Figura 12 representa las dos variantes de estos elementos internos: el embalaje (a la izquierda) y los platos (a la derecha), que se emplean en el proceso de captación de humedad (Stewart M. I., 2014).

Figura 12

Tipos de empaques y platos usados en contactoras TEG



Fuente: (Stewart, 2014)

2.7.2 Economizador de glicol

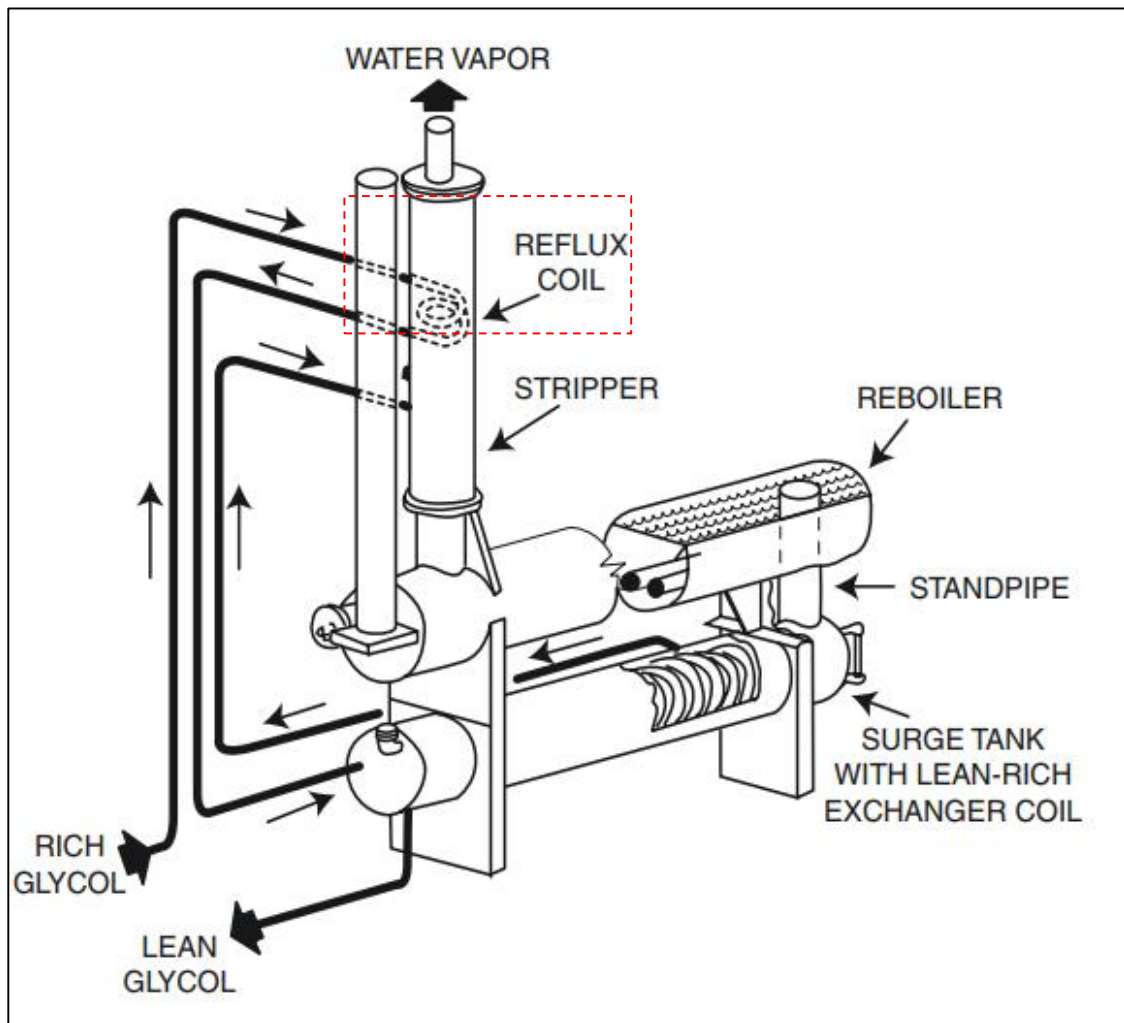
Luego de salir de la torre de contacto de glicol, el TEG enfriado fluye a través de un tubo enroscado conocido como condensador de reflujo o economizador, situado en la parte superior de la columna de evaporación.

La finalidad de este proceso es calentar previamente el glicol, de manera que se requiera una menor cantidad de energía en el proceso de rehervido, tal como se ilustra en la Figura 13.

De la misma forma, el vapor de glicol con baja concentración asciende, se enfría y se transforma en gotas, las cuales retornan al rehervidor por gravedad. Esta acción tiene un impacto considerable en la minimización de las pérdidas de TEG debido a la evaporación en el rehervidor.

Figura 13

Ubicación típica de un condensador de reflujo



Fuente: (Rosen, 2003)

2.7.3 Intercambiador de calor TEG rico/TEG pobre

En el proceso de intercambio entre el glicol rico y el glicol pobre, se realiza un calentamiento previo al glicol rico con el propósito de aprovechar el calor proveniente del glicol pobre ya regenerado. Esto tiene el efecto de disminuir la temperatura necesaria para el funcionamiento del rehervidor, además de reducir el consumo de aceite térmico o *hot oil*.

En términos generales, es posible emplear uno o dos intercambiadores de glicol rico/glicol pobre para optimizar la utilización de la energía térmica del sistema.

En la Figura 14, se muestra un intercambiador de calor Multitubo en forma de U típico para el tipo de servicio de TEG rico/TEG pobre.

Figura 14

Intercambiador de calor Multitubo en forma de U



Fuente: Intercambiador de calor multitubo serie HRS MS (2023)

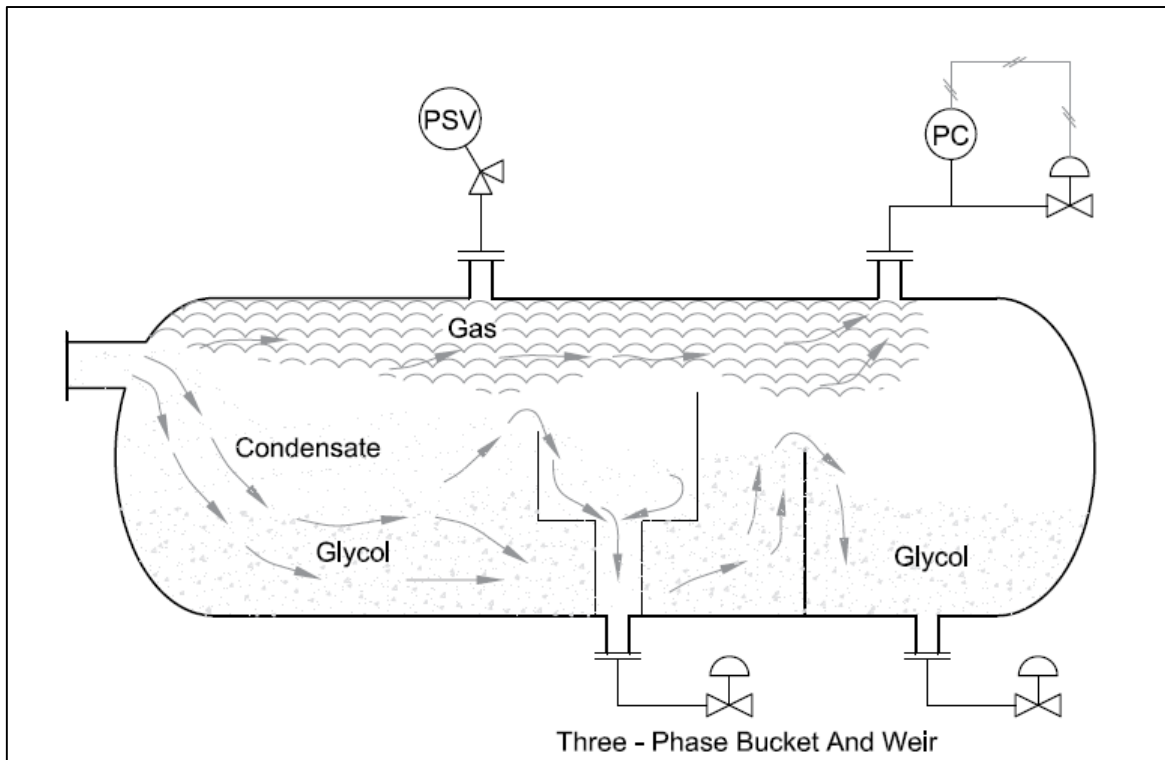
2.7.4 Separador flash

El glicol que ha sido calentado previamente atraviesa un separador trifásico de baja presión, en el cual se reduce la presión con el fin de facilitar la separación del gas disuelto y los hidrocarburos no ligados que provienen de la unidad de contacto.

Este proceso de precalentamiento contribuye a la efectiva separación de los hidrocarburos presentes en el glicol enriquecido. En la Figura 15, se muestra un esquema del separador flash para la separación de hidrocarburos y condensado del tanque flash.

Figura 15

Separador flash Gas-glicol-condensado típico



Fuente: Obtenido de (Stewart, 2011)

2.7.5 Filtros de carbón activado y filtro de polvo

El propósito del filtro de carbón activado es capturar hidrocarburos de mayor peso molecular, así como aceite de compresor y otras partículas no deseadas que pudiesen ocasionar la aparición de espuma tanto en el rehervidor como en la unidad de contacto de glicol.

Después de la etapa de separación del gas y los hidrocarburos, el glicol enriquecido atraviesa un conjunto de filtros de microfibra diseñados para atrapar partículas sólidas y otras sustancias indeseadas.

La Figura 16 presenta un ejemplo de los diversos tipos de filtros de cartucho empleados con el propósito de mantener bajo control la presencia de sólidos en el proceso.

Figura 16

Tipo de filtro de microfibra utilizado en Sistemas TEG



Fuente: Obtenido de (Stewart, 2011)

2.7.6 Rehervidor y columna de regeneración

En el proceso de regeneración del glicol en el rehervidor, se elimina la humedad presente utilizando el proceso de evaporación. Esto se logra al calentar el glicol enriquecido a una temperatura alrededor de 400°F y mantener una presión constante de 5 psig.

Bajo estas condiciones, el agua presente se convierte en vapor y se eleva a través de una columna equipada con material de relleno que facilita tanto la distribución del calor como del fluido, permitiendo que el glicol en fase vapor, que podría perderse, se condense nuevamente.

Por otro lado, el glicol enriquecido entra verticalmente en el rehervidor de glicol a través de una columna destinada a la regeneración.

El propósito de esta columna es distribuir de manera uniforme el flujo de glicol rico que ingresa al rehervidor, empleando una sección rellena de material.

Simultáneamente, el vapor caliente procedente del rehervidor se eleva, calentando el material de relleno. Cuando el glicol entra en contacto con este material, la humedad contenida en el glicol enriquecido se libera y en parte se convierte en vapor.

Mediante el calentamiento adecuado del material de relleno, es posible extraer entre el 75% y el 80% de la humedad presente en el glicol rico para que se convierta en TEG pobre.

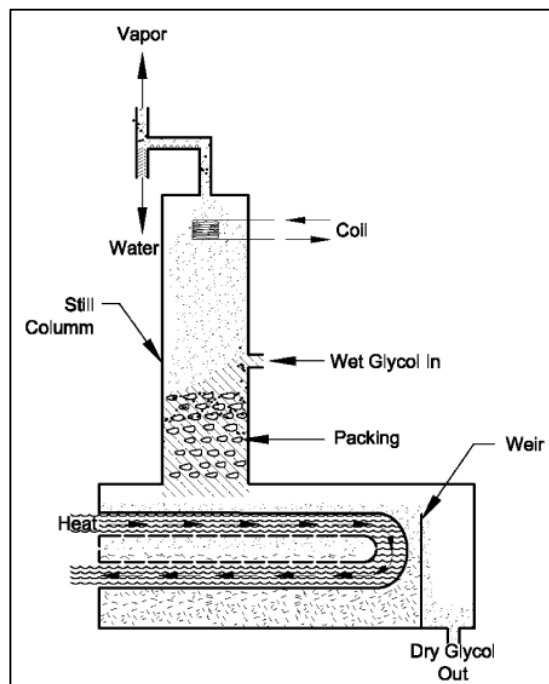
Además, un dispositivo llamado economizador de tope regula las pérdidas de glicol al propiciar la condensación del vapor de agua en la superficie de un serpentín, el cual está en contacto con una capa líquida compuesta de TEG.

La Figura 17 ilustra cómo el calentamiento del glicol se lleva a cabo mediante un proceso indirecto que involucra el uso de hot oil. Una vez regenerado, el glicol pasa a través de un canal de desbordamiento para ser dirigido a un tanque de almacenamiento intermedio conocido como "surge tank".

En este tanque se acumula el glicol empobrecido en humedad que será posteriormente recirculado. (Mokhatab, 2015)

Figura 17

Columna de regeneración y rehervidor de TEG



Fuente: Obtenido de (Stewart, 2011)

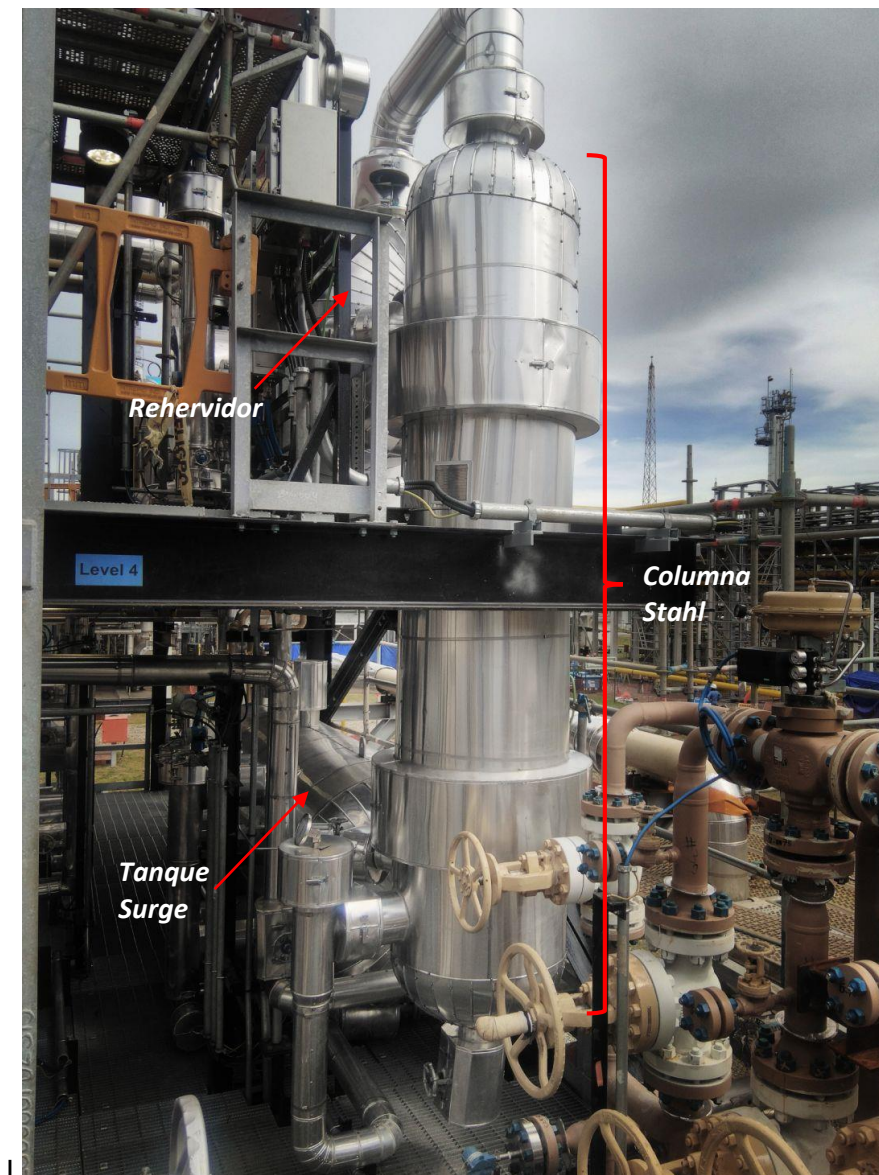
2.7.7 Columna Stahl

La columna Stahl es el equipo donde el gas de despojamiento o *Stripping gas* ingresa por el fondo de una cama de empaques que al contacto con el glicol rico proveniente del rehervidor de glicol, logra reducir la presión parcial del agua remanente y removerla por el tope de la columna Stahl.

El glicol pobre caliente que sale de la columna Stahl va hacia el tanque de compensación de glicol o *Surge Tank* que proporciona capacidad de almacenamiento de glicol en el sistema de regeneración de circuito cerrado.

Figura 18

Columna Stahl de glicol



Fuente: (Enerflex, 2022)

CAPÍTULO III. Desarrollo del trabajo de investigación

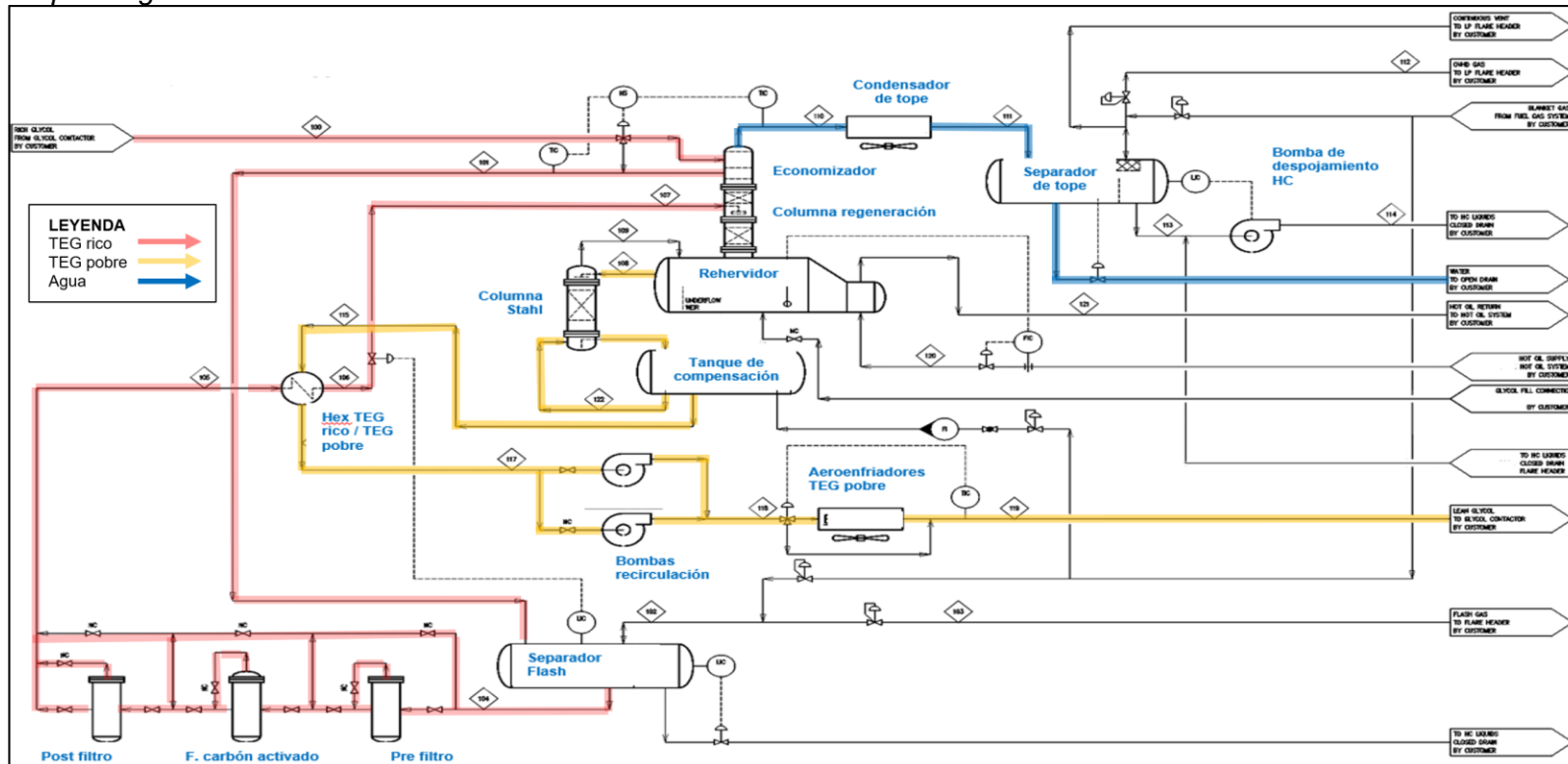
De acuerdo con los objetivos planteados en el presente informe, se requiere realizar lo siguiente:

- Evaluar el funcionamiento del nuevo patín de deshidratación con TEG, identificando las variables operativas que afecten directamente al contenido de humedad final alcanzado en el gas húmedo de la unidad criogénica 5. Dicha actividad se tiene que realizar estimando las condiciones de operación del patín de glicol a través de la simulación de procesos utilizando Aspen Hysys.
- Desarrollar la prueba de rendimiento de Performance Test del nuevo patín de deshidratación con TEG para identificar el punto óptimo operativo considerando parámetros de calidad y caudal de TEG, en la nueva unidad de deshidratación con TEG de la unidad criogénica 5. Para ello, se va a establecer un protocolo de prueba por etapas y la ejecución gradual de la misma delimitando valores límite de seguridad para evitar una posible afectación al sistema.
- Estimar el costo operativo de todo el sistema considerando pérdidas de glicol y costos de consumibles a fin de establecer un plan de operación para la operación normal del sistema.

Para ello, se muestra en la Figura 19 el diagrama de flujo de proceso del nuevo patín o unidad de glicol (En adelante) del tren criogénico 5 y los principales equipos involucrados en el proceso de deshidratación con TEG.

Figura 19

Esquema general de la nueva unidad de TEG – Crio 5



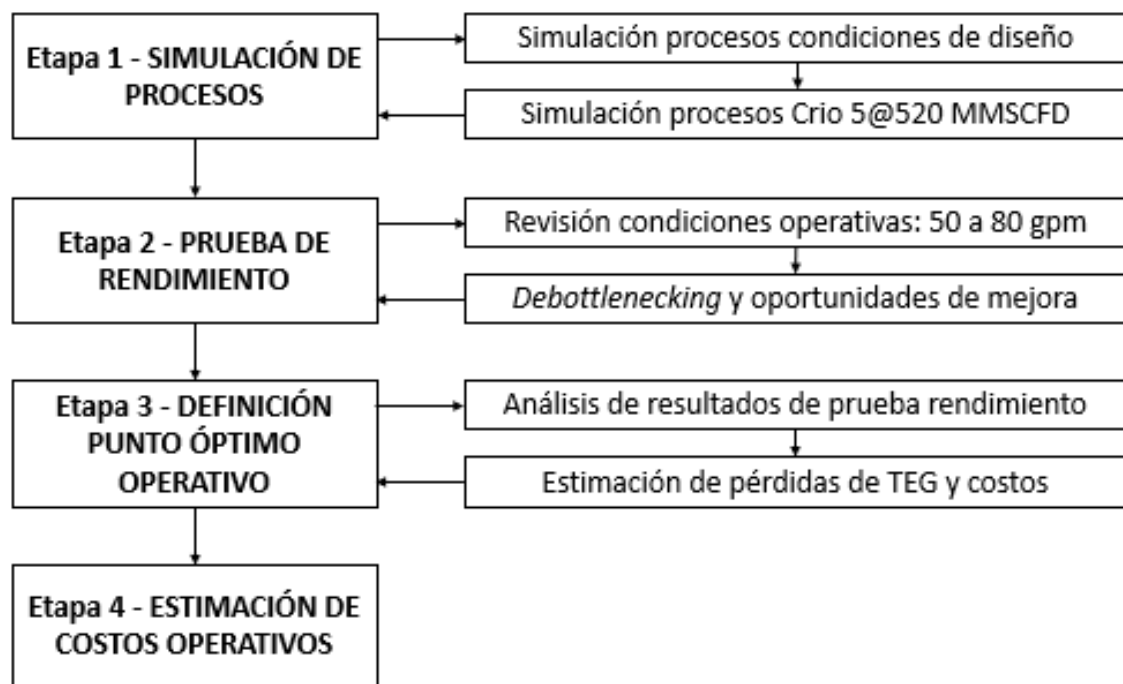
Fuente: Elaboración propio en base a unidad de TEG – Tren criogénico 5 2021

3.1 Metodología de trabajo para puesta en servicio

La metodología de trabajo establecido para ejecutar la puesta en servicio, PEM en adelante, así como definir el punto óptimo operativo del sistema y estimar los costos de operación para una adecuada gestión operativa, en la Figura 20 se muestran las etapas de la metodología.

Figura 20

Metodología de trabajo para PEM nueva unidad de TEG Criogénica 5



Fuente: Elaboración propia en base a metodología de trabajo 2021

De acuerdo con la Figura 20, se describe el plan de trabajo en 4 etapas cuyos objetivos son descritos a continuación:

3.1.1 Simulación de procesos

El objetivo de etapa de la simulación de procesos es estimar las condiciones de proceso de la nueva unidad de glicol del tren criogénico 5 a las condiciones de diseño y a las condiciones futuras a las que se prevé operar, las cuales son de 560 y 520 MMSCFD de procesamiento de gas respectivamente y 1300 psig y 1270 psig de presión en la contactora principal de glicol para ambos casos.

3.1.2 Prueba de rendimiento

Las pruebas de rendimiento o performance test son pruebas que se van a realizar a la nueva unidad de TEG del tren criogénico 5 para poder llegar a su capacidad de diseño a través de un arranque e incremento de carga secuencial. En este caso, las pruebas de rendimiento a la nueva unidad de TEG se van a realizar incrementando el caudal total de glicol regenerado del sistema desde un valor de 50 gpm hasta un total del 80 gpm realizando un monitoreo de diferentes parámetros operativos, calidad y mecánicos. El objetivo es validar si existe alguna restricción a nivel de diseño, mecánico o hidráulico que requiera atención y deba ser subsanado en el proceso de arranque.

Para realizar dicha validación se debe contar con una estimación de las condiciones operativas esperadas previo a la prueba de rendimiento por lo que la simulación de procesos es un requerimiento obligatorio para la prueba en adición a poder gestionar algún riesgo adicional en el análisis de riesgos de la prueba o HAZID.

3.1.3 Definición de punto operativo

El objetivo de la definición del punto óptimo operativo de la nueva unidad de TEG del tren criogénico 5 implica evaluar los resultados de la prueba de rendimiento, identificando aquella etapa probada que ha evidenciado un mejor rendimiento considerando los siguientes factores:

- Calidad de TEG pobre: Se requiere una calidad de TEG regenerado superior a los 98,6% %wt al ingreso de la contactora de glicol.
- Vibración en líneas y sistema: Se requiere que la vibración en el sistema y líneas de transmisión de glicol se encuentre en un valor menor a los 12 mm/s, sobre todo a las descargas de las bombas de TEG pobre.
- Consumo de TEG: se requiere que el consumo de glicol sea el menor posible, de acuerdo con el rango de consumo recomendado por la GPSA de 0,05 – 0,15 Gal TEG/MMSCF.
- Ajuste de parámetros operativos: Se requiere que las condiciones operativas obtenidas por cada etapa evidencien valores acordes a la simulación realizada que corresponde al diseño del sistema.
- Operación hidráulica adecuada: Dado que el nuevo sistema de glicol es un sistema que posee 3 niveles de operación, es posible que se pueda evidenciar inundación en alguno de los equipos debido a una posible restricción de flujo entre equipos.

3.1.4 Estimación de costos operativos

Posterior a la prueba de rendimiento y una vez identificada la etapa óptima para que la nueva unidad de TEG pueda operar, considerando los parámetros de nivel vibración en el sistema y consumo de glicol global, se procede a evaluar los costos operativos que implica operar a dichas condiciones para poder proyectar la adquisición de repuestos y consumibles del sistema en general.

Los principales consumibles que destacan son:

- Consumo de glicol
- Consumo de prefiltros, post filtros y carbón activado

3.2 Etapa 1 - Simulación de procesos

De acuerdo con lo anteriormente descrito, el objetivo de etapa de la simulación de procesos es de estimar las condiciones de proceso de la nueva unidad de glicol del tren criogénico 5 tanto para las condiciones de diseño como para las condiciones futuras a las que se prevé operar.

El simulador de procesos a utilizar es Aspen Hysys versión 10 y el paquete termodinámico de la simulación de gas natural es de Peng Robinson, aunque también se puede utilizar el paquete termodinámico CPA, el cual tiene mayor exactitud para estimar las propiedades del glicol a diferentes condiciones de operación.

3.2.1 Simulación condiciones de diseño

Para realizar la simulación de proceso, se requiere definir previamente las condiciones de operación de la nueva unidad de glicol respecto en el diseño, así como las condiciones de operación en el estado base para determinar el rendimiento del patín de deshidratación de glicol considerando el grado de deshidratación del gas y consumo de glicol.

En la Tabla 7, se muestra el listado de equipos del nuevo patín de glicol y las condiciones de diseño a simular en el simulador de procesos de Aspen Hysys.

Tabla 7*Condiciones de diseño Nuevo patín de TEG Criogénica 5*

Equipo / Método	Parámetro	Unidad	Condiciones de diseño
CARGA TREN CRIOGÉNICO 5	Carga gas húmedo	MMSCFD	560
	Apertura LV Contactora principal	%	60
BOMBAS TEG POBRE	Caudal TEG pobre C. principal	gpm	76
	Caudal TEG pobre C. secundaria	gpm	4
	Variador frecuencia bombas TEG	%	80
Rehervidor	Presión rehervidor		3
	Temperatura rehervidor	°F	380
	Control de temperatura	°F	388
	% Nivel	%	60
Columna Stahl	dpi	psi	0,3
Surge Tank	Presión gas stripping	psig	5
	Flujo gas stripping	scfm	60
	% Nivel	%	60
Condensador de reflujo	Salida vapores	°F	210
Tanque Flash glicol	Presión separadora	psig	60
SKID FILTROS TEG RICO	DP prefiltro	psid	0,1
	DP Filtro carbono	psid	0,1
	DP Post Filtro	psid	0,1
Intercambiador TEG rico/TEG pobre	Salida TEG rico	°F	340
	Salida TEG Pobre	°F	210
Aeros de glicol pobre	T. salida TEG pobre	°F	110
Desgasificador	Nivel Interfase	%	30
	Nivel HC	%	35
	Presión	psig	3
Analizador en línea	Punto rocío límite	°C	-75
Karl Fisher	Calidad TEG pobre	% w/w	99,2

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

De acuerdo con la Tabla 7, se muestra los principales parámetros de diseño del nuevo sistema de deshidratación con glicol. En el Anexo A se muestra la simulación de procesos del sistema en mención realizada en el simulador Aspen Hysys.

De acuerdo con la simulación de procesos, se estima que el gas deshidratado en condiciones de diseño debe contener una humedad de 5,07 Lb agua/MMSCF gas procesado. Asimismo, el consumo de glicol por evaporación debe de ser de 0,057 Gal TEG/MMSCF.

3.2.2 Simulación de procesos - 520 MMSCFD

Posterior a la ejecución de la simulación a condiciones de diseño, se realiza la simulación a las condiciones base de operación, que contempla principalmente un caudal de procesamiento de gas de 520 MMSCFD y una temperatura máxima de regeneración de glicol en el rehervidor para asegurar la mayor calidad de TEG pobre para una caudal de gas de despojamiento constante de 60 scfm. En adición, la presión del absorbedor de humedad o contactora de TEG es de 1255 psig.

De acuerdo con el anexo B, se muestra la simulación de procesos del nuevo Skid de glicol a las condiciones de arranque, de acuerdo con las recomendaciones del proveedor. Se evidencia un contenido de humedad a la salida del gas húmedo de 4,26 Lb agua/ MMSCF. En adición, se tiene un mayor consumo de glicol por evaporación de 0,057 Gal TEG/MMSCF a 0,0575 Gal TEG/ MMSCF principalmente debido al incremento de la temperatura de evaporación del glicol de 380°F a 395°F. En la Tabla 8 se muestra los resultados de la simulación a condiciones de diseño y a condiciones de operación de 520 MMSCFD de gas húmedo en la contactora de TEG.

Tabla 8

Resumen simulación de procesos Diseño/Operación normal

Equipo	Parámetro	Unidad	Diseño	Operación normal
Contactora de glicol	Caudal de Gas	MMSCFD	560	520
	Presión	psig	1255	1255
	Temperatura	°F	121	121
	Humedad ingreso	Lb agua/MMSCF	95,5	95,5
	Humedad salida	Lb agua/MMSCF	5,069	4,26
	Caudal TEG total	gpm	76	76
Condiciones regeneración	Consumo total TEG	Gal TEG/MMSCF	0,057	0,0575
	Calidad de TEG pobre	%wt	99,17	99,3
	Caudal gas stripping	scfm	60	60
	Temperatura rehervidor	°F	395	395

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021).

Como se muestra en la Tabla 8, los principales cambios obtenidos de la operación de diseño respecto de las condiciones de operación normal es la calidad de TEG pobre que se obtiene al operar a una menor carga de gas húmedo en la contactora de glicol, con una diferencia de 0,13%wt entre ambas purezas de glicol pobre. Dicho resultado es la condición esperada debido a que se busca deshidratar el gas húmedo y obtener la menor humedad posible a la salida de la contactora de TEG pobre.

En la simulación de operación normal se obtiene una calidad de 4,26 Lb agua/ MMSCF mientras que para el caso de diseño se obtiene una calidad de agua pobre de 5,069 Lb agua/ MMSCF. El consumo esperado para ambos casos se encuentra en el orden de los 0,057 Gal TEG/MMSCF.

3.3 Etapa 2 - Prueba de rendimiento

La prueba de rendimiento o Performance Test la nueva unidad de glicol del tren criogénico 5 se divide en 3 etapas descritas a continuación:

- Arranque y alineamiento de la nueva unidad de TEG
- Ejecución de prueba de rendimiento por etapas
- Desarrollo de oportunidades de mejora

Cada una de las etapas descritas anteriormente se debe ejecutar de manera secuencial para poner en servicio nueva unidad de glicol a las condiciones operativas adecuadas para asegurar una adecuada deshidratación de glicol así evitar la interrupción del procesamiento de gas natural en el tren criogénico 5, tanto en el arranque como en la operación normal del sistema. A continuación, se describe cada una de las etapas de la prueba de rendimiento y el resultado de su ejecución.

3.3.1 Arranque y alineamiento de la nueva unidad de TEG

El alineamiento del nuevo patín de glicol debe ser realizado en funcionamiento, es decir, debe ser puesto en servicio sin parar el tren criogénico 5 para evitar pérdidas de producción por tiempos muertos o *downtime* de producción de aproximadamente 8 horas, de acuerdo con el histórico de tiempo muerto por arranque y paro del sistema. En ese sentido, se describen la secuencia de pasos para poner en servicio la nueva unidad de glicol.

En la Tabla 9, se muestra el listado de actividades implementadas para poner en servicio la nueva unidad de glicol sin generar un paro programado del sistema.

Tabla 9

Actividades para arranque en caliente nueva unidad de TEG

ETAPAS	OBJETIVOS
Identificar puntos de conexión entre unidades de TEG y generar esquema de circuito	La nueva unidad de glicol del tren criogénico 5 fue adquirido como un sistema paquetizado, por lo que los puntos de conexión del nuevo sistema están definidos para alinearse directamente a la contactora de glicol principal. No existe un sistema predefinido en la ingeniería que permita poder realizar el alineamiento en caliente del sistema de glicol
Instalación de tramos temporales adicionales para arranque de nueva unidad TEG	Se decide instalar un nuevo esquema de líneas o <i>spool's</i> para poder alinear en caliente el nuevo sistema de TEG del tren criogénico 5. En la Figura 21, se muestra el esquema general del sistema y los tramos temporales instalados para su uso en el arranque en caliente.
Desarrollo de procedimiento de arranque en caliente	En el anexo C, se muestra el procedimiento de alineamiento de la nueva unidad de glicol de criogénica 5 que considera el uso del nuevo sistema de líneas temporales para el arranque en caliente

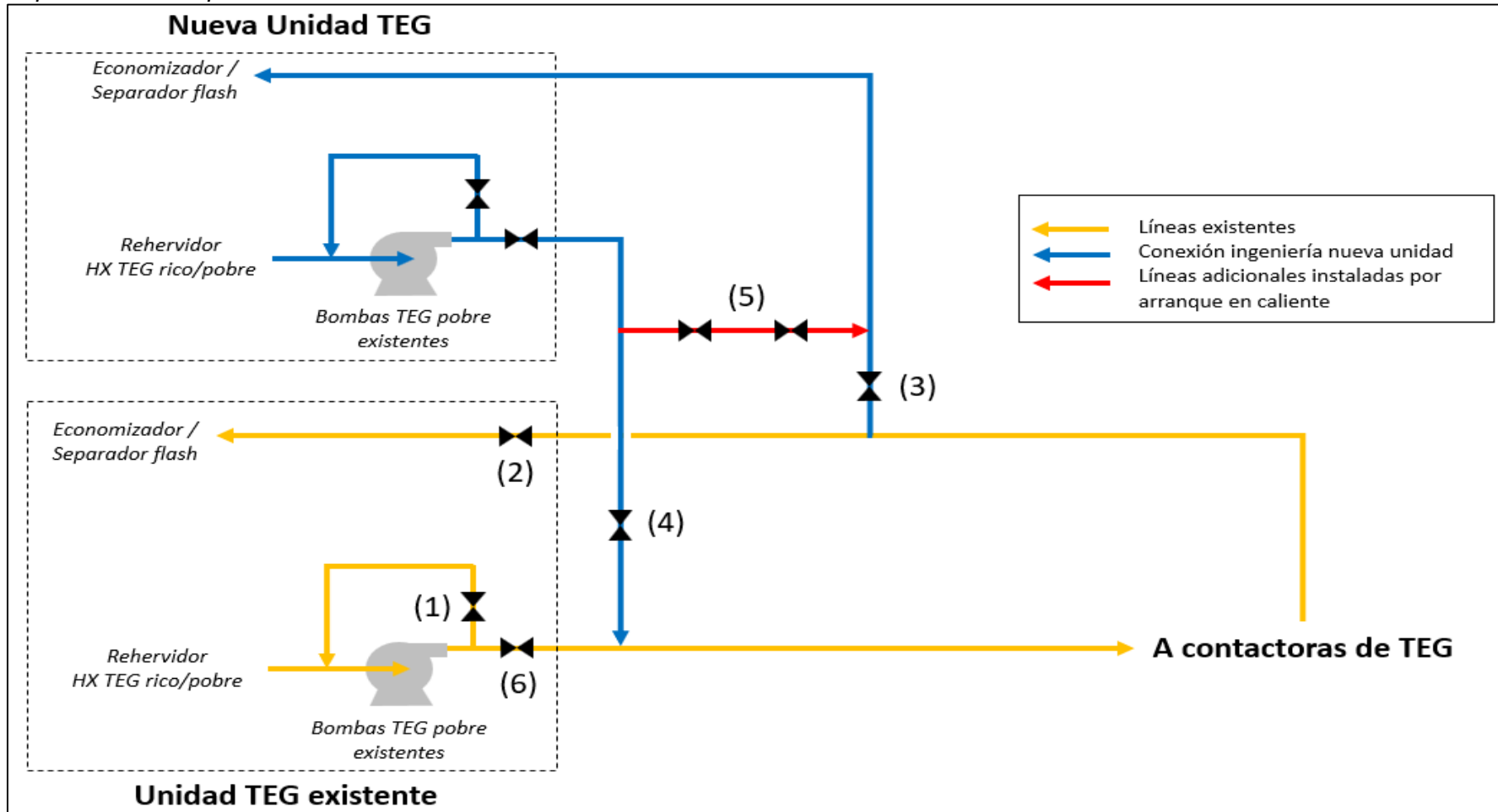
Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

De acuerdo con lo descrito en la Tabla 9, se han instalado líneas adicionales para el arranque de la nueva unidad de glicol de criogénica 5. Dichas líneas adicionales se muestran con detalle en la Figura 21, en color rojo.

Las líneas amarillas corresponden a las instalaciones existentes del sistema a de deshidratación con TEG y las líneas azules corresponden a las nuevas líneas definidas por diseño en la nueva unidad de TEG en la ingeniería. Sin embargo, para poder poner en servicio la nueva unidad de TEG en caliente, debemos alcanzar la calidad de TEG pobre a través de un proceso de recirculación previa del sistema antes que el glicol entre en contacto con el proceso de deshidratación.

FIGURA 21

Esquema de arranque en caliente de unidad de TEG



Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

En la Figura 21, se muestra el esquema de alineamiento de válvulas e interconexión del nuevo patín de glicol y el patín de glicol existente respecto de las contactoras de glicol, tanto la contactora principal como la contactora de gas de regeneración de tamices moleculares.

En general, el arranque del nuevo sistema de deshidratación con TEG incluye:

- CIERRE válvula manual. (6)
- Realizar arranque del patín de deshidratación con glicol en recirculación sin vinculación a la contactoras de TEG. Los pasos para arrancar y poner el nuevo patín de glicol en servicio se describen en el Anexo C.
- Poner en automático todos los lazos de control del sistema y evaluar con el ingeniero de control la sintonía de lazos en operación.
- Tomar muestras de glicol sin humedad para asegurar
- Verificar condiciones en campo a nivel de lectura de instrumentación redundante, vibración de líneas en general.

Posterior al arranque del nuevo patín de glicol, se procede a ejecutar el alineamiento en caliente del sistema para dar continuidad al proceso de deshidratación sin afectar la operación normal del tren criogénico 5. En ese sentido, se procede a ejecutar el alineamiento de acuerdo con la Figura 21 y siguiendo los pasos siguientes:

- ABRA la válvula de recirculación de bomba en servicio. (1)
- CIERRE válvula manual TIE IN, ingreso a economizador de la unidad antigua. (2)
- ABRA válvula manual TIE IN, ingreso a economizador la nueva unidad. (3)
- REALICE esta maniobra a la par, de forma controlada abra la válvula (4) y cierre la válvula (5)
- CIERRE válvula manual. (6)
- RECIRCULE las bombas de TEG pobre existente, el equipo quedará en servicio recirculando.
- En la pantalla Delta V PCSE_GLYCOL_REGENERATION_5:
- ABRA de forma manual la TV-123140, apertura de 70 a 100%. Incremento se REALIZARÁ de forma LENTA Y CONTROLADA, de 5% en 5%, esto con el fin de no afectar los niveles en el flash, rehervidor y surge.
- VERIFIQUE nivel en rehervidor, nivel adecuado 55%
- VERIFIQUE nivel en tanque surge, nivel adecuado 45%

- VERIFIQUE presión diferencial en filtros post/pre y carbón activo. Presión máx. ≤ 20 psid
- MONITOREE incremento de temperatura en el TIC-123142, temperatura esperada es 210°F
- ABRA bypass manual de PSV-123180A, despresurizar tanque flash lentamente hasta 60psi, de 10 psi en 10psi.
- CIERRE bypass manual de PSV-123180A cuando se tenga 60 psi en tanque flash.
- AJUSTE con las PCV-123180/81 presión en tanque flash entre 50 - 60psig.
- VERIFIQUE presión diferencial en filtros post/pre y carbón activo. Presión máx. ≤ 20 psid
- VERIFIQUE nivel tanque flash, nivel adecuado 35%
- VERIFIQUE nivel en rehervidor, nivel adecuado 55%
- VERIFIQUE nivel en tanque surge, nivel adecuado 45%
- VERIFIQUE activación y desactivación de la bomba de drenaje de HC al tener nivel en lado hidrocarburo: 50% a 37%
- REGULE caudal de ingreso a las contactora principal en 46 gpm
- REGULE caudal de ingreso a las contactora regeneración en 4 gpm

Una vez ejecutado el alineamiento de la nueva unidad de deshidratación, se evalúa las condiciones de deshidratación considerando calidad de TEG pobre, donde se obtiene una pureza promedio de 98,9% wt para un caudal de TEG total de 50 gpm. En la Tabla 10, se muestra el total de tiempo optimizado por realizar un arranque en caliente de la nueva unidad de TEG sin detener la operación del sistema.

Tabla 10

Volumen de gas optimizado por arranque en caliente

Etapas de paro	Tiempo (Horas)	Pérdidas de gas optimizadas (MMSCF)
Paro normal de la unidad Crio 5	2	
Recirculación de nueva unidad TEG en recirculación y muestreo de calidad de TEG	12	368,3
Arranque tren criogénico 5 con nueva unidad de TEG	3	

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

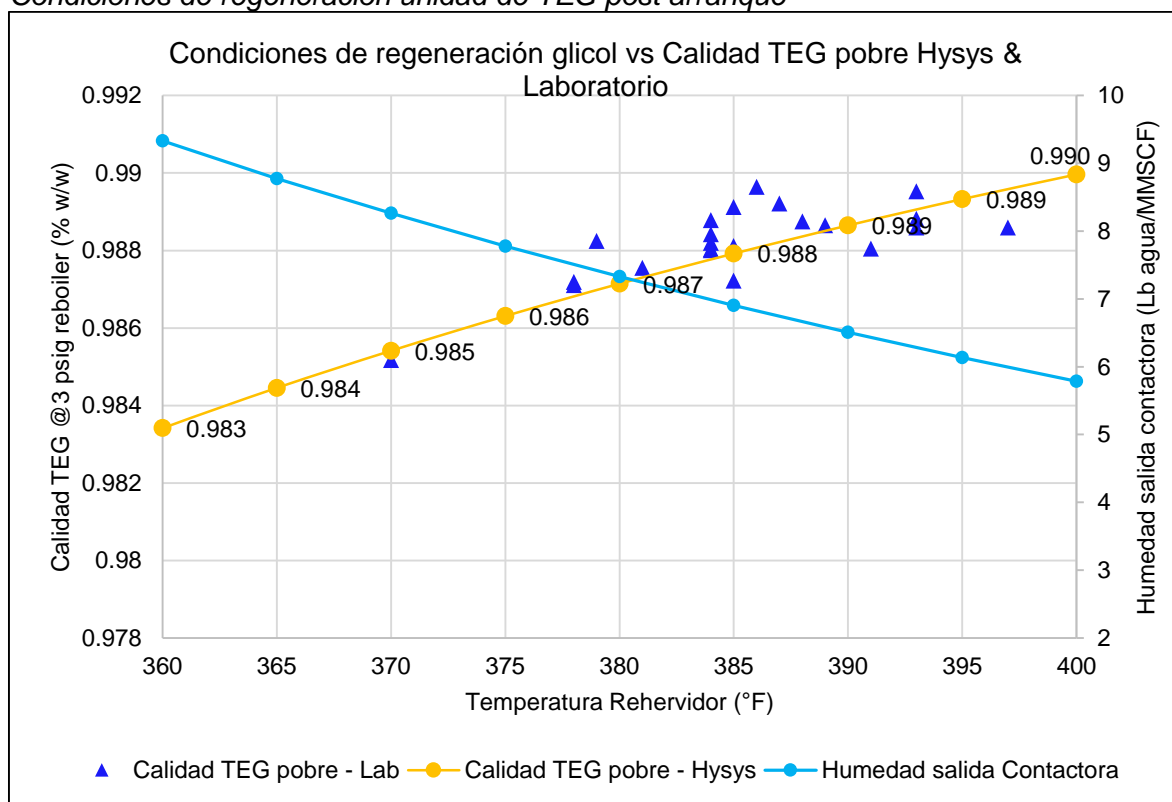
De acuerdo con la Tabla 10, se ha podido optimizar un volumen de 368 MMSCF de gas húmedo procesado por evitar un tiempo muerto de operación de 17 horas en el tren criogénico 5.

En adición, el sistema fue alineado adecuadamente a la contactora de glicol manteniendo una calidad de TEG pobre promedio de 98,9%. Con esta calidad, se permite asegurar una humedad en el gas de menos de 7 Lb de agua/MMSCF.

En la Figura 22, se muestra las condiciones de regeneración de TEG pobre obtenida a diferentes valores de temperatura en el rehervidor sin el uso del gas de stripping y post alineamiento a las contactoras de glicol.

Figura 22

Condiciones de regeneración unidad de TEG post arranque



Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

Como se muestra en la Figura 22, existe una correspondencia entre la calidad de TEG pobre obtenida a diferentes valores de temperatura en el rehervidor respecto de la tendencia estimada por el simulador Aspen Hysys. Asimismo, para una temperatura promedio de 385°F, se obtiene una calidad de TEG pobre de 98,8% w/t y una humedad promedio de 7 Lb de agua/MMSCF.

Dichos valores son aceptables para el proceso de deshidratación de gas natural y se puede proceder con la prueba de rendimiento a un mayor caudal de TEG pobre.

3.3.2 Ejecución de prueba de rendimiento por etapas

Para ejecutar la prueba de rendimiento, es necesario haber ejecutado la puesta en servicio de la unidad de TEG y haber realizado la interconexión en caliente al sistema de contactoras principal y de gas de regeneración como se mostró en la Figura 22, donde se evidencia una calidad de TEG pobre promedio de 98,8 %wt.

El objetivo de la prueba de rendimiento consiste en ejecutar el incremento progresivo del caudal de glicol desde los 50 gpm hasta los 80 gpm, que es el caudal de regeneración. Los límites definidos para la prueba se muestran en la Tabla 10.

Tabla 11

Límites de la prueba de rendimiento nuevo Patín de glicol

Parámetro	Límite
Humedad gas	8 lb agua/MMSCF
Factor estimado pérdidas glicol	0,12 gal TEG/MMSCF
Calidad TEG pobre	98,6% w/t
Punto de rocío salida tamices	-77°C
Vibración en líneas o equipos	12 mm/s

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

Previo a la ejecución de la prueba de rendimiento, se debe realizar la revisión y cumplimiento de los siguientes requerimientos para ejecutar la prueba cumpliendo con todos los requerimientos correspondientes:

- Proveer de termos de nitrógeno líquido para cada step de prueba ejecutado y ubicarlos a la salida global de los tamices moleculares a fin de medir el punto de rocío a través del método de *Bureau of Mines*.
- Realizar ensayos de TEG a utilizar durante recarga: TEG puro, estabilidad térmica, compatibilidad con TEG rico, TEG pobre (1:1). Solo se va a utilizar TEG de Dow Chemical.
- Verificar disponibilidad de stock de elementos Post Filtro, Filtro carbón activado y Pre-Filtro. Ejecutar reemplazo de filtros previo a ejecución de prueba si alguno de los filtros mencionados evidencia un Dp superior a 10 psig en operación normal completamente alineado.

La ejecución de la prueba de rendimiento se realizará a diferentes etapas que considera un incremento progresivo del caudal de glicol para evitar problemas operativos de sobre inundación del sistema, así como alguna posible condición de vibración en las líneas.

En la Tabla 12 se muestra el resumen de las etapas de la prueba de rendimiento.

Tabla 12

Resumen etapas de prueba de rendimiento unidad de TEG

Caudal TEG	Línea Base	Step I	Step II	Step III	Step IV	Step V
Total Unidad TEG	50	56	61	68	78	80
A contactora principal	46	52	57	64	74	76
A contactora gas regeneración	4	4	4	4	4	4

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

De acuerdo con la Tabla 13, se muestra el resumen de las etapas de la prueba de rendimiento que considera la línea base y las 5 etapas de incremento de caudal de TEG. En la Tabla 13 se muestra el resumen de resultados por etapas de la ejecución de la prueba de rendimiento de la nueva unidad de TEG de criogénica.

Tabla 13

Resumen de resultados prueba de rendimiento unidad de TEG

Parámetro	Unidad	Línea Base	Step I	Step II	Step III	Step IV	Step V	Límite
		50	56	61	68	78	80 gpm	
		(46 + 4)	(52 + 4)	(57 + 4)	(64 + 4)	(74 + 4)	(76 + 4)	
Carga gas húmedo	MMSCFD	520,0	520,0	520,0	520,0	520,0	520,0	520
Temperatura gas húmedo	°F	113,0	112,0	116,0	116,0	116,2	114,3	-
Caudal Total (*)	gpm	50,0	56,0	61,0	68,0	78,0	80,0	-
Caudal Contactora principal	gpm	46,0	52,0	57,0	64,0	74,0	76,0	-
Caudal Contactora Gas Reg.	gpm	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	-
Variador frecuencia bombas TEG	%	46,3	51,8	56,3	62,6	71,7	73,5	100%
Vibraciones promedio	mm/s	4,2	4,2	4,5	2,4	2,7	3,2	12
Sistema bombeo (*)	mm/s	4,7	4,2	5,5	4,2	5,2	4,6	12
Punto rocío tamices (**)	°C	-89,0	-89,0	-89,0	-88,0	-87,0	-87,0	-77
Calidad TEG pobre (**)	% w/w	99,4	99,4	99,3	99,3	99,2	99,2	98,6
dpi Columna Stahl (***)	psi	0,0	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	1,5
Temperatura reboiler	°F	392,0	392,0	390,0	388,0	387,0	388,0	400
% Nivel reboiler (***)	%	61,8	63,0	64,4	64,4	67,1	66,7	68%

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

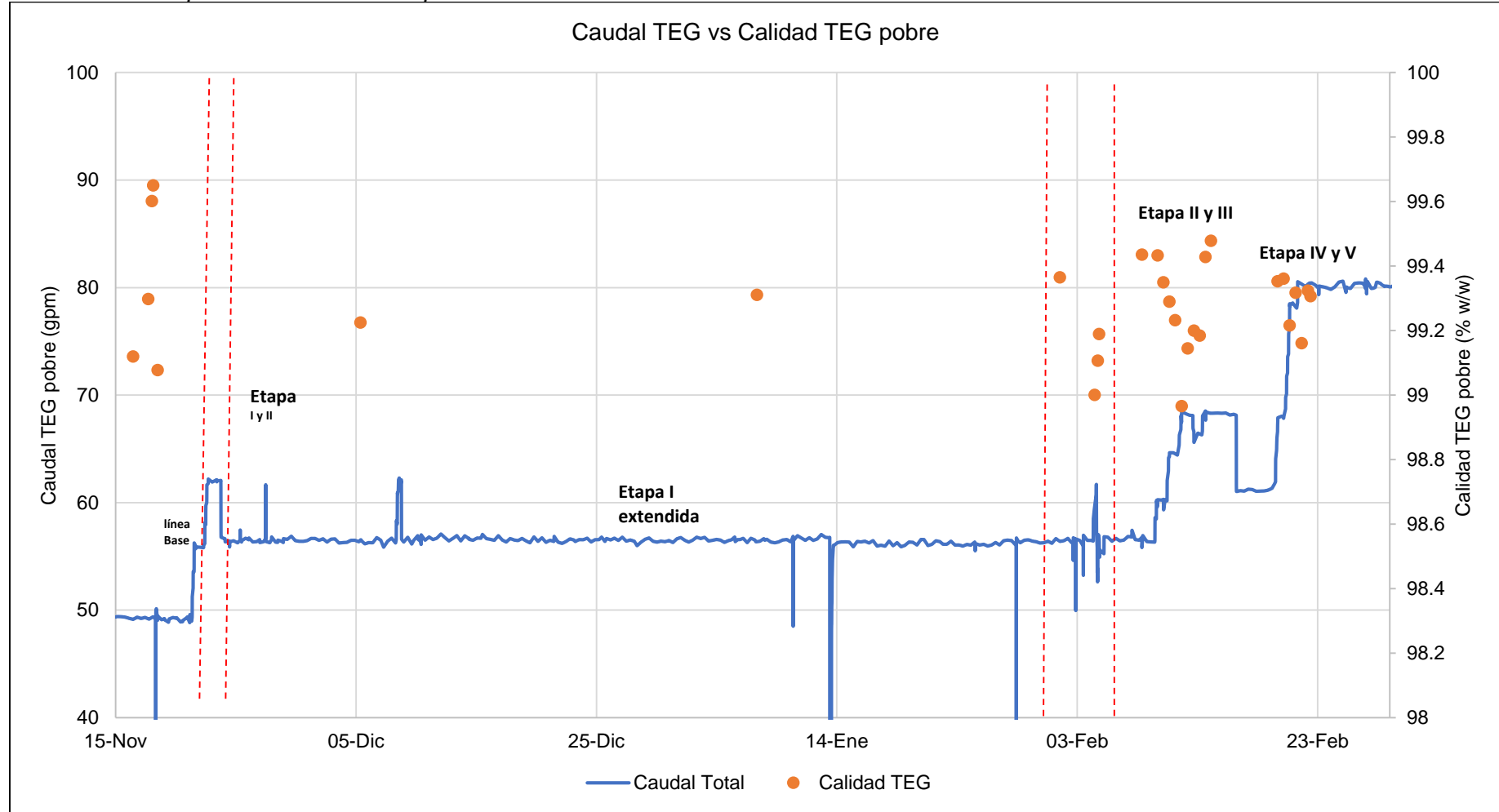
De acuerdo con la Tabla 13, se muestra el resumen de las etapas de la prueba de rendimiento que considera la línea base y las 5 etapas de incremento de caudal de TEG. A continuación, se resume los principales factores:

- El incremento de caudal de TEG total se ejecutó por etapas manteniendo el caudal de glicol hacia la contactora de gas de regeneración en todas las etapas de la prueba de rendimiento en 4 gpm.
- En todas las etapas ejecutadas se mantuvo estable la carga de gas a la contactora principal de 520 MMSCFD. Asimismo, la temperatura del gas tuvo un ligero incremento de 112°F a 116°F durante la etapa III y IV de la prueba de rendimiento, sin afectar la calidad de TEG pobre final.
- La Calidad de TEG pobre promedio fue de 99,3% wt, siendo la etapa de 68 gpm total la etapa de menor variabilidad del sistema.
- El mayor valor de diferencial de presión de la columna Stahl se dio en la etapa III a 68 gpm, obteniendo un diferencial de 0,3 psi. Dicha condición es un indicio de un mayor grado de inundación de la de la columna.
- La temperatura del rehervidor máxima alcanzada fue de 388°F en le etapa III y IV y una presión de 3,5 psig. Con dichas condiciones de regeneración de TEG, la calidad promedio fue de 99,3 %wt manteniendo un caudal de gas de despojamiento de 60 scfm.

De acuerdo con la Figura 23, se muestra el caudal de TEG pobre total por etapas respecto de la calidad de TEG pobre obtenida durante la etapa de regeneración.

Figura 23

Calidad de TEG pobre vs Caudal TEG pobre



Fuente: *Elaboración propia en base a (PPC,2021)*

De acuerdo con la Figura 23, la calidad de TEG pobre se mantiene en promedio en el valor de 99,3% wt para las diferentes etapas de la prueba ejecutada. Asimismo, la etapa I de la prueba de rendimiento se extendió debido a problemas identificados en la hidráulica del sistema, específicamente orientados a problemas de inundación en el rehervidor y pérdida de nivel en el tanque surge.

En la Figura 24, se muestra el caudal de glicol en las diferentes etapas de la prueba de rendimiento ejecutadas y su comparación del nivel del rehervidor y del tanque surge, considerando que ambos niveles operativos definen el stock disponible de TEG del sistema de regeneración. Se evidencia que al aumentar el caudal de TEG pobre total en el sistema, el nivel del rehervidor se incrementa de 64% a 68% manteniendo condiciones estables a nivel hidráulico.

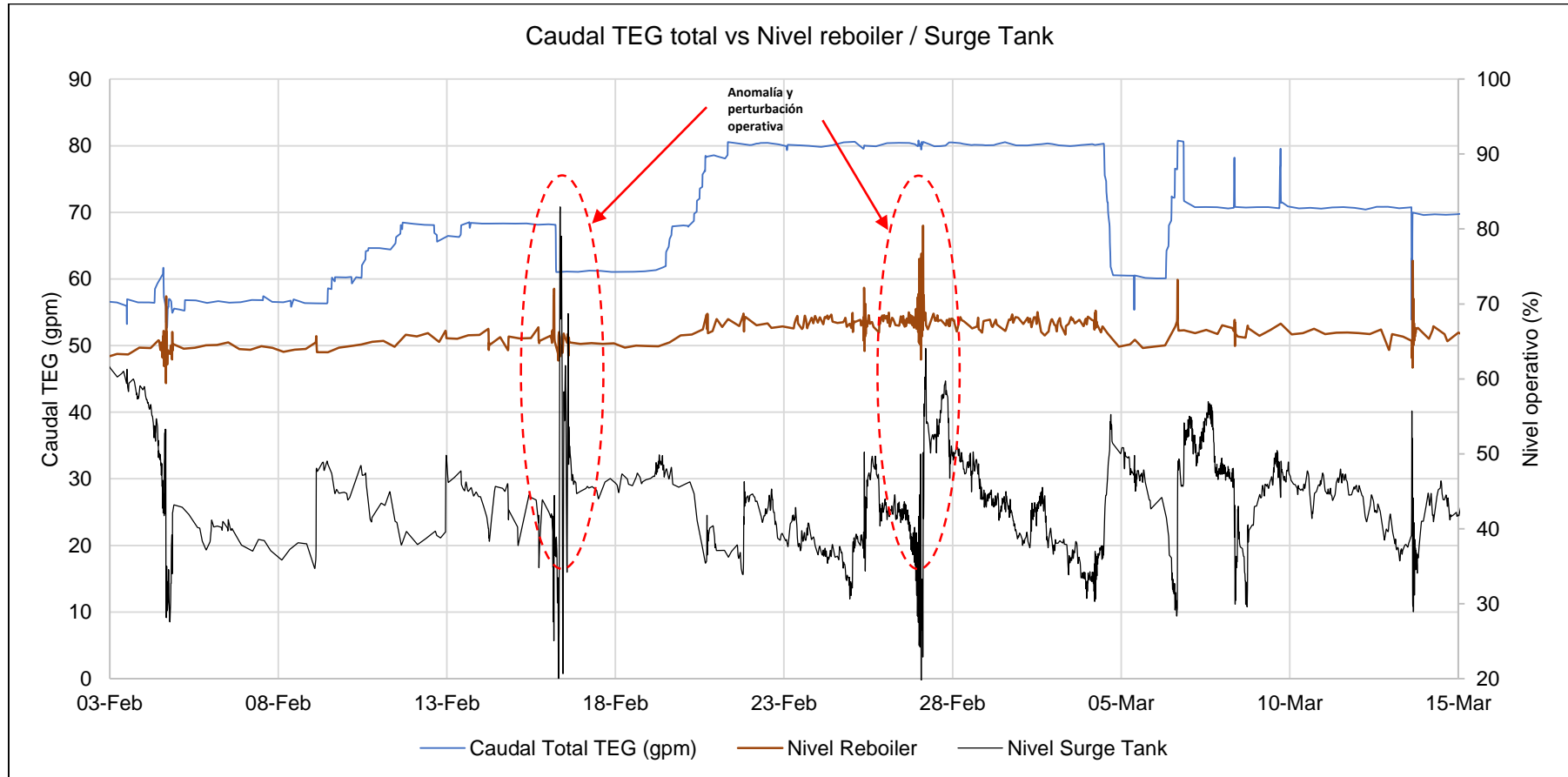
El nivel del tanque *Surge* opera en el rango del 60% al 30% evidenciando una operación adecuada e indicando la necesidad de recarga de TEG a través del sistema de reposición o *Make Up* cuando el valor de nivel alcanza un nivel bajo.

En adición a lo observado, en la Figura 24 se observa que existen perturbaciones operativas en la unidad de deshidratación de TEG evidenciado por la alta variabilidad del nivel operativo de equipos, incremento de vibración en las bombas de TEG pobre. Dicha condición estaría asociado a 2 factores:

- La sobresaturación de los prefiltros y posfiltros de la unidad de TEG, que genera una restricción hidráulica de paso de flujo de TEG rico desde el separador flash hacia el intercambiador de TEG rico/pobre. En la Figura 25, se muestra la tendencia de la prueba de rendimiento de la unidad de TEG considerando los parámetros de presión diferencial en los prefiltro, post filtro y filtro de carbón activado respecto del caudal total de TEG.
- Las fluctuaciones de presión en el separador de tope que varían desde los 0,5 psig a los 3,5 psig generados por el mal funcionamiento de una válvula *check* instalado en el sistema de venteo de vapores que controla el flujo de gas hacia el sistema de flare. Dicha condición se debe a que la válvula *check* no puede abrir debido a que aguas abajo se encuentra alineado el sistema de venteo a flare de alta presión generando un incremento puntual de presión en la unidad de TEG alterando la estabilidad del nivel operativo.

Figura 24

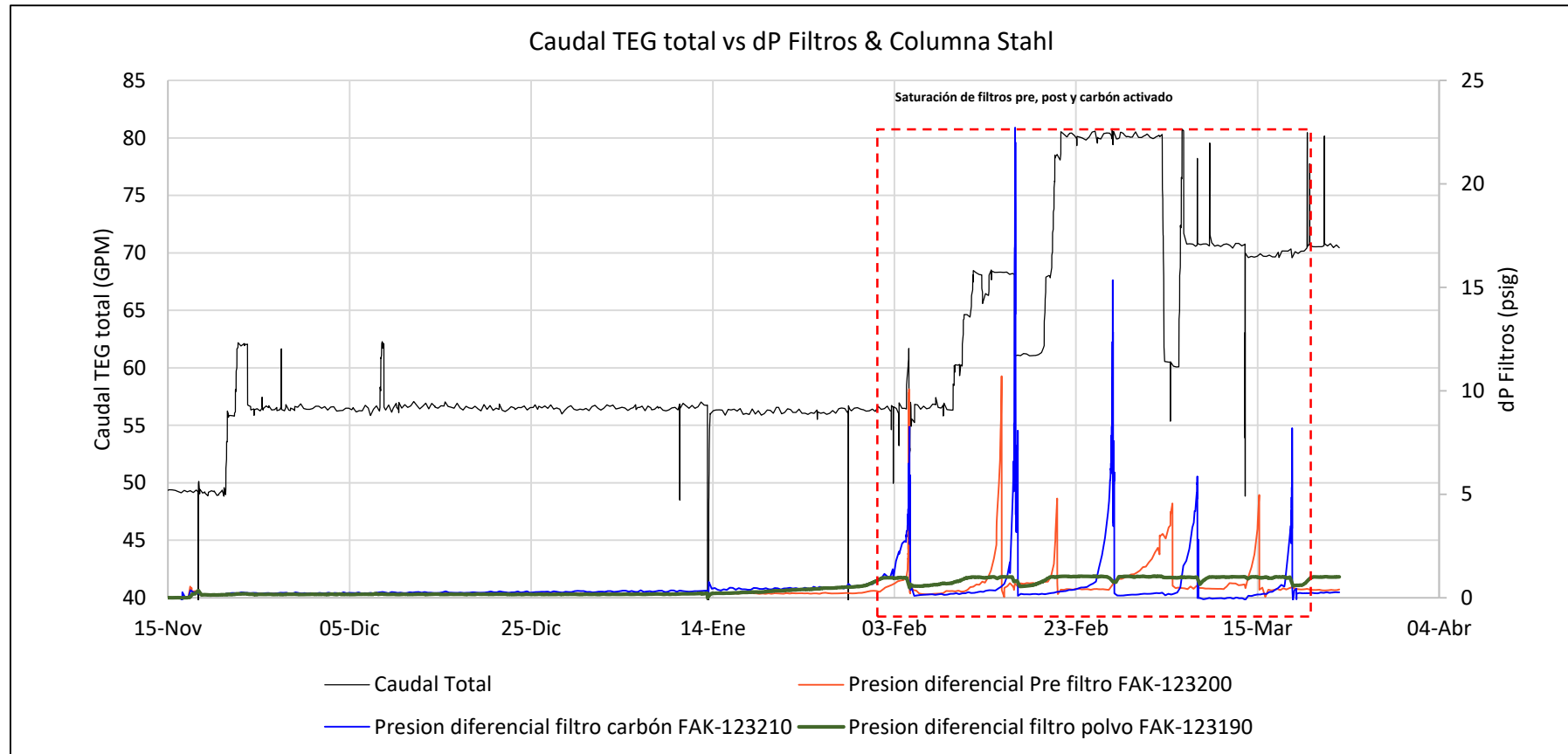
Caudal TEG vs nivel operativo unidades TEG



Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

Figura 25

Caudal TEG vs Presión diferencial filtros Unidad TEG



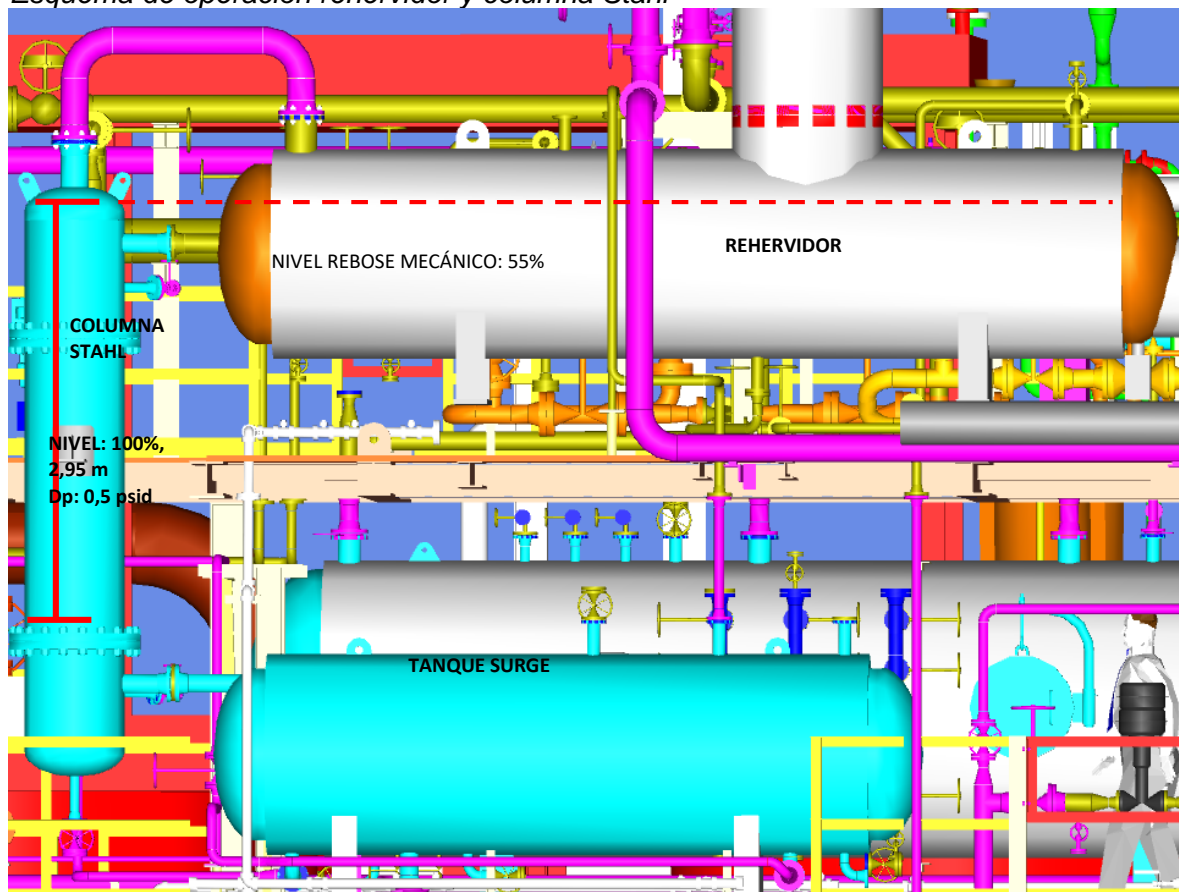
Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

De acuerdo con la Figura 25, la frecuencia de reemplazo de los 3 tipos de filtros fue de en promedio 10 días para el reemplazo de cada uno de ellos para las diferentes etapas de la prueba de rendimiento ejecutadas. En adición, de acuerdo con la Figura 25 se observa que en el momento de saturación de los filtros se genera una restricción de flujo en el sistema que evidencia una perturbación del control de nivel de equipos y vibración en general.

En la Figura 26, se muestra el esquema de operación del rehervidor y columna Stahl mostrando la disposición de equipos entre estos.

Figura 26

Esquema de operación rehervidor y columna Stahl



Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

Como se muestra en la Figura 26, en la ejecución de la prueba de rendimiento permitió comprobar una adecuada operación a nivel hidráulico del rehervidor, la cual se mantiene en 65% en promedio.

3.3.3 Desarrollo de oportunidades de mejora

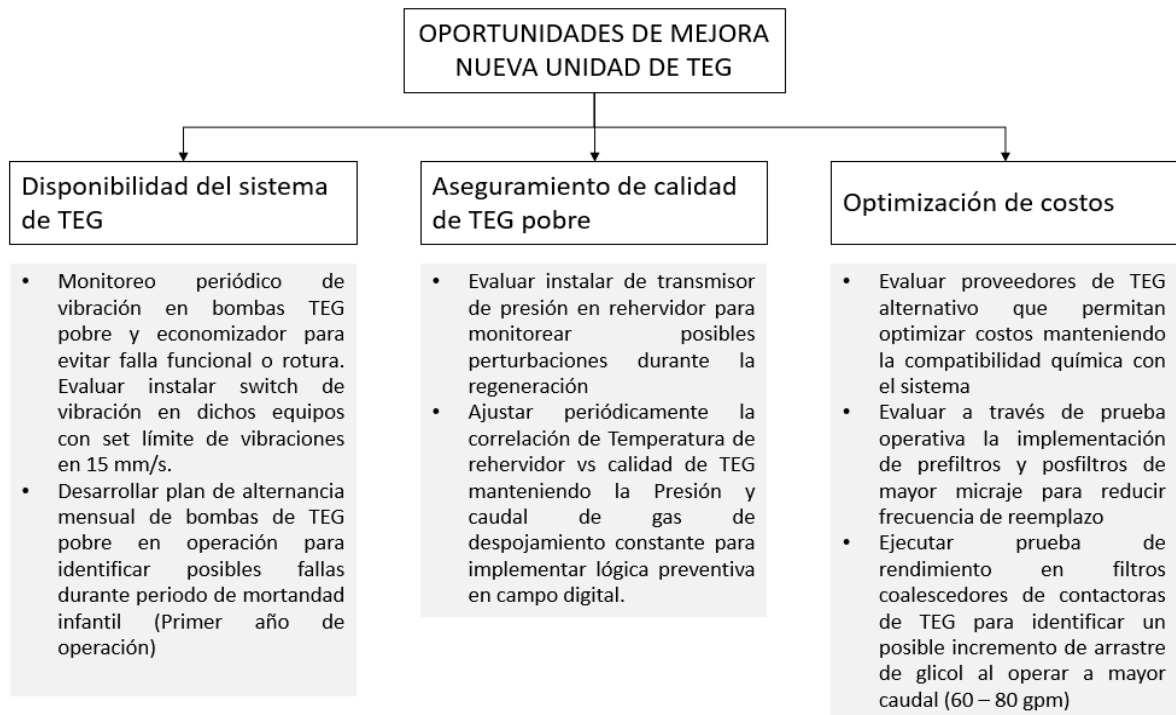
De acuerdo con los resultados obtenidos de la prueba de rendimiento, se identifican oportunidades a implementarse progresivamente con los siguientes objetivos:

- Disponibilidad del sistema de TEG: Implementar acciones o mejoras que permitan asegurar la continuidad de la operación normal del sistema
- Aseguramiento de calidad de TEG pobre: Implementar acciones o mejoras que permitan monitorear el proceso de regeneración de glicol o la operación normal del sistema a fin de asegurar
- Optimización de costos: Implementar acciones o mejoras que permitan optimizar costos a través de los principales consumibles como lo son el glicol y los filtros de la unidad de TEG.

A continuación, se esquematizan las siguientes oportunidades de mejora en función de los 2 objetivos descritos anteriormente en la Figura 27.

Figura 27

Esquema de oportunidades de mejora nueva unidad de TEG



Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

3.4 Etapa 3 - Definición punto óptimo operativo

Para definir el punto óptimo operativo de la unidad de TEG, se debe considerar los resultados obtenidos en la prueba de rendimiento y evaluando 3 aspectos importantes como lo son: el caudal total óptimo de TEG, las condiciones de regeneración y la operación de filtros e hidráulica del sistema.

3.4.1 Caudal total TEG

El objetivo de definir el caudal óptimo de TEG está asociado a mantener en operación normal un margen respecto de las condiciones de diseño del sistema. Por ello, se resume la evaluación en los siguientes aspectos:

- El Skid de TEG puede operar de manera estable a 80 gpm (condición de diseño) con un uso del 73,5% del variador de frecuencia de las bombas de TEG pobre.
- Todos los puntos donde se monitoreo vibración a los diferentes steps de caudal de TEG probado (50 a 80 gpm), se encuentran dentro del límite máximo permisible de 12 mm/s. Valor promedio vibraciones: 4,1 mm/s.
- El menor nivel de vibración alcanzado del sistema fue en la etapa III o de 68 gpm, donde dicho nivel fue del 3 mm/s. Para caudales mayores a 68 gpm, el nivel de vibración se mantiene en el orden de los 4 mm/s.
- Para un caudal de 68 gpm, se puede mantener de manera estable el nivel del rehervidor en 65% y un diferencial de presión de máximo 0,5 psid. Para un caudal mayor de operación, el nivel del rehervidor sube a 67%, generando una reducción del tiempo de residencia del glicol regeneración hacia la columna Stahl.

3.4.2 Condiciones regeneración y deshidratación TEG

El objetivo de definir las condiciones de regeneración de glicol es poder alcanzar la mayor calidad de TEG pobre posible a fin de poder remover el mayor grado de humedad en el sistema de absorción previo a los tamices moleculares. El resultado de la prueba de rendimiento muestra lo siguiente:

- Para las condiciones de regeneración: T. Rehervidor: 395°F, P. rehervidor: 3,5 psig, Q gas stripping: 60 scmf, se obtuvo una pureza promedio del TEG pobre de: 99,23% w/w

a 80 gpm de caudal. La etapa donde se obtuvo la calidad de TEG pobre con menor variabilidad fue en la etapa III o 68 GPM.

- Se evidencia una mejora en las condiciones de deshidratación del gas húmedo respecto del Skid TEG existente, de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 14

Comparativa Nueva unidad TEG vs Unidad existente

Parámetro	Unidad TEG existente	Nueva unidad TEG	Unidad
Q total (C. principal + C. Gas Regeneración)	49 (45 + 4)	80 (76 + 4)	gpm
Calidad TEG pobre (% w/w)	98,9	99,23	% w/w
Humedad gas ingreso	65	65	Lb agua/MMSCF gas
Humedad gas salida	6,6	4,9	Lb agua/MMSCF gas
Reducción humedad	89,85	92,77	%

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

- De acuerdo con la prueba, a 520 MMSCFD se obtiene una calidad estable promedio de 99,2% w/w en el rango de 60 – 65 gpm (menor variabilidad).
- Para una mayor carga de gas, se requerirá incrementar el caudal de TEG total e incrementar progresivamente el gas de stripping a fin de alcanzar una pureza objetivo-obtenida de simulación. La carga de gas húmedo del tren criogénico 5 no tiene expectativas al corto plazo de incrementarse a 560 MMSCFD, salvo algún escenario de compensación de carga por reducción de carga en otros trenes criogénicos.

3.4.3 Operación de filtros e hidráulica del sistema

El objetivo de la evaluación de filtros y perfil hidráulico del sistema es poder identificar el caudal de TEG óptimo de operación que permita mantener en condiciones estables los niveles operación del sistema si evidenciar alguna restricción a nivel de flujo de fluidos en las líneas de transporte de TEG entre equipos, considerando que la nueva unidad de TEG tiene una distribución de equipos en 3 niveles de altura. De acuerdo con la evaluación de rendimiento, se obtiene los siguientes resultados:

- La frecuencia de reemplazo promedio de los filtros del Skid TEG para los 2 últimos meses de operación es la mostrada en la Tabla 15.

Tabla 15

Frecuencia de reemplazo filtros TEG

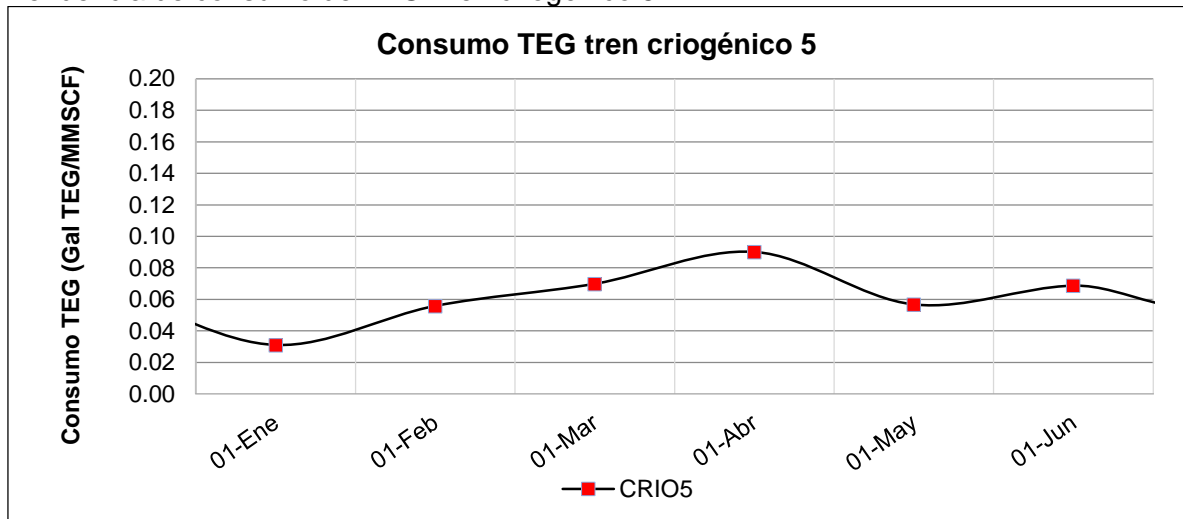
FILTRO	FRECUENCIA REEMPLAZO (Días)
Pre-filtro	10,5
Post Filtro	9,5
Filtro carbón activado	60

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

- Asimismo, se recomienda reemplazar los elementos del pre-filtro antes de que se alcance un diferencial de presión de 5 psi o más a fin de evitar perturbaciones en el nivel y presión del rehervidor, surge tank y separador flash como se evidenció durante el Test Run.
- A nivel hidráulico se evidencia lo siguiente:
 - Columna Stahl: Para los diferentes steps ejecutados, no se evidencia inundación en la columna Stahl, mostrado en la diferencia de la presión diferencial menor a 1 psi.
 - Rehervidor: El rehervidor ya no evidencia inundación para los diferentes steps ejecutados, ya que el nivel operativo ronda el 65 – 68% a máximo caudal. Para una operación de 68 gpm de caudal total, el nivel operativo no supera los 67% de nivel.
 - Surge tank: El nivel descendente la columna Stahl evidencia desde 60% hasta 30% está orientado al consumo normal de TEG, dado que el resto de los equipos del sistema trabaja a un nivel constante. Asimismo, de acuerdo con la simulación de procesos y la estadística real, el consumo máximo total de TEG se muestra en el orden de los 0,08 Gal TEG/MMSCF. En adición a ello, en la Figura 28 se muestra el consumo real de TEG mostrado durante la prueba de rendimiento.

Figura 28

Tendencia de consumo de TEG Tren criogénico 5



Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

De acuerdo con la Figura 28, se muestra la tendencia de consumo de TEG real de la nueva unidad de TEG durante la etapa de prueba de rendimiento mostrando un consumo promedio de TEG pobre de 0,065 Gal TEG/MMSCF. De acuerdo con la simulación realizada, se obtuvo un consumo de glicol estimado en 0,057 Gal TEG/MMSCF promedio como contraste por lo que el contraste con la prueba real se encuentra en el orden de magnitud establecido.

3.5 Etapa 4 - Estimación costos operativos

Para establecer los costos de operación del sistema de TEG, se debe definir inicialmente los criterios para estimar método de cálculo de cada uno de ellos, los cuales se definen a continuación:

- Los costos operativos de la unidad de TEG se definen a partir de 3 parámetros: costo de reposición de TEG, costo de reposición de filtros y costo de análisis de laboratorio.
- Se va a definir el costo anual de consumo de TEG en base al consumo de TEG obtenido de las pruebas de rendimiento por un factor de 1,15.
- Se va a definir el costo anual de reposición de filtros de acuerdo con los resultados del consumo obtenido en la prueba de rendimiento por 1,15.
- Se va a definir el total de costos asociados a laboratorio y análisis de calidad de acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de rendimiento por 1,15.

En la Tabla 16 se muestra el costo asociado de TEG, el cual fue estimado de acuerdo con el consumo de TEG obtenido en la prueba de rendimiento y contrastado por la simulación de procesos.

Tabla 16

Estimación anual costos por consumo TEG

Parámetro	Valor	Unidad
Consumo de TEG	0,065	Gal TEG/MMSCF
Carga de gas	520	MMSCFD
Consumo diario	33,8	Gal TEG diario
Consumo mensual	1014	Gal TEG
Precio Cilindro (55 Gal)	700	USD
Costo mensual	12,9	kUSD
Costo anual TEG	154,9	kUSD
<i>Budget por consumo TEG (Costo anual x1,15)</i>	178,1	kUSD

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

Como se muestra en la Tabla 16, para un consumo asociado de 0,065 Gal TEG/MMSCF y una carga de procesamiento de gas de 520 MMSCFD en el tren criogénico 5, se obtiene un costo mensual por reposición de glicol de 12,9 KUSD. De esta estimación, se puede desarrollar el *Budget* o costo estimado anual por consumo de glicol anualizando los costos mensuales estimados y agregándole un factor de 1,15 para contingencias. El resultado del costo final por reposición de glicol es de 178,1 KUSD.

En la Tabla 17, se muestra el costo estimado por análisis de laboratorio y calidad de TEG para un periodo anual.

Tabla 17

Estimación de costos de calidad de TEG

Parámetro	Valor	Unidad
Frecuencia muestreos TEG rico/pobre	2	semana
Precio por análisis Carl Fisher / TEG /sólidos	80	USD/muestra
<i>Budget total análisis calidad (Costo anual x1,15)</i>	8832	USD

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

De acuerdo con la Tabla 17, se muestra que el costo anualizado por análisis de calidad de TEG que incluye el método de Karl Fisher, medición de pH y tamizaje es de 8832 USD.

En la Tabla 18, se muestra el consumo y costo total anualizado por uso y reposición de filtros en la nueva unidad de TEG.

Tabla 18*Consumo y costo asociado de filtros en unidad TEG*

Tipo de filtro	Frecuencia de reemplazo (días)	Costo por reemplazo (USD/recambio)	Reemplazos por año	Costo total por reemplazos al año (USD)	<i>Budget</i> por consumo filtros - Costo anual x1,15 (KUSD)
Prefiltros	10,5	1200	34	41142,9	
Post Filtro	9,5	1500	38	56842,1	
Filtro de carbón activado	120	20000	3	60000,0	181,7

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

De acuerdo con la Tabla 18, el costo total estimado por consumo de filtros es de 181,7 KUSD considerando el 15% adicional para estimación del monto pronosticado o también conocido como *Budget*, el cual es costo operativo requerido para operación normal que se planifica en el periodo previo a su ejecución.

CAPÍTULO IV. Análisis y discusión de resultados

El análisis de resultados contempla un análisis cuantitativo de los resultados obtenidos durante la prueba de rendimiento en sus diferentes etapas ejecutadas y su comparativa obtenida con la simulación de procesos, la cual fue realizada a condiciones de diseño y operación normal. En adición, el análisis de resultados está orientado a mostrar la consistencia de los valores obtenidos.

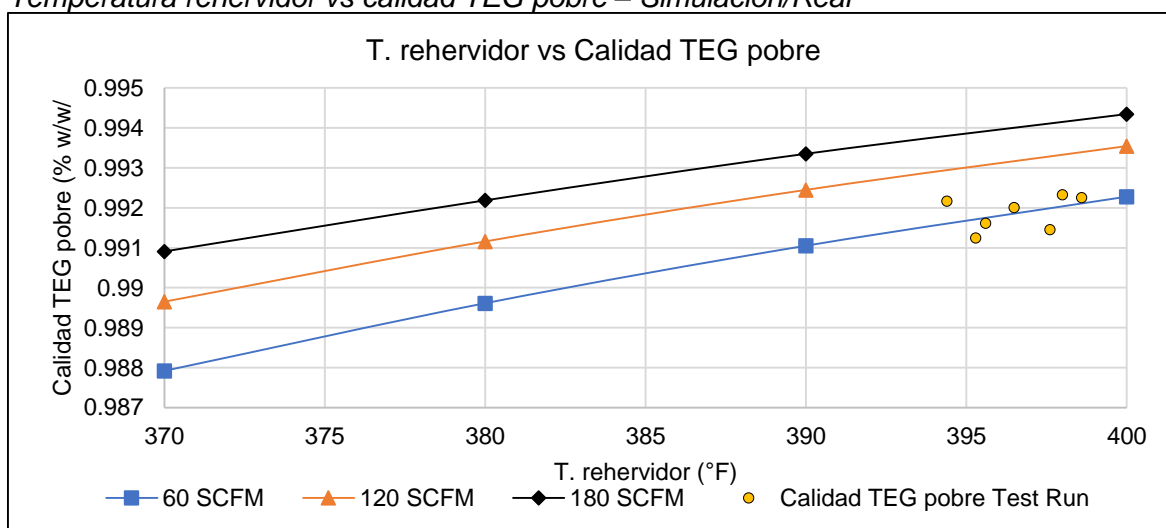
4.1 Etapa 1 – Simulación de procesos

La simulación de procesos realizada a las condiciones de operación normal a una carga de 520 MMSCFD de gas húmedo y caudal de TEG pobre de 50 a 80 gpm de TEG ajusta adecuadamente con los resultados obtenidos de la prueba de rendimiento en principales aspectos operativos descritos a continuación:

- El consumo de glicol por evaporación debe de ser de 0,057 Gal TEG/MMSCF. El consumo real de TEG promedio durante la prueba fue de 0,065 Gal TEG/MMSCF el cual es una relación de consumo aceptable y se encuentra en el límite inferior de consumo recomendado de acuerdo con la GPSA.
- La relación de temperatura de regeneración de TEG seteada en la prueba de rendimiento a 395 °F en el rehervidor ajusta adecuadamente en el gráfico generado a través del simulador como se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Temperatura rehervidor vs calidad TEG pobre – Simulación/Real



Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

De acuerdo con el anexo B, se evidencia un contenido de humedad a la salida del gas húmedo de 4,3 Lb agua/ MMSCF para una calidad de TEG de 99,2% wt por lo que dicho valor de humedad sería el valor de humedad obtenido a la salida de la contactora de TEG durante la prueba de rendimiento.

En adición, se tiene un mayor consumo de glicol por evaporación de 0,057 Gal TEG/MMSCF a 0,0575 Gal TEG/ MMSCF principalmente debido al incremento de la temperatura de evaporación del glicol de 380°F a 395°F. En la Tabla 19 se muestra los resultados de la simulación a condiciones de diseño y a condiciones de operación de 520 MMSCFD de gas húmedo en la contactora de TEG.

Tabla 19

Resumen resultados simulación de procesos/Prueba de rendimiento

Equipo	Parámetro	Unidad	Simulación	Prueba de rendimiento
Contactora de glicol	Caudal de Gas	MMSCFD	520	520
	Presión	psig	1255	1255
	Temperatura	°F	121	121
	Humedad ingreso	Lb agua/MMSCF	95,5	95,5
	Humedad salida	Lb agua/MMSCF	5,069	4,26
	Caudal TEG total	gpm	80 (76+4)	80 (76+4)
	Consumo total TEG	Gal TEG/MMSCF	0,057	0,0572
Condiciones regeneración	Calidad de TEG pobre	%wt	99,2	99,3
	Caudal gas stripping	scfm	60	60
	Temperatura rehervidor	°F	395	395

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

Como se muestra en la Tabla 19, los resultados obtenidos de la prueba de rendimiento fueron representados previamente en los resultados de la simulación de procesos, teniendo como principal conclusión que la calidad de TEG pobre a 395°F, una presión en el rehervidor de 3 psig y 60 scfm en el gas de despojamiento es de 99,3% en el escenario más favorable y 99,2% en la calidad promedio de escenarios probados durante la prueba de rendimiento.

4.2 Etapa 2 – Prueba de rendimiento

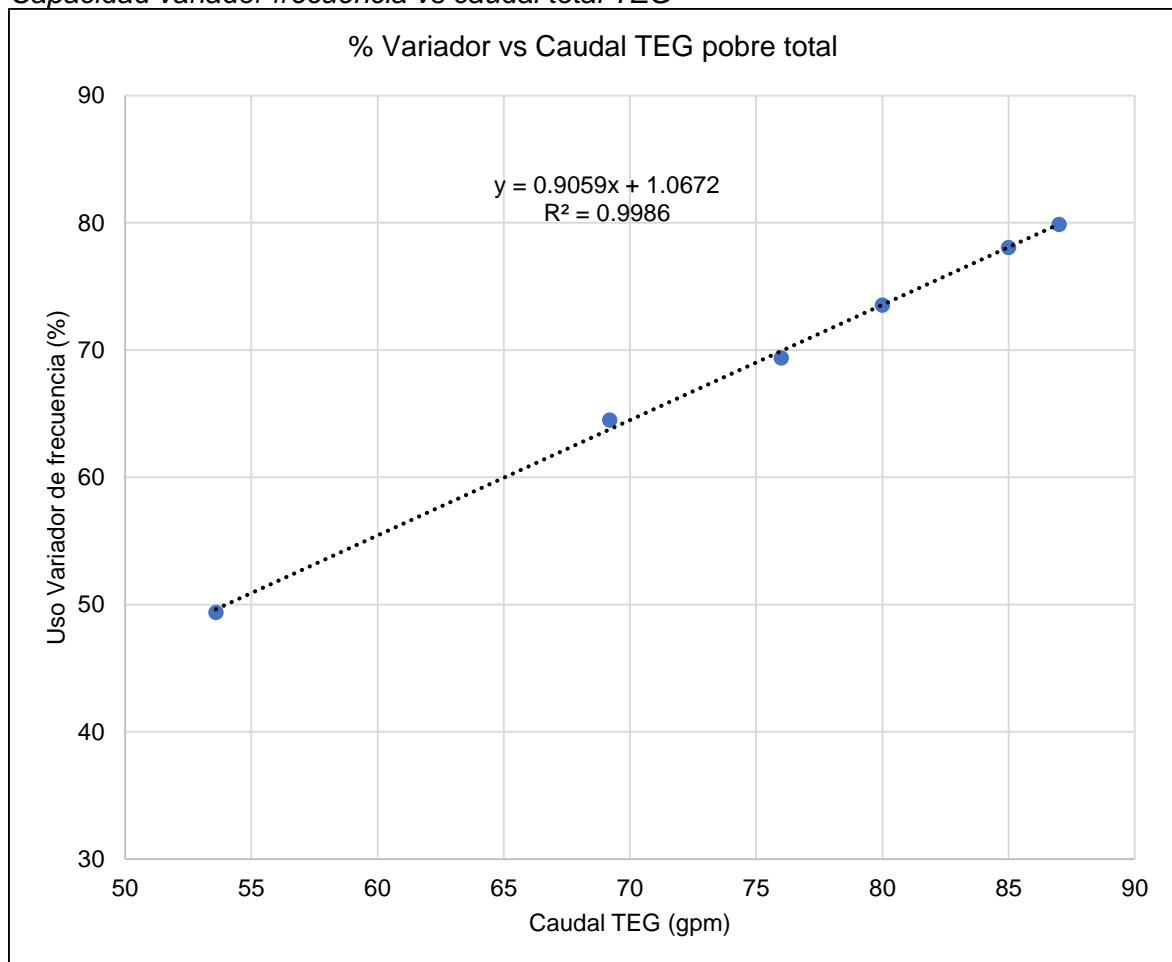
El Skid de TEG puede operar de manera estable a 80 gpm (condición de diseño) con un uso del 73,5% del variador de frecuencia de las bombas de TEG pobre. De acuerdo con la Figura 29, se muestra que la calidad promedio obtenida de glicol para una temperatura de 395°F fue en promedio de 99,2% wt para un caudal de gas de despojamiento o stripping gas de 60 scfm.

Dicha calidad obtenida sería el potencial máximo de humedad final en el gas para un caudal mínimo de gas stripping. Caudales mayores de gas stripping reduciría aún más este contenido de humedad a evaluar en función de la presión del rehervidor y carga de gas a deshidratar (> 530 MMSCFD).

La operación de las bombas de TEG pobre respecto del variador de frecuencia tuvo resultados acorde a lo esperado al poder llegar a un valor de caudal de 80 gpm utilizando una capacidad del variador de frecuencia del 73,5% como se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Capacidad variador frecuencia vs caudal total TEG



Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

El monitoreo de vibraciones en la unidad de TEG, principalmente en la descarga de bombas de TEG pobre, se mantuvo estable y en un valor inferior al valor límite establecido por el área de mecánica de 12 mm/s como se muestra en la Figura 31. Dicha

condición se mantuvo estable para las diferentes etapas de la prueba de rendimiento ejecutado.

Figura 31

Monitoreo de vibraciones descarga de bombas TEG
AZA



Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

De acuerdo con la prueba de rendimiento, a 520 MMSCFD se obtiene una calidad estable promedio de 99,2% w/w en el rango de 60 – 65 gpm (menor variabilidad). Para una mayor carga de gas, se requerirá incrementar el caudal de TEG total e incrementar progresivamente el gas de stripping a fin de alcanzar una pureza objetivo-obtenida de simulación de acuerdo con la Tabla 20.

Tabla 20

Calidad de TEG pobre vs carga de gas húmedo

Caudal de gas (MMSCFD)	Caudal total TEG (GPM)	Gas stripping (scfm)	Pureza de TEG objetivo	Pureza mínima requerida
520	60 – 65	60	99,2%	98,6%
540	65 – 72	60 – 90	99,3%	
560	72 – 80	90 a más	99,4%	

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

El consumo de glicol real obtenido durante el periodo nov22 – mar23 a condiciones estables de 520 MMSCFD fue de 0,065 Gal TEG/MMSCF gas procesado.

Operando el Skid nuevo de TEG se va a reducir el consumo de TEG en aprox. 60% respecto del Skid anterior, de acuerdo con la Tabla 21.

Tabla 21

Consumo real TEG vs consumo estimado

Parámetro	Nueva unidad TEG		Unidad existente	Unidades
	Real	Simulación		
Consumo TEG	0,065	0,049	0,15	Gal TEG/MMSCF

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

Dado que el consumo obtenido por simulación es de 0,049 Gal TEG/MMSCF, un posible factor de arrastre tendría un impacto muy bajo en el consumo real.

4.3 Etapa 3 – Definición del punto óptimo operativo

Para definir el punto operativo óptimo, se debe evaluar los principales parámetros

- Todos los puntos donde se monitoreo vibración a los diferentes steps de caudal de TEG probado (50 a 80 gpm), se encuentran dentro del límite máximo permisible de 12 mm/s. Valor promedio vibraciones: 3,4 mm/s.
- Vibración: El menor nivel de vibración alcanzado del sistema fue en la etapa III o de 68 gpm, donde dicho nivel fue del 2,4 mm/s. Para caudales mayores a 68 gpm, el nivel de vibración se mantiene en el orden de los 4 mm/s.
- Hidráulica: Para un caudal de 68 gpm, se puede mantener de manera estable el nivel del rehervidor en 65% y un diferencial de presión de máximo 0,3 psid. Para un caudal mayor de operación, el nivel del rehervidor sube a 68%, generando una reducción del tiempo de residencia del glicol regeneración hacia la columna Stahl.
- Eficiencia de deshidratación: Se evidencia una mejora en las condiciones de deshidratación del gas húmedo respecto del Skid TEG existente, de acuerdo con la siguiente tabla 22 mostrada a continuación:

Tabla 22

Comparativa Nueva unidad TEG vs Unidad existente

Parámetro	Unidad TEG existente	Nueva unidad TEG	Unidad
Q total (C. principal + C. Gas Regeneración)	49 (45 + 4)	80 (76 + 4)	gpm
Calidad TEG pobre (% w/w)	98,9	99,23	% w/w
Humedad gas ingreso	65	65	Lb agua/MMSCF gas
Humedad gas salida	6,6	4,9	Lb agua/MMSCF gas
Reducción humedad	89,85	92,77	%

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

- De acuerdo con la prueba, a 520 MMSCFD se obtiene una calidad estable promedio en todas las etapas de de 99,28% wt. Sin embargo, la menor variabilidad de la calidad de TEG se obtiene en la etapa III de 68 gpm donde los valores de calidad de TEG tuvieron una variación mínima de +- 01% wt como se muestra en la Tabla 23.

Tabla 23

Resumen resultados evaluación etapa optima

Parámetro	Unidades	Línea Base	Step I	Step II	Step III	Step IV	Step V	Promedio	Límite
Vibraciones Sistema	Mm/s	4,2	4,2	4,5	2,4	2,7	3,2	3,4	12
Calidad TEG pobre	%wt	99,4	99,4	99,3	99,3	99,2	99,2	99,28	98,6
Variabilidad calidad TEG	%wt	0,3	0,4	0,2	0,1	0,2	0,3	0,24	0,5
dpi Columna Stahl	psid	0	0,2	0,4	0,3	0,3	0,4	0,32	1,5
Consumo TEG	Gal TEG/MMSCF	0,0572	0,07	0,072	0,065	0,067	0,068	0,068	0,15

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

4.4 Etapa 4 – Estimación de costos operativos

El estimado de costos se realizó en base a los resultados obtenidos de la prueba de rendimiento, que permitirá definir el costo operativo anual del sistema de TEG basado en 3 parámetros: costos estimados por reposición de TEG, reemplazo de filtros y costos por análisis de calidad de TEG. En la Tabla 23, se muestra el resultado resumen del estimado de costos de la unidad de TEG y su distribución anual.

Tabla 23

Estimación y distribución de costos unidad de TEG

Costos operativos	Costo anual (kUSD)	Distribución costos
Consumo TEG	178	48,3%
Reemplazo de filtros	182	49,3%
Análisis de calidad	9	2,4%
Total	369	100%

Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

CONCLUSIONES

La evaluación realizada a la nueva unidad de deshidratación de TEG, que comprendió el ajuste de condiciones operativas a través de pruebas en campo a diferentes etapas de caudal total de glicol en conjunto con una simulación llevada a nivel de diseño permitió identificar el punto óptimo operativo del sistema y poder asegurar una adecuada deshidratación de gas húmedo. El resultado final fue una pureza promedio del TEG pobre de 99,23% w/w con un caudal respectivo de 80 gpm y obteniendo una humedad final obtenida y validada a través del simulador fue de 4,26 Lb agua/MMSCF, el cual es un valor bajo respecto del contenido de humedad que pueden admitir los tamices moleculares a nivel de diseño es de 10 Lb agua/MMSCF o 7 Lb de agua/MMSCF el cual es el límite operativo que maneja la unidad de TEG antigua.

Durante el funcionamiento de la nueva unidad de TEG se identificó que las variables operativas que afectan directamente al contenido de humedad final en el gas son las condiciones de regeneración del TEG, específicamente la temperatura y presión en el rehervidor, los cuales afectan directamente a la regeneración de TEG que impacta en el retiro de humedad del gas. Asimismo, el caudal de gas *stripping* es otra variable operativa que permite alcanzar una pureza del TEG superior al 99,1 %wt antes de ser enviado a la contactora a un caudal adecuado para la deshidratación del gas húmedo. En resumen, las variables que afectan la humedad final del gas húmedo son: presión y temperatura de rehervidor, caudal de gas *stripping* y caudal de TEG a contactora.

La nueva unidad de TEG puede operar de manera estable a 80 gpm (condición de diseño) que representa un uso del 73,5% del total de la capacidad del variador de frecuencia de las bombas de TEG pobre. Asimismo, el punto óptimo operativo del sistema se encuentra al operar a un caudal de TEG óptimo es de 68 gpm debido que presenta una menor variabilidad respecto de calidad de TEG obtenida de 99,2% wt con una presión y temperatura en el rehervidor de 388 °F y 3.5 psig respectivamente, caudal de gas *stripping* de 60 scmf, hidráulica del sistema estable en el rehervidor y tanque surge y un bajo nivel de vibraciones promedio menor al límite de 12 mm/s. Todos los puntos monitoreados por vibración a los diferentes *steps* de caudal de TEG probado (en el rango de 50 a 80 gpm), presentan un valor promedio de vibraciones de 3,4 mm/s, se encuentran dentro del límite máximo permisible de 12 mm/s. En referencia a la frecuencia de reemplazo promedio de los filtros es de 10,5 días para el prefiltro y 9,5 días para el post filtro. El filtro de carbón activado mantiene su frecuencia de recambio de acuerdo con las recomendaciones del

proveedor de 6 meses. Asimismo, el consumo de glicol real obtenido durante el periodo noviembre 22 – marzo 23 a condiciones estables de 520 MMSCFD fue de 0,065 Gal TEG/MMSCF gas procesado. Operando el Skid nuevo de TEG se va a reducir el consumo de TEG en aprox. 60% respecto del Skid anterior.

El costo total asociado por operación de la nueva unidad de TEG es de 369k USD, de los cuales, el consumo y reposición de TEG representa 178k USD (48,3%), el reemplazo de filtros con 182k USD (49,3%) y los análisis de calidad un monto de 9k USD (2,4%). El consumo promedio de TEG de la nueva unidad es de 0,065 Gal TEG/MMSCF obtenido durante la prueba de rendimiento, un 54% menos de consumo respecto de la unidad antigua de glicol con un consumo de TEG promedio de 0,12 Gal TEG/MMSCF. Asimismo, los costos por consumo de prefiltros y posfiltros en adición a los costos por análisis de calidad de TEG pobre se mantuvieron constantes respecto de la unidad de TEG existente.

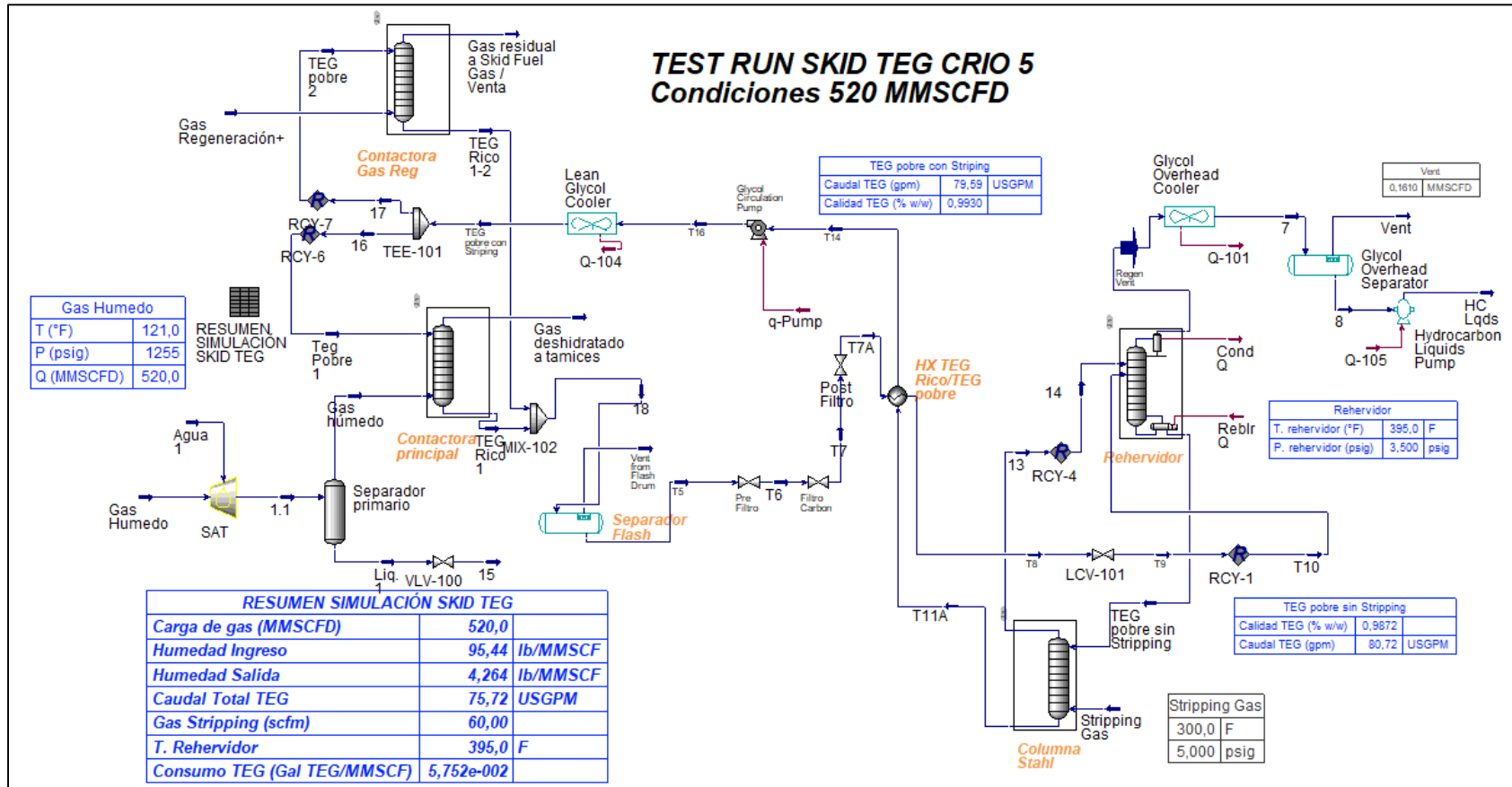
RECOMENDACIONES

- Para los escenarios de operación de un caudal de gas superior a los 520 MMSCFD, se recomienda ajustar la temperatura del rehervidor a límite superior de 395°F e incrementar progresivamente el caudal de gas de despojamiento con el objetivo de incrementar el grado de remoción de humedad por evaporación priorizando la calidad de TEG pobre obtenida sin generar alguna condición de degradación del TEG cuyo valor de temperatura es de 404 °F de acuerdo con la hoja de datos del fabricante de glicol. Este cambio puede incrementar ligeramente el consumo de glicol por evaporación en el rehervidor por lo que es necesario evaluar dicho cambio a través de una simulación de procesos a las condiciones descritas.
- Monitorear diariamente la unidad de TEG con soporte del operador enfatizando el caudal de gas de despojamiento debido a que dicho parámetro no tiene un sistema instrumentado asociado al PCS que pueda ser monitoreado desde sala de control. Dicho valor se establece actualmente en 60 scfm y en caso se requiera incrementar dicho caudal por alguna necesidad operativa como el incremento de caudal de gas húmedo a deshidratar, es necesario realizar una prueba operativa o Test run que permita controlar el caudal de gas de despojamiento respecto a la calidad de TEG pobre obtenida.
- Revisar diseño de válvulas check de separador de tope y/o su retiro del sistema para evitar problemas de variación de presión y consecuentemente de niveles operativos de la unidad de TEG. El escenario perturbaciones operativas por variación de presión en el rehervidor es uno de los problemas típicos que afecta la regeneración del glicol y no es identificable oportunamente a menos que se cuente con un transmisor de presión enlazado al PCS para su monitoreo en línea.
- Evaluar recambio de filtros pre y post de Skid de filtración considerando un micraje de mayor tamaño a fin de reducir la frecuencia de reemplazo de sus elementos y generar estrategia de compra y reposición de consumibles para un periodo de operación de por lo menos 1 año.
- Dado que el consumo obtenido por simulación es de 0,049 Gal TEG/MMSCF y el consumo real de TEG es de 0,065 Gal TEG/MMSCF, la diferencia puede estar asociada a un posible factor de arrastre de glicol de las contactoras de glicol hacia los sistemas aguas abajo que tendrían un impacto en el consumo de glicol. Esta condición se puede confirmar con la ejecución del estudio de niebla en el filtro coalescedor existente y nuevo filtro coalescedor.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carmody, P. A. (2020).** *Designing glycol dehydration units that utilize Stahl columns with stripping gas.* Laurance Reid Gas Conditioning Conference. Oklahoma, USA: OTSO Energy Solutions.
- GPSA. (2004).** *Engineering Data Book.* Gas Processors Suppliers Association.
- HRS, H. (2023).** Hygienic Multitube Heat Exchangers With Removable Tubes – Hrs Mr Series. <https://www.hrs-heatexchangers.com/heat-exchangers/multitube-heat-exchangers/hygienic-multi-tube-heat-exchangers-removable-tubes/>
- Ibrahim, T. K., Abdulrahman, R. K., Khalaf, F. H., Kamal, I. M. (2017).** *The impact of stripping gas flow rate on triethylene glycol losses from glycol regeneration unit: Simulation study.* *Journal of Chemical Engineering and Process Technology*, 8, 337.
- Khan, M. A., & Maruf, A. (2012).** *Optimizing effective absorption during wet natural gas dehydration by TEG.* *IOSR Journal of Applied Chemistry (IOSRJAC).*
- Mokhatab, S. (2015).** *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing.* Oxford, UK: Elsevier.
- PPC. (2004).** *Control de calidad producción pozos Lote 88-56.* Cusco: Planta de Gas Malvinas.
- PPC. (2015).** *Unidad de deshidratación de TEG - Tren criogénico 5.* Cusco, Peru: PPC.
- PPC. (2021).** *Reporte Unidad de deshidratación TEG - Tren Criogénico 5.* Cusco, Peru: PPC.
- PPC. (2022).** *Reporte Unidad de deshidratación de TEG - Tren criogénico 5.* Cusco, Peru: PPC.
- Chebbi, R., Qasim, M., & Abdel Jabbar, N. (2019).** *Optimization of triethylene glycol dehydration of natural gas.* *Energy Reports*, 5, 723-732. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.06.014>.
- Rosen, W. (2003).** *Stripper in Dehydration Plant.* Houston, USA.
- Stewart, M. I. (2011).** *Gas Dehydration Field Manual.* Oxford: Elsevier.
- Stewart, M. I. (2014).** *Surface Production Operations.* Oxford, UK: Elsevier Inc.

B. Simulación de procesos sistema de deshidratación Patín de glicol – Operación normal



Fuente: Elaboración propia en base a (PPC,2021)

C. Procedimiento y secuencia de alineamiento de la nueva unidad de TEG

<p>VERIFIQUE nivel en equipos</p>	<ul style="list-style-type: none"> Nivel real rehervidor, entre 50% a 60% (>65% evidencia inundación) Nivel real en tanque surge, entre 40% a 50% Nivel real en tanque flash, entre 30% a 40% 								
<p>VERIFIQUE presión en separador flash</p>	<ul style="list-style-type: none"> VERIFIQUE en la pantalla Delta V PCSE_GLYCOL_REGENERATION_5: 60 – 65 psi 								
<p>APERTURE válvula 3 vías</p>	<ul style="list-style-type: none"> AJUSTE la apertura de la válvula de 3 vías hacia el economizador en 70% 								
<p>ARRANQUE aerofriadores TEG pobre</p>	<ul style="list-style-type: none"> En la pantalla Delta V PCSE_GLYCOL_REGENERATION_5: Aerofriadores A/B 								
<p>SETEE la temperatura de aerofriadores</p>	<ul style="list-style-type: none"> En la pantalla Delta V PCSE_GLYCOL_REGENERATION_5: COLOQUE set de temperatura en aerofriadores a 130°F. COLOQUE lazo de control en automático. 								
<p>ARRANQUE la PAY-123220/30</p>	<ul style="list-style-type: none"> En la pantalla Delta V PCSE_GLYCOL_REGENERATION_5: <ul style="list-style-type: none"> VERIFIQUE set de velocidad del variador de frecuencia, según bomba a arrancar, este en 0%. Para incrementos de % variador de frecuencia, considerar la siguiente tabla: <table border="1" data-bbox="1031 787 1467 979"> <thead> <tr> <th>% variador frecuencia</th> <th>Caudal TEG total (GPM)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>53,6</td> <td>49,4</td> </tr> <tr> <td>85</td> <td>78</td> </tr> <tr> <td>87</td> <td>80</td> </tr> </tbody> </table> ABRA válvula manual de recirculación en bomba a poner en servicio- ENCIENDA la PAY-123220/30, según requerimiento. SETEE el variador de frecuencia a 10% de velocidad CIERRE válvula manual de recirculación en bomba a poner en servicio. En la pantalla Delta V PCSE_GLYCOL_REGENERATION_5: <ul style="list-style-type: none"> INCREMENTE el variador a 32% de velocidad. VERIFIQUE presión en descarga de bomba: 150 psi. 	% variador frecuencia	Caudal TEG total (GPM)	53,6	49,4	85	78	87	80
% variador frecuencia	Caudal TEG total (GPM)								
53,6	49,4								
85	78								
87	80								

CALIENTE el reboiler de glicol	<ul style="list-style-type: none"> – En la pantalla Delta V PCSE_GLYCOL_REGENERATION_5: SETEE la temperatura en: 392°F. La temperatura de fondo en el reboiler debe ser de 395°F aprox. COLOQUE lazo de control en automático.
ESTABILICE niveles, temperaturas y diferenciales de presión en skid.	<ul style="list-style-type: none"> • En la pantalla Delta V PCSE_GLYCOL_REGENERATION_5: <ul style="list-style-type: none"> – VERIFIQUE Y CONTROLE niveles en reboiler (60%), tanque surge (40%) y flash (30%). – VERIFIQUE Y CONTROLE temperatura en reboiler (390°F - 395°F) y a la salida de los aeroenfriadores (130°F) – VERIFIQUE Y CONTROLE presión diferencial en filtros (≤ 20psid) – VERIFIQUE presión diferencial en columna Stahl. Verificar que no supere los 1,5 psig.
ABRA suministro de gas stripping hacia CBA-123241	<ul style="list-style-type: none"> • ABRA válvula manual en línea de gas stripping, ingreso a CBA-123241. • CONTROLE presión de gas stripping en 4 psi. Restringir ingreso de gas stripping a $Q \approx 60$ scfm • CONTROLE presión en desgasificador de glicol. Presión máx.: $\leq 2,8$ psi
INCREMENTE velocidad en PAY-123220/30	<ul style="list-style-type: none"> • En la pantalla Delta V PCSE_GLYCOL_REGENERATION_5: INCREMENTE set de velocidad <i>del variador de frecuencia según: Hora 2 a 34% (Q \approx 32 gpm), Hora 5 a 41% (Q \approx 38 gpm)</i>. Verificar que el nivel del reboiler no supere los 65%, evidenciando la no inundación
MUESTREÉ humedad salida de contactora	<ul style="list-style-type: none"> • MUESTREE dew point a la salida de contactora principal
INCREMENTE velocidad en PAY-123220/30	En la pantalla Delta V PCSE_GLYCOL_REGENERATION_5: INCREMENTE set de velocidad <i>SIC-123220/30: Hora 7 a 45% (Q \approx 42 gpm), Hora 8 a 47% (Q \approx 44 gpm), Hora 9 a 50% (Q \approx 46 gpm)</i>
MUESTREÉ TEG pobre – Hora 9	<ul style="list-style-type: none"> • MUESTREE a la entrada de contactora principal <ul style="list-style-type: none"> – VERIFICAR calidad del producto. Valores esperados TEG pobre: H2O: 0.611%w/w, TEG: 99.38%w/w
INCREMENTE velocidad en PAY-123220/30	<ul style="list-style-type: none"> • En la pantalla Delta V PCSE_GLYCOL_REGENERATION_5: <ul style="list-style-type: none"> – INCREMENTE set de velocidad <i>SIC-123220/30:</i> <ul style="list-style-type: none"> ✓ <i>Hora 10 a 52% (Q \approx 48 gpm), Hora 11 a 54% (Q \approx 50 gpm), Hora 12 a 56% (Q \approx 52 gpm)</i>

