

Impacto de la configuración de los sistemas de compresión de tres etapas sobre el recobro de líquidos y la reducción de emisiones a la atmósfera.

Diego Sebastián Buitrago Ardila

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos.

Director

Manuel Enrique Cabarcas Simancas

Magíster en Ingeniería Química – UIS

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingeniería físico químicas

Escuela de ingeniería de petróleos

Ingeniería de petróleos

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mis queridos padres, por su infinito amor, inquebrantable compañía y constante motivación que me impulsaron a superar cada desafío en este arduo camino. Su fe en mí fue la luz que iluminó cada página de esta tesis. Gracias por ser mi roca, mi inspiración y mi ejemplo de perseverancia.

A Angélica Niño, por su apoyo incondicional, consejos sabios y amor genuino que fueron mi brújula en el desarrollo de este trabajo. Tu aliento y cariño fueron el impulso que necesitaba para avanzar con determinación hacia el éxito. A tu lado, cada página escrita cobró un significado aún más especial.

Con profundo agradecimiento,

Diego B.

Agradecimientos.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al profesor Manuel Cabarcas, mi director de tesis, por su orientación experta, paciencia y apoyo durante todo el desarrollo de este trabajo. Sus valiosas sugerencias y consejos han sido fundamentales para la culminación de este proyecto.

Asimismo, deseo agradecer a la Universidad Industrial de Santander por brindarme la oportunidad de formarme académicamente y llevar a cabo esta investigación. El ambiente de aprendizaje que ofrece esta institución ha sido clave en mi crecimiento profesional y personal.

A todos los que de alguna manera formaron parte de este proceso, gracias por su contribución, apoyo y aliento en este viaje que hoy culmina en esta tesis. Sus nombres y esfuerzos han quedado grabados en cada página de este trabajo.

Este logro no habría sido posible sin el apoyo incondicional de todas estas personas e instituciones. Gracias por creer en mí y en este proyecto.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1. Objetivo general	14
1.2. Objetivos específicos.	14
2. Marco Teórico	15
2.1. Fundamentos	15
2.1.1. Gas natural.	15
2.1.2. Alistamiento del gas natural.....	15
2.1.3. Sistema comprensión:	16
2.1.4. Tipos de compresores:	18
2.1.4.1 Reciprocantes.....	19
2.1.4.2 Tornillo:	20
2.2. Tipos de gas.	21
2.2.1. Gas seco:	21
2.2.2. Gas húmedo:	22
2.2.3: Gas rico:	24
3. Bases de diseño.	25
3.1. Sistemas de compresión.....	25
3.2. Condiciones de operación.....	26
3.2.1. Condiciones iniciales.....	26

3.2.2. Condiciones etapas de compresión.	27
3.3. Esquemas de compresión.	28
3.3.1. Baja presión.	28
3.3.2. Alta presión.	30
3.3.3. Scrubber de alta presión.	31
3.3.4. Recirculación.	32
4. Metodología.	33
4.1. Selección del gas.	33
4.2. Configuraciones estudiadas.	34
4.2.1. Baja presión.	35
4.2.2. Alta presión.	36
4.2.3. Scrubber de alta presión.	36
4.2.4. Recirculación.	37
4.3. Cuantificación de emisiones.	37
5. Análisis paramétrico.	38
5.1. Baja Presión.	38
5.2. Alta Presión.	39
5.3. Scrubber Alta Presión.	39
5.4. Recirculación.	39
6. Análisis de resultados.	39
6.1 Selección del gas.	40
6.2. Configuraciones estudiadas.	42

6.2.1. Baja presión.	42
6.2.2. Alta presión.....	43
6.2.3. Scrubber de alta presión.....	43
6.2.4. Recirculación.	44
6.3. Cuantificación de emisiones.	45
6.3.1. Nivel de riesgo.	45
6.3.2. Eficiencia del sistema.	46
6.3.3. Reducción de emisiones.....	48
7. Conclusiones.....	50
8. Recomendaciones	51
Referencias Bibliográficas	52

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Calidad del gas.</i>	15
Tabla 2 <i>Condiciones iniciales.</i>	26
Tabla 3 <i>Condiciones interetapa.</i>	27
Tabla 4 <i>Resultados esquemas.</i>	38
Tabla 5 <i>Componentes del gas usado en la simulación.</i>	41
Tabla 6 <i>Propiedades fracción C7+</i>	41

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Tipo de compresores</i>	18
Figura 2 <i>Tipo de pistones</i>	19
Figura 3 <i>Tipo tornillo</i>	20
Figura 4 <i>Envolvente gas seco</i>	22
Figura 5 <i>Envolvente gas húmedo</i>	23
Figura 6 <i>Envolvente gas rico</i>	24
Figura 7 <i>Esquema baja presión</i>	29
Figura 8 <i>Esquema alta presión</i>	30
Figura 9 <i>Esquema scrubber de alta presión</i>	32
Figura 10 <i>Esquema de recirculación</i>	33
Figura 11 <i>Envolvente del gas utilizado</i>	40
Figura 12 <i>Configuración de baja presión</i>	42
Figura 13 <i>Configuración de alta presión</i>	43
Figura 14 <i>Configuración scrubber de alta presión</i>	44
Figura 15 <i>Configuración de recirculación</i>	45
Figura 16 <i>Volumen de condensados</i>	46
Figura 17 <i>Eficiencia de cada sistema</i>	47
Figura 18 <i>Cuantificación de gas venteado</i>	48

Glosario

- Compresor: Un compresor de gas es un motor que permite la entrada controlada de gas en una cámara, el gas se desplaza a través de dicha cámara, donde un mecanismo de desplazamiento actúa para disminuir gradualmente el volumen ocupado como resultado se obtiene un aumento significativo en la presión del gas contenido en la cámara. (Fernández Díez, n.d.)
- Relación de compresión: Es la relación entre la presión de entrada en el compresor y la presión de salida resultante. (*Selección de Sistemas de Compresión de Gas Natural Comprimido.* , 2014)
Esta medida ostenta significativa utilidad en la fase de estudio y diseño de un esquema de compresión.
- Venteo: (Ministerio de minas y energías, 2022)Es el procedimiento a través del cual se elimina el hidrocarburo no deseado liberándolo en la atmósfera mediante una tea, y esto también puede ocurrir en situaciones de fallos o sobrecargas en el sistema.
- Tea: Es un mecanismo que impide la emisión directa de hidrocarburos en la atmósfera; comprende una estructura de antorcha que convierte los desechos en dióxido de carbono (CO₂) o agua (H₂O) antes de ser liberados.(Castro, 2022)

Resumen

Título: Impacto de la configuración de los sistemas de compresión de tres etapas sobre el recobro de líquidos y la reducción de emisiones a la atmósfera.

Autor: Diego Sebastian Buitrago Ardila **

Palabras Clave: Compresión de Gas, Condensados, Emisiones, Sistema en Cascada, Relación de Compresión.

Descripción: El sector hidrocarburos enfrenta desafíos significativos en la descarbonización de procesos, donde los esquemas de compresión destacan como la principal fuente de emisiones de gases al procesar gas. Este estudio se enfoca en analizar 4 modelos de compresión mediante Hysys, utilizando un gas rico altamente condensable por su contenido de fracciones pesadas de hidrocarburos. El objetivo es comparar la eficiencia de cada ajuste en la reducción de gases quemados a la atmósfera.

Los resultados revelan que el sistema en cascada de compresión, con un diseño de tres etapas, demostró eficiencia en la gestión de condensados y reducción de emisiones. Este sistema superó al Scrubber de alta presión y al sistema de baja presión al separar eficazmente los condensados y evitar la quema innecesaria de gas. La selección adecuada del gas y la relación de compresión fueron cruciales para optimizar la planta de compresión de gas y reducir costos.

En conclusión, este estudio destaca la efectividad del sistema en cascada en la gestión de condensados y la reducción de emisiones. Los hallazgos enfatizan la importancia de considerar cuidadosamente la configuración del sistema de compresión y la relación de compresión para mitigar el impacto ambiental en el sector hidrocarburos. La implementación de estos hallazgos puede conducir a una operación más eficiente y sostenible en la industria de hidrocarburos, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y la preservación del medio ambiente.

** Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Programa académico. Director: Manuel Enrique Cabarcas Simancas. Magíster en Ingeniería Química.

Abstract

Title: Impact of three-stage compression system configurations on liquid recovery and atmospheric emissions reduction.*

Author(s): Diego Sebastian Buitrago Ardila**

Key Words: Compression of Gas, Optimization, Condensates, Emissions, Cascade System, Compression Ratio.

Description: The hydrocarbons sector faces significant challenges in process decarbonization, with compression schemes being the main source of gas emissions when processing gas. This study focuses on analyzing four compression models using Hysys, using a rich gas highly condensable due to its heavy hydrocarbon's fractions content. The objective is to compare the efficiency of each adjustment in reducing gases burned to the atmosphere.

The results reveal that the cascade compression system, with a three-stage design, demonstrated efficiency in managing condensates and reducing emissions. This system outperformed the high-pressure Scrubber and low-pressure system by effectively separating condensates and avoiding unnecessary gas burning. Proper selection of gas and compression ratio were crucial to optimizing the gas compression plant and reducing costs.

In conclusion, this study highlights the effectiveness of the cascade system in managing condensates and reducing emissions. The findings emphasize the importance of carefully considering the configuration of the compression system and the compression ratio to mitigate the environmental impact in the hydrocarbons sector. The implementation of these findings can lead to more efficient and sustainable operations in the hydrocarbons industry, contributing to climate change mitigation and environmental preservation.

* Degree Work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Petroleum Engineering. Supervisor: Manuel Enrique Cabarcas Simancas. Master's in chemical engineering.

Introducción

La atmósfera es una capa gaseosa perteneciente al planeta tierra, esta se encuentra constantemente expuesta a diferentes compuestos químicos, aunque presenta adaptabilidad frente a alteraciones cuando existen emisiones en gran cantidad, esta no es capaz de equilibrarse causando daño en su entorno. Las emisiones a la atmósfera se presentan de forma natural en diversos procesos, entre esos la respiración humana. (“Emisiones de Dióxido de Carbono ,” 2023) Sin embargo, existen procesos artificiales generadoras de residuos nocivos para la atmósfera, por eso los diversos campos centran sus esfuerzos en optimizar sus procesos y reducir el impacto ambiental.

Una fuente de emisiones a la atmósfera es el sector de hidrocarburos. Refiriéndose específicamente al sector gas se encuentran componentes como CO₂ CH₄ NO₂ y SO₄ que son liberados al ambiente. (Brady, 2013) Las emisiones de gases pueden ocurrir en cualquier etapa de tratamiento, aunque el causante de un 80% en promedio de esta contaminación es el proceso de compresión. La industria de los hidrocarburos ha realizado esfuerzos para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero, una medida es optimizar el equipo en campo y plantas de tratamiento. (Garcia, 2000) Las mayores emisiones se presentan en la quema de gas proveniente del proceso recolección de líquidos en cada etapa.

El sistema de compresión tiene como objetivo la optimización del transporte y almacenamiento, influyendo en la reducción de costos. Esto con el fin de adecuar el gas a los requerimientos de los camiones cisterna, gaseoductos o tanques de almacenamiento para su venta.

Existen diversos sistemas de compresión, que pueden constar de una a cuatro etapas, la relación de compresión (CR) establece el número de etapas necesarias para poder trabajar las

condiciones establecidas de acuerdo con los requerimientos de la norma o transportador. (UNIDAD 12 COMPRESORES, n.d.) La función vital del CR es optimizar el trabajo de la planta de compresión de gas y reducir riesgos de sobrecarga al sistema o gastos en una etapa innecesaria.

Esta investigación plantea el proceso de compresión de un gas rico con la implementación del simulador HYSYS, debido a las condiciones de operación se tiene un CR adecuado para un sistema de 3 etapas. (Gil, 2013)El enfoque es comparar diversos esquemas de optimización en el sistema de compresión enfocado en la recolección de condensados y como reducir la cantidad de gases que son quemados a la atmósfera.

Durante la compresión del gas, se requieren de ciertos equipos, un separador inicial y en cada etapa se tiene un, compresor, un aroenfriador y un separador. Los separadores buscan remover la fracción condensada del gas para optimizar el proceso, sin embargo, esta pasa por un separador para remover el H₂O, los condensados y gas residual que no es útil para venta, este es enviado directamente a quema para reducir costos de almacenamiento.

1. Objetivos

1.1. Objetivo general.

Evaluar el impacto generado en diferentes esquemas de compresión en sistemas de tres etapas sobre el recobro de líquidos y la reducción de emisiones a la atmósfera en gases naturales con alto GPM.

1.2. Objetivos específicos.

Realizar una revisión bibliográfica relacionada con los sistemas de compresión y su desempeño en plantas de gas natural.

Construir el modelo de simulación en Hysys de las diferentes configuraciones comerciales de sistemas de compresión de gas natural para gases con alto GPM.

Cuantificar las emisiones de gases efecto invernadero y la producción de líquidos del gas natural teniendo en cuenta las diferentes variables de proceso que intervienen en los sistemas de compresión de gas natural.

2. Marco Teórico.

2.1. Fundamentos

2.1.1. Gas natural.

Se trata de una mezcla de hidrocarburos gaseosos en su mayoría compuesta por metano (CH₄), etano (C₂H₆), propano (C₃H₈) y otros hidrocarburos de mayor peso molecular en proporciones menores. Cuando esta mezcla de gases consiste predominantemente en estos componentes, se clasifica como gas seco. No obstante, si contiene una mayor proporción de hidrocarburos más pesados, se denomina gas rico. (Ramírez, 2012) Esto se debe a que, en condiciones de temperatura y presión moderadas, estos hidrocarburos pueden someterse a una transformación hacia el estado líquido.

2.1.2. Alistamiento del gas natural.

El propósito de la extracción del gas a la superficie radica en su ulterior comercialización y empleo, tanto en entornos domésticos como industriales. (CREG, 2007) Sin embargo, a fin de suministrar el gas a las entidades distribuidoras autorizadas, es necesario satisfacer las siguientes exigencias:

Tabla 1

Calidad del gas.

Especificaciones	Unidades
Máx. Poder calorífico	1.150 BTU/ft ³
Min. Poder calorífico	950 BTU/ft ³
Contenido de líquido	0%
Contenido Máx. N ₂	3%

Contenido Máx. CO ₂	2%
Contenido Máx. H ₂ S	0.25granos/100ft
Contenido Máx. Azufre	1 granos/100ft

Nota. En la tabla se muestra las especificaciones en las que se debe encontrar un gas, para poder ser comercializado de forma estándar. Adaptado de: d-017 calidad en transporte de gas. CREG. (2007) <https://onx.la/953df>

Sin embargo, previo al envío del gas a la instalación de tratamiento, es necesario llevar a cabo su transporte desde el pozo. Dependiendo de su ubicación, este transporte puede realizarse a través de gaseoductos, buques o camiones. No obstante, con el propósito de optimizar tanto el proceso de almacenamiento como el de transporte, es esencial aprovechar de manera óptima el volumen que ocupa el gas. Esto se logra mediante un proceso de compresión que reduce su volumen.

2.1.3. Sistema compresión:

El propósito subyacente de la compresión de un gas radica en la reducción volumétrica que dicho gas ocupa. No obstante, esta reducción se traduce en un aumento correspondiente en la presión del gas. Es crucial destacar que, con miras a garantizar la seguridad y confiabilidad de los equipos empleados, cualquier modificación en la presión debe llevarse a cabo de manera gradual y secuencial, en lugar de adoptar cambios abruptos. (J. Rodríguez, 2021) Para lograr esto de manera efectiva, se recurre a la implementación de sistemas de múltiples etapas.

Con el fin de regir este proceso de compresión y establecer los parámetros operativos adecuados para cada configuración, se ha formulado la noción de la Relación de Compresión (RC).

Esta relación determina los intervalos de operación para cada esquema de compresión, asegurando que el sistema opere dentro de sus límites de capacidad. (Gil, 2013) Es esencial evitar que el sistema se vea sometido a una RC excesivamente alta ($RC > 4$), lo que podría ocasionar forzamientos indeseados. Del mismo modo, se debe evitar un sobredimensionamiento del sistema para la tarea en cuestión, lo que se manifestaría mediante una RC demasiado baja ($RC < 2$). Internacionalmente, los sistemas de compresión pueden constar de entre una y cuatro etapas, variando según las condiciones operativas requeridas. Para realizar el cálculo del número de etapas se ha establecido la siguiente fórmula:

$$CR: \quad \#Etapas \sqrt{\frac{Presión\ final_{[psia]}}{Presión\ inicial_{[psia]}}}$$

Debido a la posibilidad de que el gas transporte consigo líquidos y condensados, es imperativo aplicar una medida de precaución previa a su entrada en el compresor. Esto implica la instalación de un separador, cuya función radica en la eliminación de los líquidos y condensados presentes en el gas. Al llegar a la etapa de compresión, el gas experimenta un incremento en su temperatura, la cual debe ser regulada antes de proseguir con el proceso. Esta regulación térmica se logra mediante la intervención de un intercambiador de calor ("cooler"). (*COMPRESION Y TRATAMIENTO DEL GAS*, 2008) Esta etapa es esencial independientemente de si el gas está destinado para su almacenamiento o si requiere de etapas adicionales para alcanzar la presión deseada.

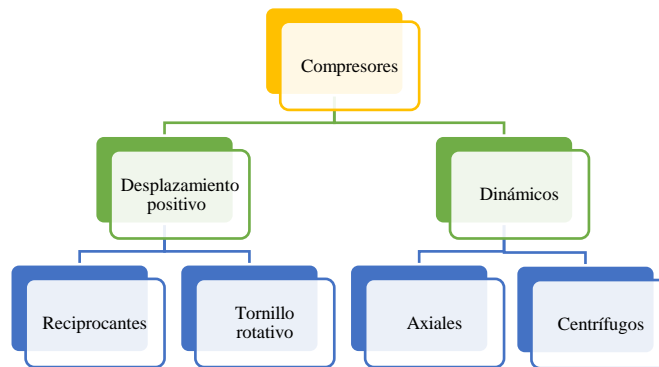
Es fundamental, en cada etapa subsiguiente, asegurarse de que los líquidos y condensados que puedan estar presentes sean separados de acuerdo con las condiciones recién establecidas para el gas.

2.1.4. Tipos de compresores:

(Tipos de Compresores, 2019) En la actualidad existen diversos tipos de compresores los cuales se adaptan a las necesidades operacionales y adaptabilidad del lugar donde va a hacer instalado, debido a esto existe la siguiente clasificación de tipos de compresores:

Figura 1

Tipo de compresores.



Nota. En la imagen se puede observar la clasificación de los compresores de acuerdo con su funcionamiento y tipo de movimiento. Tomado de: Castillo, G. (n.d.). Compresores reciprocantes. Scribd. <https://onx.la/9830a>.

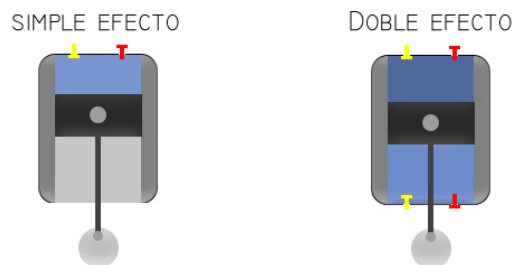
En este estudio de investigación, centraremos nuestra atención en la aplicación de compresores de desplazamiento positivo. Estos compresores se utilizan con frecuencia cuando se trata de gases condensables debido a sus propiedades distintivas. El principio subyacente en el funcionamiento de estos compresores implica la reducción del volumen ocupado por el gas

mediante la aplicación de fuerza mecánica, este compresor posee una extensa capacidad operativa, ya que puede comprimir desde 0 psi hasta 54000 psi sin limitaciones.

2.1.4.1 Reciprocantes. Este tipo de compresor es el más antiguo, el cual consiste en un pistón que es el encargado de ejercer fuerza sobre el gas logrando así su compresión, el pistón puede ser de dos clases:

Figura 2

Tipo de pistones.



Nota. En la imagen se puede observar el funcionamiento de cada uno de los tipos de pistón en el mercado. Tomado de: Admin. (2023, May 23). Tipos de compresores de aire - Tecnología en Compresión. Tecnología En Compresión. <https://onx.la/d589a>

- Simple efecto: Estos compresores operan en una sola dirección, lo que implica que el pistón está ubicado en una sola cámara o cilindro donde el gas es comprimido. Para reducir la fricción en el sistema, existen dos tipos de compresores: los lubricados y los no lubricados. (Arroyo, n.d.) Los compresores lubricados emplean una sustancia viscosa, como aceite, que se desplaza a lo largo del cilindro detrás del pistón. Este pistón está equipado con un sello que aísla la cámara de la biela, lo que garantiza una lubricación constante de las paredes. En contraste, los compresores no lubricados se utilizan cuando la contaminación del gas o líquido a comprimir

podría ser perjudicial. En estos sistemas, el pistón está revestido de un material que permite la fricción sin afectar el funcionamiento del sistema ni reducir su vida útil.

- Doble efecto: Estos optimizan el proceso al realizar la compresión del gas en ambas direcciones dentro de la cámara, lo que resulta en una capacidad de trabajo mayor y una mayor adaptabilidad en los parámetros de operación. Debido al diseño de este compresor, es esencial la implementación de sistemas no lubricados para asegurar un desplazamiento eficiente y una adecuada lubricación durante todo el proceso.

2.1.4.2 Tornillo: Este tipo de compresor está compuesto por dos tornillos en su interior, donde se logra aumentar la presión al permitir que el gas o líquido ingrese a través del engranaje entre estos tornillos.

Figura 3

Tipo tornillo.



Nota. La imagen presenta el funcionamiento de un compresor tipo tornillo, como es la dinámica de rotación en su interior. Tomado de: <https://onx.la/3a573>

[14] A medida que los tornillos se mueven, el espacio entre ellos se reduce de manera proporcional dentro de la cámara, lo que facilita la compresión. Un aspecto importante es que estas piezas no experimentan fricción entre sí ni con las paredes, lo que elimina la necesidad de sistemas de lubricación. Esto hace que estos compresores sean altamente estables en su tarea de compresión,

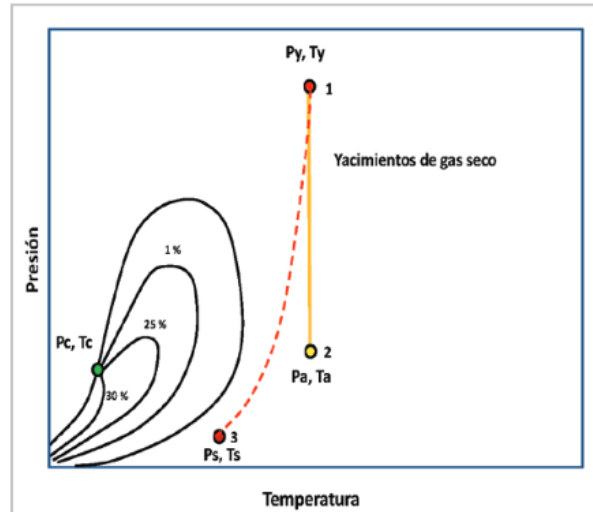
ya que comprimen el gas durante su desplazamiento, lo que resulta en una mayor capacidad de trabajo y un flujo de descarga más amplio.

2.2. Tipos de gas.

El objetivo fundamental de este proyecto consistió en evaluar el impacto que las etapas de compresión tienen sobre los líquidos que se condensan, así como en cómo cada configuración genera cambios en la cantidad de líquidos y emisiones que se emiten al medio ambiente. Un factor crítico para considerar fue el tipo de gas que se utilizaría como base para los esquemas de compresión, esto debido a las características específicas de los tipos de gas en relación con su comportamiento frente a la variación de presión y temperatura, así como su contenido de líquidos. (González et al., n.d.) Existen principalmente tres clasificaciones:

2.2.1. Gas seco:

El gas seco, como se conoce comúnmente en la industria, está compuesto principalmente por fracciones livianas de crudo en el rango de C1 a C3, con la ausencia de fracciones pesadas. Esta composición confiere al gas un comportamiento monofásico, permaneciendo en estado gaseoso desde su existencia en el yacimiento, durante el proceso de producción y las etapas de preparación en superficie. Esta característica se refleja claramente en la envolvente del gas, donde se destacan tres puntos de operación clave: el primer punto representa las condiciones actuales del yacimiento, el segundo punto representa las condiciones de abandono o agotamiento del yacimiento, y el tercer punto representa las condiciones en superficie. (León et al., 2018)

Figura 4*Envolvente gas seco.*

Nota. La imagen presenta el comportamiento de un gas seco en relación con las variaciones de presión y temperatura. Tomado de: <https://onx.la/6a0d6>

En la gráfica se observa claramente cómo, independientemente de las condiciones a las que esté expuesto el gas, este se mantiene fuera de la zona de dos fases, mostrando un comportamiento gaseoso constante. Los puntos de operación del gas se encuentran siempre en esta región gaseosa, sin la presencia de condensados o líquidos.

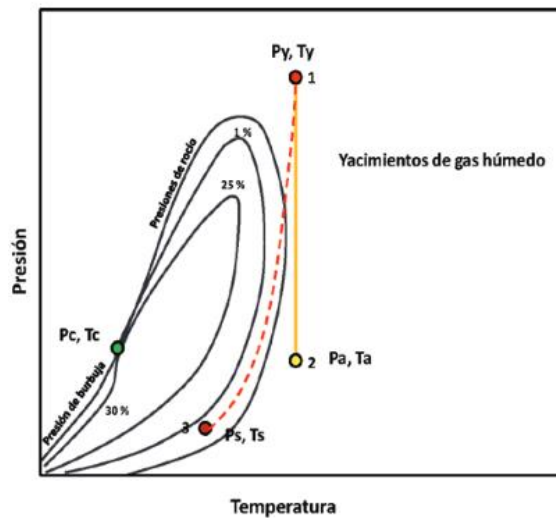
2.2.2. Gas húmedo:

El gas húmedo se caracteriza principalmente por su elevado contenido de fracciones C1, que supera el 90% de sus componentes. Además, se observa una leve presencia de fracciones pesadas de hidrocarburos en su composición. Esta mezcla permite que el gas se mantenga en una sola fase en el yacimiento. Sin embargo, durante las etapas de producción y preparación, se permite la presencia de dos fases, lo que resulta en la aparición de condensados livianos en los separadores,

representando menos del 2% de la relación gas-líquido. Este comportamiento se refleja en la envolvente del gas, donde se destacan tres puntos principales: 1. condiciones del yacimiento, 2. condiciones de abandono o agotamiento, y 3. condiciones en superficie. (León et al., 2018)

Figura 5

Envolvente gas húmedo.



Nota. La imagen presenta el comportamiento de un gas húmedo en relación con las variaciones de presión y temperatura. Tomado de: <https://onx.la/6a0d6>

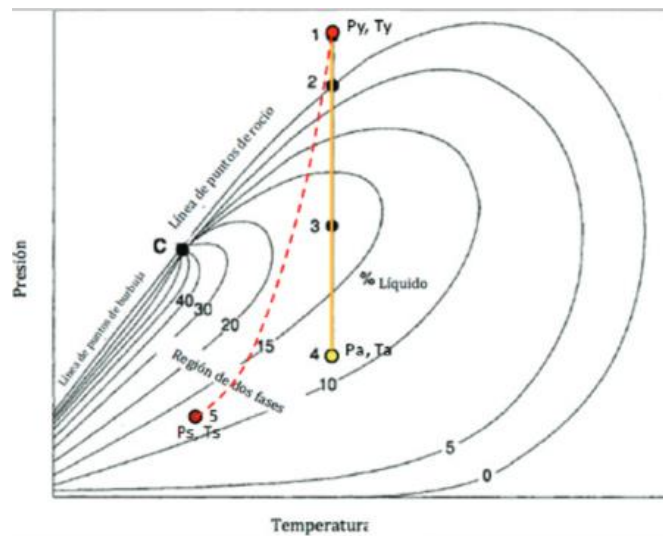
En el gráfico se puede observar cómo la presencia de dos fases en el yacimiento es inexistente, debido a que la temperatura a la cual se encuentra el gas en el subsuelo corresponde a la zona de fase gaseosa. Es importante destacar que, al inicio del proceso de producción, cuando el gas entra en condiciones de temperatura y presión menores que las del yacimiento, se encuentra en estado bifásico.

2.2.3: Gas rico:

El gas rico se caracteriza principalmente por su contenido de fracciones C1, que es inferior al 80% en comparación con los dos tipos anteriores. En su composición, se observa una alta presencia de fracciones pesadas de hidrocarburos, lo que permite que el gas se mantenga en una sola fase en el yacimiento. Sin embargo, durante las etapas de producción y preparación, se permiten dos fases, lo que resulta en la presencia de condensados pesados en los separadores. Este tipo de gas, en la primera etapa de separación, suele tener un alto contenido de condensados, superando el 10% de la relación gas-líquido. Este comportamiento se puede observar en la envolvente del gas, donde se destacan tres puntos principales: 1) condiciones del yacimiento, 2) condiciones de abandono o agotamiento, y 3) condiciones en superficie (León et al., 2018)

Figura 6

Envolvente gas rico.



Nota. La imagen presenta el comportamiento de un gas rico en relación con las variaciones de presión y temperatura. Tomado de: <https://onx.la/6a0d6>

En la envolvente se puede observar cómo la presencia de dos fases en el yacimiento es posible durante la etapa de depletamiento, debido al cambio de presión en el interior del yacimiento. Sin embargo, inicialmente, se presenta únicamente una fase gaseosa. Es importante destacar que, al inicio del proceso de producción, cuando el gas comienza a estar expuesto a condiciones menores que las del yacimiento, se encuentra en estado bifásico.

3. Bases de diseño.

El objetivo general del proyecto es evaluar el impacto de cada una de las cuatro configuraciones planteadas sobre el recobro de líquidos y las emisiones a la atmósfera. En este capítulo, se abordan los fundamentos teóricos y metodológicos implementados durante el desarrollo del proyecto, se presentan las hipótesis planteadas y se establecen las condiciones de operación para las diferentes configuraciones.

3.1. Sistemas de compresión.

Para establecer estos datos es importante conocer el funcionamiento de un esquema de compresión. Los modelos de compresión pueden ser de una o cuatro etapas según las necesidades de cada sistema, basándose en la relación de compresión previamente descrita en este documento. Según el número de etapas a implementar, algunos modelos requieren mayor cantidad de cálculos y precisiones para realizar el diseño (Jarunthammachote, 2022).

La relación de compresión ideal para un esquema de compresión es cercana a 3. Una vez conocido el número de etapas, se realizan los ajustes necesarios. Para los modelos de una sola etapa, este es el único cálculo necesario debido a la sencillez del diseño. En cambio, para los modelos de dos o más etapas, se establece un término llamado presión interetapa, que es la presión

que debe tener cada etapa del proceso. Lo relevante aquí es que cada etapa del proceso mantiene la relación de compresión sin importar si es un modelo de dos o cuatro etapas (López et al., 2020).

3.2. Condiciones de operación.

El planteamiento de estas condiciones es esencial, ya que sienta las bases para todo el proyecto. Cada configuración y modelo se basó en los valores presentados en esta sección, lo que permitió una evaluación equilibrada del comportamiento y el impacto que cada esquema tiene sobre la eficiencia en la reducción de emisiones y la cantidad de condensados generados (Luis & Bauza, 2022).

3.2.1. Condiciones iniciales.

Para este proyecto, se utilizó HYSYS como simulador para modelar un esquema de compresión trifásico. Este software brinda la capacidad de evaluar tanto el recobro de líquidos como las emisiones a la atmósfera. Las condiciones iniciales consideradas para este proceso fueron las siguientes:

Tabla 2

Condiciones iniciales.

Propiedad	Valor	Unidad
Caudal	150	MMSCFD
Presión	100	psig
Temperatura	60	°F

Nota. La tabla muestra las condiciones iniciales a las que se encuentra el gas al ingresar al sistema. Adaptado de: Pérez, A. (n.d.). 6. Properties of gas condensates - reservoir fluid studies. Scribd. <https://onx.la/e730c>.

Estas condiciones se basaron en la temperatura ambiente media de la zona de donde proviene el gas. Este valor es crucial, ya que es el punto de partida para describir el comportamiento del gas durante el proceso de compresión. Además, se consideró una presión genérica de entrada a una estación, tomando en cuenta las condiciones típicas de operación de estaciones en este tipo de yacimiento. (Jarungthammachote, 2022) El caudal seleccionado representa las condiciones de producción esperadas y permite comprender cómo varía la cantidad de condensados para cada una de las configuraciones.

3.2.2. Condiciones etapas de compresión.

Establecer las condiciones de operación dentro del esquema de compresión se realiza mediante la implementación de cálculos para establecer los valores de cada propiedad, que permitan el cumplimiento de la finalidad de la planta compresora: el incremento de presión de 100 psig a 2500 psig (Gil, 2013). Durante el desarrollo de los modelos de compresión, se tuvieron en cuenta las siguientes variables:

Tabla 3

Condiciones interetapa.

Propiedad	Valor	Unidad
P_{entrada}	114.7	psia
P_{descarga}	2514.7	psia
ΔP	5	psi
$P_{\text{etapa 1}}$	323.29805	psia
$P_{\text{etapa 2}}$	897.16774	psia
CR	2.819	

Nota. Se presenta las condiciones establecidas para el desarrollo de los modelos de compresión trifásico en cada una de las configuraciones. Fabricación propia.

Para el objetivo de este sistema de compresión, que es incrementar la presión de 114.7 psia a 2514.7 psia, se tiene una relación de compresión de 2.819. Esta relación asegura que el diseño del esquema de compresión no esté sobredimensionado ni esté por debajo de condiciones óptimas de operación (López et al., 2020). Durante el proceso de compresión, el gas incrementa su temperatura, por lo que se somete a un proceso de enfriamiento mediante un enfriador para mantener un equilibrio en el sistema. La temperatura establecida es de 70°F, una temperatura promedio para los tanques de almacenamiento. Al someter el gas a esto, se presenta una expansión del gas en promedio de 5 psi para cada etapa (Jarunghammachote, 2022).

3.3. Esquemas de compresión.

El objetivo principal de este proyecto es investigar el impacto de la reducción de emisiones durante los procesos de compresión de gas, mediante un manejo adecuado del recobro de líquidos. Durante el desarrollo de este trabajo, se ha tenido la oportunidad de comparar cuatro configuraciones diferentes, cada una con sus propias características (Luis & Bauza, 2022). Los cuatro modelos son:

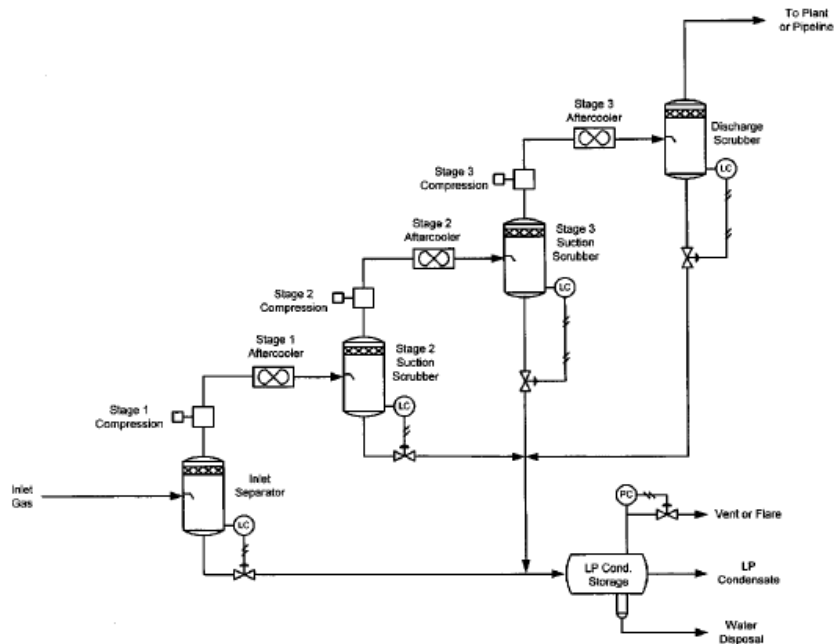
3.3.1. Baja presión.

El esquema de baja presión consiste en el almacenamiento de las líneas de líquidos condensados resultantes de cada etapa en condiciones atmosféricas, mediante la implementación de válvulas que permiten la liberación de presión para mantener un equilibrio en el sistema. Además, estas líneas son dirigidas a un separador trifásico donde el agua es canalizada hacia un

tanque de H₂O residual, el gas es conducido para ventearse y las trazas de crudo resultantes son almacenadas en un tanque especial (Pennybaker, 2000).

Figura 7

Esquema baja presión



Nota. Este diagrama representa un sistema de compresión de 3 etapas con un recobro de líquidos en una configuración de baja presión. Tomado de: <https://onx.la/0635f>

Es importante destacar que este sistema sirve como base para otros esquemas de compresión, ya que, por cuestiones de equilibrio de presiones, la primera etapa de separación siempre se realiza a condiciones atmosféricas. Esta configuración puede ser implementada simultáneamente con las siguientes configuraciones del sistema.

Características:

- Implementa un sistema de almacenamiento a presión atmosférica (25 psig) para líquidos condensados.
- Utiliza válvulas para liberación de presión y separación trifásica.
- Menor costo y evita regulaciones de la OSHA.

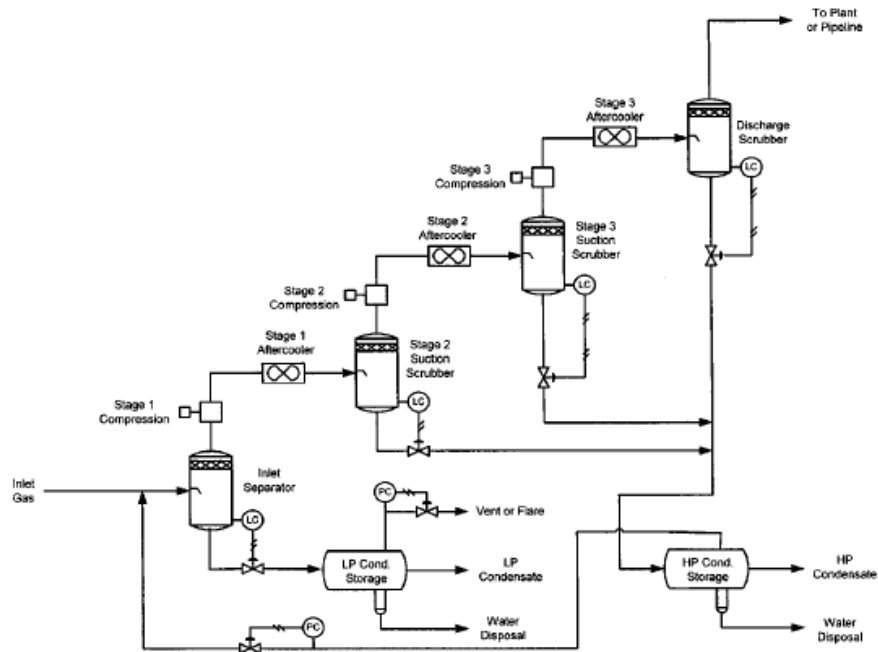
Desventajas:

- Quema directa de gas condensado, reduciendo la eficiencia.
- Riesgo de congelamiento en cambios de temperatura.

3.3.2. Alta presión.

Figura 8

Esquema alta presión.



Nota. Este diagrama representa un sistema de compresión de 3 etapas con recobro de líquidos en una configuración de alta presión. Tomado de: <https://onx.la/0635f>

El esquema de alta presión maneja una presión mayor (30 a 200 psig), permitiendo el reingreso de la corriente de gas en el sistema. La primera etapa de separación se maneja de manera similar al esquema de baja presión, mientras que las etapas subsiguientes se manejan a una presión adecuada para lograr el equilibrio en el sistema. Se utiliza un separador trifásico para el tratamiento de los líquidos. (Pennybaker, 2000)

Características:

- Recircula el gas para aumentar eficiencia y reducir emisiones.
- Presión de 30 a 200 psig para manejo de gas y líquidos.
- No requiere sistema de purga y contribuye a la reducción de venteo. (Moreno, 2009).

Desventajas:

- Cumplimiento de regulaciones de la OSHA.
- Aumento en producción de líquidos condensados y costos asociados.

3.3.3. Scrubber de alta presión.

Este esquema es similar al de alta presión, pero utiliza un scrubber en lugar de un separador trifásico para el tratamiento de los líquidos. El gas recirculado es enviado nuevamente al sistema de compresión, mientras que los líquidos son enviados al separador de baja (Pennybaker, 2000).

Características:

- Utiliza scrubber para tratamiento de líquidos.
- Mayor eficiencia y volumen de gas disponible para venta.
- No requiere tanques de alta presión ni sistema de control de procesos (Carrillo, 2007).

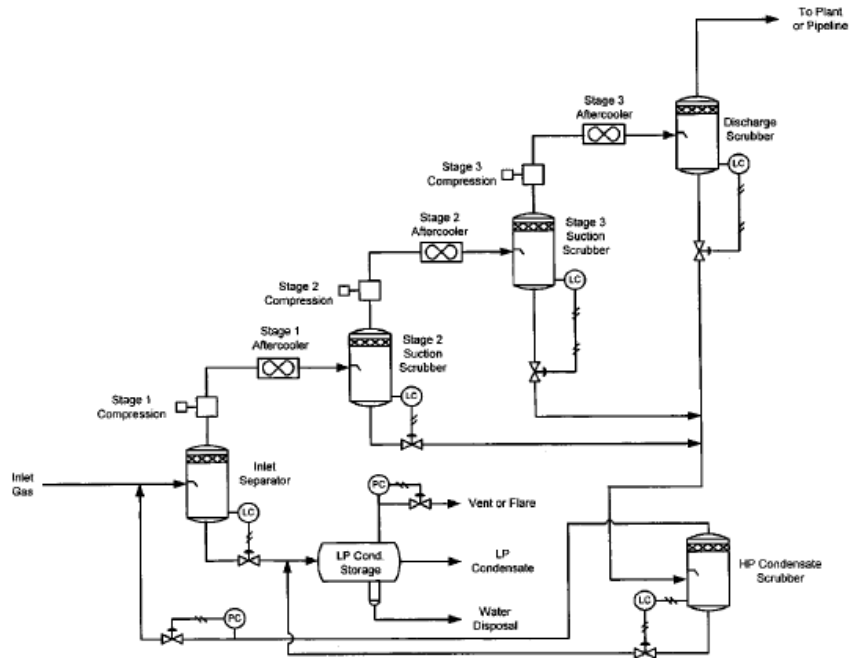
Desventajas:

- Posible venteo de gas en tanque de baja presión.

- Mayor volumen de líquidos para almacenar.

Figura 9

Esquema scrubber de alta presión.



Nota. Este diagrama representa un sistema de compresión de 3 etapas con recobro de líquidos en una configuración de scrubber de alta presión. Tomado de: <https://onx.la/0635f>

3.3.4. Recirculación.

El esquema de recirculación aprovecha las líneas de líquidos en cada etapa, excepto la primera, que se mantiene como en el esquema de baja presión. Utiliza válvulas para ajustar la presión a la etapa anterior y reduce significativamente el volumen de condensados producidos durante el proceso de compresión (Pennybaker, 2000).

Características:

- Aprovecha líneas de líquidos en cada etapa.

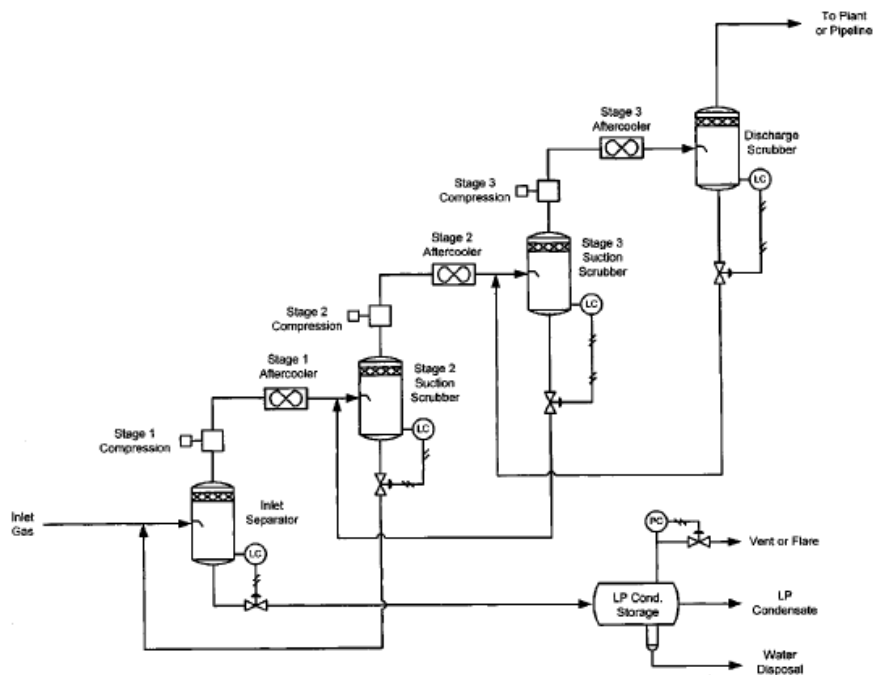
- Reduce volumen de condensados y emisiones a la atmósfera.
- Almacenamiento en tanques atmosféricos.

Desventajas:

- Espacio reducido en plantas compresoras existentes.

Figura 10

Esquema de recirculación.



Nota. Este diagrama representa un sistema de compresión de 3 etapas con recobro de líquidos en una configuración de recirculación. Tomado de: <https://onx.la/0635f>

4. Metodología.

4.1. Selección del gas.

Para este proyecto, se buscó un gas rico en fracciones pesadas de crudo debido a su alta tendencia a condensarse a presiones y temperatura ambiente. Se seleccionó un gas de un campo

ubicado en Estados Unidos, al cual no se le asignará un nombre debido a la privacidad asociada con esta información. Sin embargo, se obtuvo una cromatografía del crudo y gas producido en esta zona, el cual contiene componentes que lo clasifican como un gas rico, especialmente con fracciones C7+. Este análisis proporcionó la información necesaria para cargar los datos en el simulador y obtener resultados adecuados para el comportamiento de este gas. (*THE PROPERTIES OF PETROLEUM FLUIDS*, 2017)

Para modelar la corriente de gas, HYSYS cuenta con un amplio número de componentes en sus librerías, lo que permite describir adecuadamente el comportamiento de un gas o fluido. En este caso, se trabajó con la fracción C7+ que agrupa las fracciones de carbono desde C7 en adelante, las cuales se agrupan debido a que su porcentaje es mínimo. Para incorporar este componente al simulador, se utilizó la capacidad de HYSYS para generar componentes hipotéticos basados en los valores de densidad y peso molecular obtenidos en los resultados de laboratorio para esta fracción. Con esta información, el simulador realizó la estimación de las demás variables necesarias para la simulación. (N. Rodríguez & Godoy, n.d.)

4.2. Configuraciones estudiadas.

Durante la utilización de HYSYS como simulador de procesos y con base en la ecuación de estado Peng-Robinson para este trabajo, se implementó un esquema de tres etapas de compresión basado en la relación de compresión (RC) para elevar la presión inicial del gas de 100 psig a 2500 psig, con una temperatura inicial de 60°F y 75°F posterior a cada etapa de compresión. Se consideraron aspectos de seguridad al seleccionar un número adecuado de etapas sin sobreestimar el diseño del sistema con más etapas de las necesarias. Antes de ingresar al sistema de compresión, el gas se dirigió a una primera etapa de separación implementando un separador

bifásico para retirar los líquidos presentes. Posteriormente, en un proceso de saturación con agua a las mismas condiciones de presión y temperatura, antes de ingresar se ingresa por un primer separador para remover cualquier líquido resultante de la saturación, a continuación, se circuló por cada etapa de la planta, donde cada una consta de un compresor encargado de llevar el gas a la presión establecida en cada paso. Luego, el gas ingresó a un intercambiador de calor para mantener una temperatura estable en todo el sistema y, finalmente, pasó por un scrubber para remover los líquidos condensados como resultado del incremento de la presión.(Casale & Strada, n.d.)

Una vez se establecieron los casos a comparar, se plantearon 4 esquemas de mejora u optimización en las líneas de líquidos resultantes de cada etapa, obtenidas mediante los Scrubbers. El objetivo era reducir la cantidad de gas generado al llevar los líquidos a la presión requerida para almacenamiento o transporte. Los siguientes son las configuraciones estudiadas: Baja presión, alta presión, Scrubber alta presión y recirculación en la línea de condensados.

4.2.1. Baja presión.

La selección de este esquema se realizó para evitar los riesgos que implica el manejo de líneas de alta presión, teniendo un manejo simplificado con la línea de líquidos. (Pennybaker, 2000) Como base para este esquema, se consideró el almacenamiento de las líneas en un tanque a presión ambiente (25 psig), utilizando válvulas en cada línea de líquidos en los separadores bifásicos para liberar la presión excedente proveniente del sistema. Posteriormente, las líneas fueron introducidas en un separador trifásico para separar las trazas de crudo, agua y gas presente. Este último gas se envió a la línea de venteo.

4.2.2. Alta presión.

Esta configuración se diseñó considerando que al manejar los líquidos a mayor presión se da un mejor aprovechamiento de la transformación o generación de gas reingresando este nuevamente al sistema, aunque implica los riesgos asociados al manejo de altas presiones. Este esquema integra el principio de la configuración previa para la primera etapa de separación, añadiendo una línea similar ajustada a una mayor presión de 200 psig para el resto de las etapas. (Pennybaker, 2000) Este ajuste se logró mediante la implementación de válvulas de descarga en cada línea de condensados. Como parte final del esquema, las líneas de igual presión fueron introducidas en diferentes separadores para separar las trazas de crudo, agua y gas presente. En el separador de alta presión, el gas resultante es recirculado por todo el sistema de compresión, mientras que el gas proveniente del separador de baja presión se envió a la línea de venteo.

4.2.3. Scrubber de alta presión.

Este esquema combina los dos estudiados anteriormente, con la ventaja de no depender del almacenamiento de los líquidos en alta presión. La configuración de este sistema se basa en dejar el mismo esquema para la primera etapa de separación realizada en el sistema de baja presión y se añade una línea de alta presión (200 psig) en las líneas de líquido para las demás etapas con un ajuste en el modelo. (Pennybaker, 2000) En este esquema, estas líneas son dirigidas a un separador bifásico; la línea de gas resultante de este proceso es dirigida al ingreso del sistema para un reproceso con la finalidad de un aumento en la eficiencia del sistema. Por otro lado, la línea de líquido es dirigida a una válvula para liberar la presión hasta ambiente (25 psig) y poder unirla al sistema de baja presión, y finalmente pasa por un separador trifásico obteniendo las trazas de crudo, agua y el gas de venteo.

4.2.4. Recirculación.

El principio de este sistema se basa en el aumento de la eficiencia del esquema de compresión para un mayor aprovechamiento del gas y reducir la cantidad de condensados generados en este proceso. Como base se tomó la misma configuración del esquema de baja presión para la primera etapa de separación y posteriormente se realizó el ajuste individualmente para cada línea de líquidos resultante de cada etapa en los separadores bifásicos. (Campbell, 2017) Posteriormente, se pasa por una válvula para liberar la presión a un nivel equivalente al de la etapa anterior para poder recircular el gas. De la primera etapa de separación se procedió a ingresar la línea de líquidos a un separador trifásico obteniendo las trazas de crudo, agua y el gas de venteo.

4.3. Cuantificación de emisiones.

El objetivo fundamental de este proyecto es determinar el impacto de las configuraciones para las condiciones específicas del sistema y el tipo de gas seleccionado. Para lograrlo, se establecieron los siguientes criterios:

- Nivel de riesgo: Se priorizó la selección de esquemas que operen a menores presiones con el fin de minimizar la exposición a riesgos adicionales.
- Eficiencia del sistema: Se analizó el comportamiento de cada sistema para obtener mayor aprovechamiento del gas para su venta o uso, reduciendo así la cantidad de condensados.
- Reducción de emisiones: Se cuantificó la cantidad de gas producido para quema en cada configuración, para comparar el rendimiento de cada esquema para las condiciones planteadas.

5. Análisis paramétrico.

El análisis paramétrico se realizó para comparar el impacto de las diferentes configuraciones de compresión en el gas estudiado. Se utilizaron condiciones constantes: caudal de entrada de 150 MMSCFD y temperatura inicial de 60 °F. Se mantuvo la temperatura entre etapas en 75 °F. El objetivo común fue elevar la presión desde 100 psig hasta 2500 psig en todos los esquemas. Las variables analizadas fueron:

- Gas destinado a la venta
- Gas destinado al venteo
- Potencia requerida (HP)
- Cantidad de condensados (trazas de crudo y H₂O)

Tabla 4

Resultados esquemas.

Característica	Baja presión	Alta presión	Scrubber Alta P.	Recirculación
Gas Venta [MMSCFD]	149.5633566	149.5605835	149.5605835	149.5649069
Gas Venteo [SCFD]	861.15	0	1016.770797	109.8775854
hP	25093.72379	25053.403	25053.403	25094.4136
hP/MMSCFD	167.7798918	167.5134077	167.5134077	167.7827648
Condensados	42.25225787	45.80956161	45.24528097	41.46185292
Trazas de crudo [bl/d]	3.963118375	7.497660259	6.958598161	3.18975586
H ₂ O [bl/d]	38.28913949	38.31190135	38.28668281	38.27209706

Nota. La tabla muestra la cuantificación de las características planteadas para cada una de las configuraciones analizadas. Tomado de: Resultados hysys.

Observaciones y Comparaciones

5.1. Baja Presión

- Quema de 861 SCFD de gas diariamente, impacto directo en la atmósfera.

- Proporción de 1/9 entre trazas de crudo y agua en los condensados.

5.2. Alta Presión

- Venteo de gas reducido a 0 SCFD, todo el gas es recirculado.
- Eficiencia aumentada, 0.266 HP menos por cada MMSCF producido.
- Proporción de 1/5 entre trazas de crudo y agua en los condensados.

5.3. Scrubber Alta Presión

- Incremento de venteo a aproximadamente 1016 SCFD debido a comportamiento del gas en la envolvente.
- Proporción de 1/6 entre trazas de crudo y agua en los condensados.

5.4. Recirculación

- Reducción significativa en la cantidad de hidrocarburos condensados.
- Proporción de 2/25 entre trazas de crudo y agua en los condensados.
- Reducción en emisiones a la atmósfera, aproximadamente 109.9 SCFD.
- Almacenamiento de líquidos en tanques de presión atmosférica.

Este análisis paramétrico permitió comprender el comportamiento de cada configuración en términos de eficiencia y emisiones. La recirculación mostró ser la más eficaz en la reducción de condensados y emisiones, junto con un almacenamiento más eficiente.

6. Análisis de resultados.

El objetivo principal de este proyecto fue evaluar el impacto de las diferentes configuraciones propuestas para un esquema de compresión bajo condiciones de operación similares. Se buscaba determinar si es significativa la instalación de un esquema que requiera un mayor número de equipos o implique riesgos por almacenamiento a altas presiones. Es importante

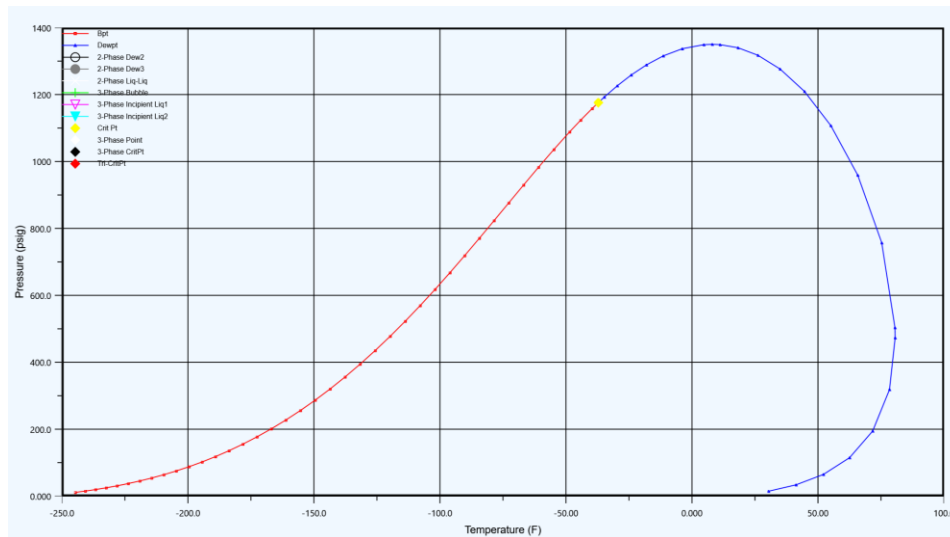
destacar que el estudio económico fue excluido, ya que este proyecto se enfocó en las variables de eficiencia y optimización del proceso de compresión, sin considerar la relación costo/beneficio de cada sistema.

6.1 Selección del gas.

Se optó por utilizar gas rico para este estudio debido a su alto contenido en fracciones de hidrocarburos, con la presencia adicional de cadenas pesadas de hidrocarburos C7+. Estos componentes tienen la propiedad de ser condensables a temperaturas ambiente de 70°F ~ 80°F y se presentan a altas presiones. Este comportamiento puede observarse en su envolvente.

Figura 11

Envolvente del gas utilizado.



Nota. En la gráfica se observa el comportamiento de la envolvente del gas utilizado para realizar este proyecto. Adaptado: Hysys.

Se trabajó con el gas proveniente del campo en Estados Unidos, ya que permitió llevar a cabo el análisis con un gas existente que cumplía con los requisitos de tener un alto contenido de

líquidos (condensados) durante el proceso de compresión. Esta elección nos permitió conocer el comportamiento de cada configuración de manera cercana a la realidad. La composición de este gas es la siguiente:

Tabla 5

Componentes del gas usado en la simulación.

CO ₂	N ₂	C ₁	C ₂	C ₃	iC ₄	nC ₄	iC ₅
0.0265	0.0058	0.7912	0.1144	0.0408	0.0045	0.0083	0.0022
nC ₅	C ₆	C ₇	C ₇₊	C ₈	C ₉	C ₁₀	
0.0016	0.0013	0.0009	0.0017	0.0005	0.0002	0.0001	

Nota. La tabla tiene la cromatografía del gas seleccionado para poder realizar la simulación adecuada del proceso. adaptado de: Pérez, A. (n.d.). 6. Properties of gas condensates - reservoir fluid studies. Scribd. <https://onx.la/e730c>.

Para el modelado de la fracción C₇₊ en HYSYS, se utilizaron los valores de peso molecular y gravedad específica descritos en el laboratorio. Estos parámetros permitieron generar una fracción hipotética dentro del simulador, que representó con precisión las propiedades de la fracción C₇₊ en el gas rico seleccionado para este estudio.

Tabla 6

Propiedades fracción C₇₊

Propiedad	Valor
Y	0.8295
MW	158.5

Nota. La tabla muestra las propiedades requeridas para el modelamiento de la fracción C7+ en hysys adaptado de: Pérez, A. (n.d.). 6. Properties of gas condensates - reservoir fluid studies.

Scribd. <https://onx.la/e730c>

6.2. Configuraciones estudiadas.

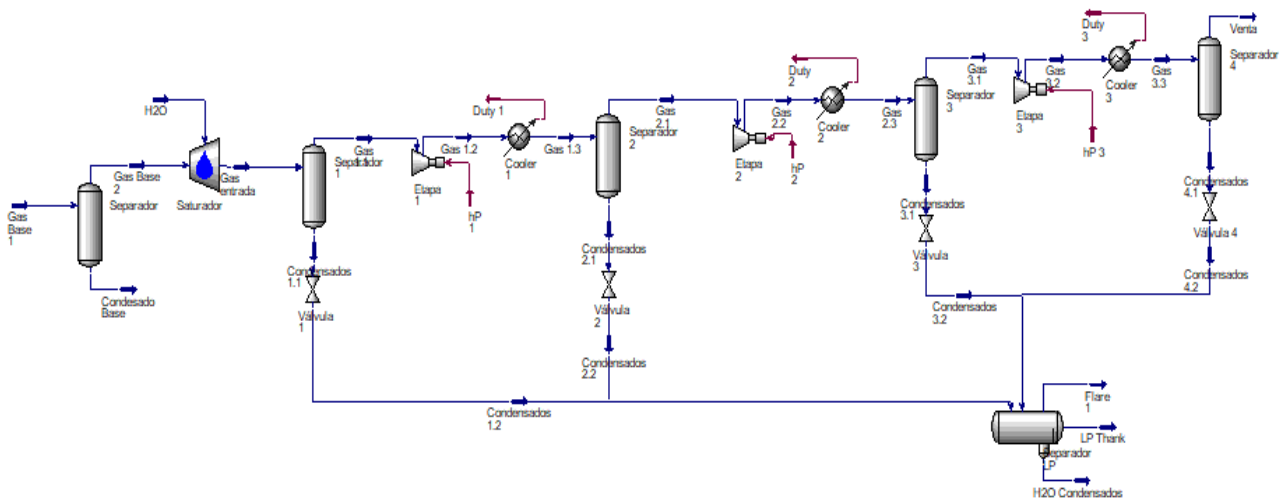
Con el objetivo de evaluar el impacto de cada configuración en la cantidad de gas que se venta al medio ambiente, se estructuraron en HYSYS las siguientes configuraciones:

6.2.1. Baja presión.

Esta configuración opera los líquidos a presión atmosférica (25 psig) y resulta en cuatro líneas distintas: Gas de venta, Gas de venteo, Condensados, y Agua condensada.

Figura 12

Configuración de baja presión.



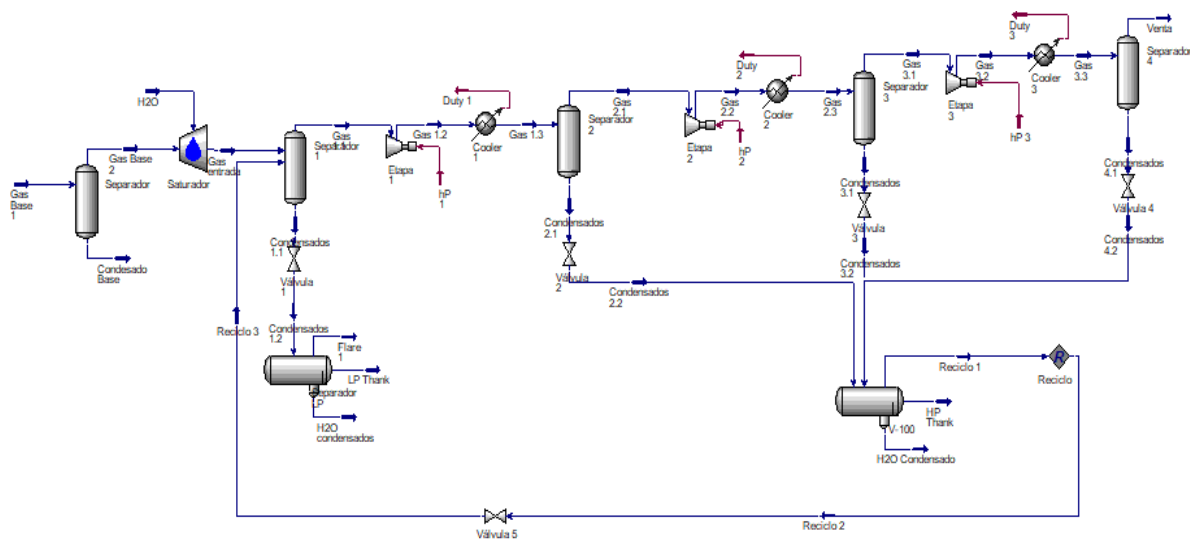
Nota. La imagen presenta la configuración realizada para el esquema de baja presión durante la simulación del proceso. Obtenida: Hysys.

6.2.2. Alta presión

En esta configuración, se emplea un manejo combinado de presión atmosférica y alta presión para los líquidos, generando seis líneas resultantes: Gas de venta, Gas de venteo, Condensados separados para baja presión y alta presión, así como Agua condensada en líneas separadas.

Figura 13

Configuración de alta presión.



Nota. La imagen presenta la configuración realizada para el esquema de alta presión durante la simulación del proceso. Obtenida: Hysys.

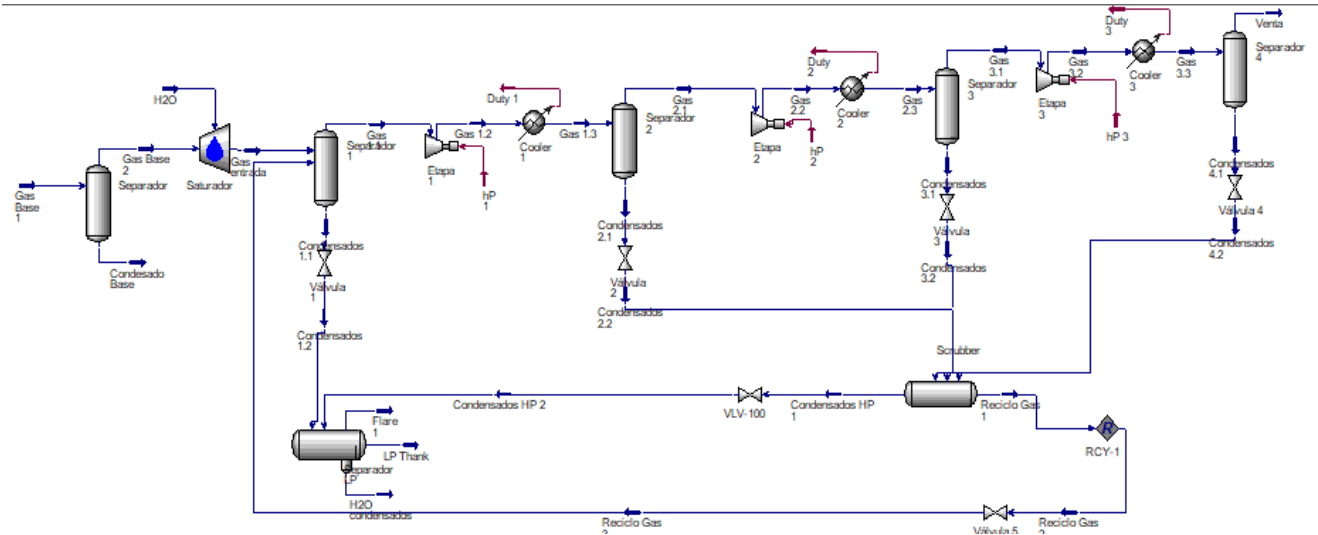
6.2.3. Scrubber de alta presión.

Una mejora respecto al caso anterior, esta configuración elimina la necesidad de manejar una línea resultante a alta presión. En este caso, el gas a alta presión se separa, se recirculan los

condensados al separador de baja presión, y el gas se reintroduce al sistema. Esto resulta en las mismas líneas que el caso de baja presión.

Figura 14

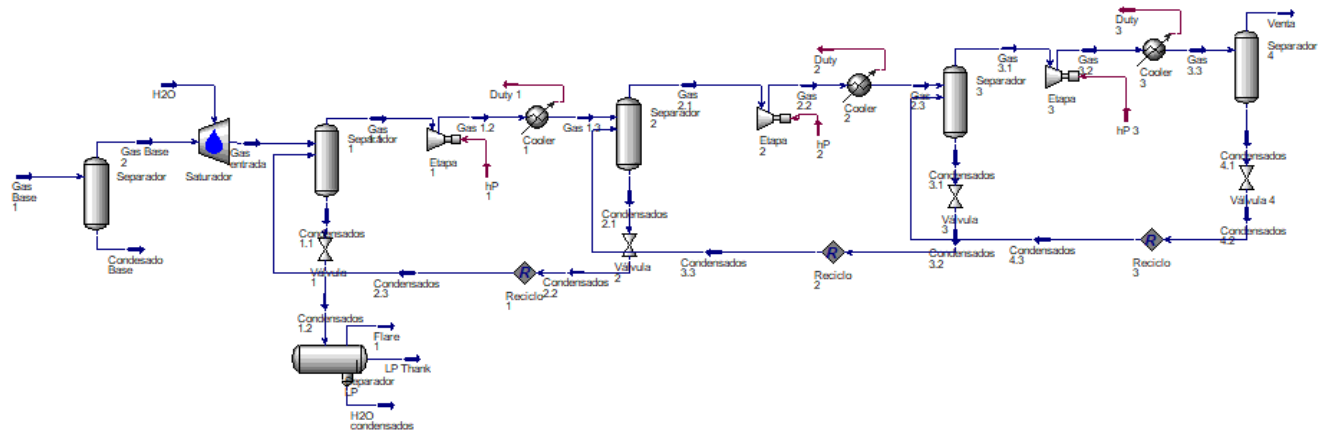
Configuración scrubber de alta presión



Nota. La imagen presenta la configuración realizada para el esquema de scrubber de alta presión durante la simulación del proceso. Obtenida: Hysys.

6.2.4. Recirculación.

Este sistema se diferencia de los previamente estudiados debido a que todas las líneas de condensados son reingresadas a la etapa anterior ajustando la presión de forma adecuada para no perturbar el sistema, teniendo como resultado la línea del caso de baja presión.

Figura 15*Configuración de recirculación.*

Nota. La imagen presenta la configuración realizada para el esquema de recirculación durante la simulación del proceso. Obtenida: Hysys.

Cada una de estas configuraciones fue modelada en HYSYS para simular su desempeño y analizar su efecto en la cantidad de gas que se libera al medio ambiente durante el proceso de compresión.

6.3. Cuantificación de emisiones.

Los resultados obtenidos fueron utilizados para comprender el comportamiento de cada configuración y observar el impacto en variables principales, como el gas enviado a quema e hidrocarburos condensados generados en el sistema.

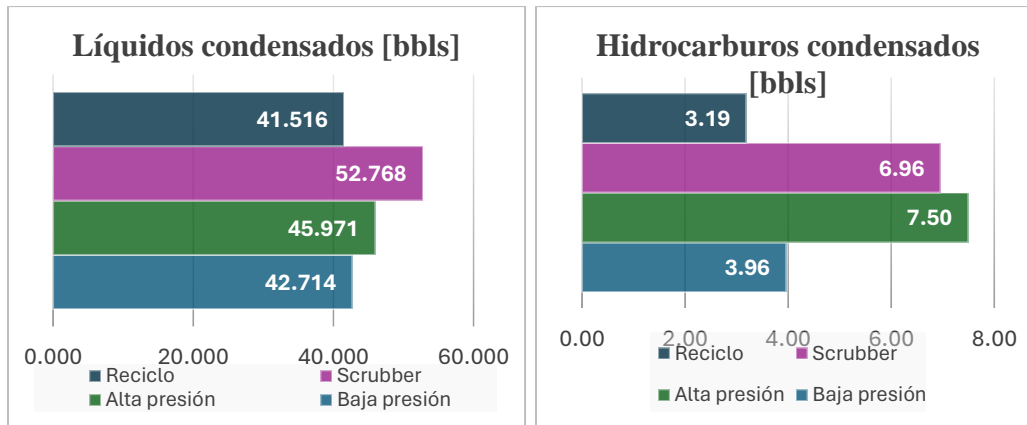
6.3.1. Nivel de riesgo.

Durante el proceso de simulación de cada una de las configuraciones, se pudo observar el comportamiento característico de un gas rico. Como resultado, se encontró que los esquemas con

mayor presencia de condensados en sus depósitos fueron el Scrubber de alta presión y el sistema de alta presión, como se refleja en la siguiente gráfica:

Figura 16

Volumen de condensados.



Nota. En la gráfica se observa los condensados producidos en cada uno de los modelos analizados.

Tomado: Resultados hysys.

Es importante destacar el comportamiento observado en los resultados de la configuración Scrubber, donde a pesar de tener un mayor número de líquidos condensados, se refleja un menor número de hidrocarburos condensados. Esto sugiere que este sistema tiene un desempeño más eficiente en comparación con los otros dos esquemas. Sin embargo, se observa un rendimiento mejor en las otras dos configuraciones, que no presentan tantos riesgos añadidos para el almacenamiento.

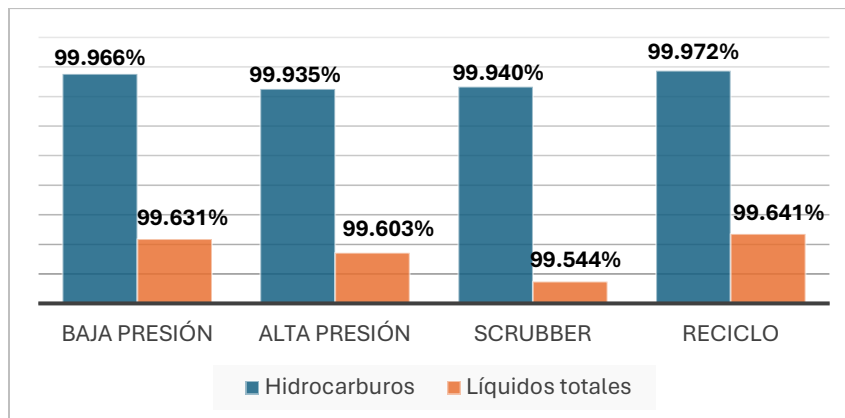
6.3.2. Eficiencia del sistema.

Durante la recopilación de resultados, se obtuvo el porcentaje de gas enviado a la venta respecto a la cantidad de condensados generados en cada una de las configuraciones. En las gráficas se puede observar cómo la tendencia de eficiencia respecto a los líquidos condensados

totales se comporta de forma similar. Con esto, se destaca que el sistema de recirculación muestra una eficiencia superior, como se muestra en la siguiente gráfica:

Figura 17

Eficiencia de cada sistema.



Nota. La gráfica muestra la relación entre la eficiencia del gas producido comparado con el volumen de condensados totales y netamente los hidrocarburos. Tomado de: Resultados de hysys.

La comparación entre los dos tipos de condensados se realiza debido a que el H₂O presente en el gas debe ser retirado para cumplir con los requisitos de alistamiento del gas. Conocer la diferencia en el impacto de ambos esquemas es relevante en términos de eficiencia con los hidrocarburos, lo cual refleja cuántas fracciones de hidrocarburos se están condensando en relación con la producción total de gas.

Al igual que en el estudio tomado de (Campbell, 2017) en nuestro trabajo se encontró que el sistema de recirculación muestra una eficiencia superior en el aprovechamiento de los líquidos condensados y un incremento proporcional de gas aprovechado para venta en comparación con otras configuraciones. Esta consistencia entre los resultados refuerza la validez de nuestros

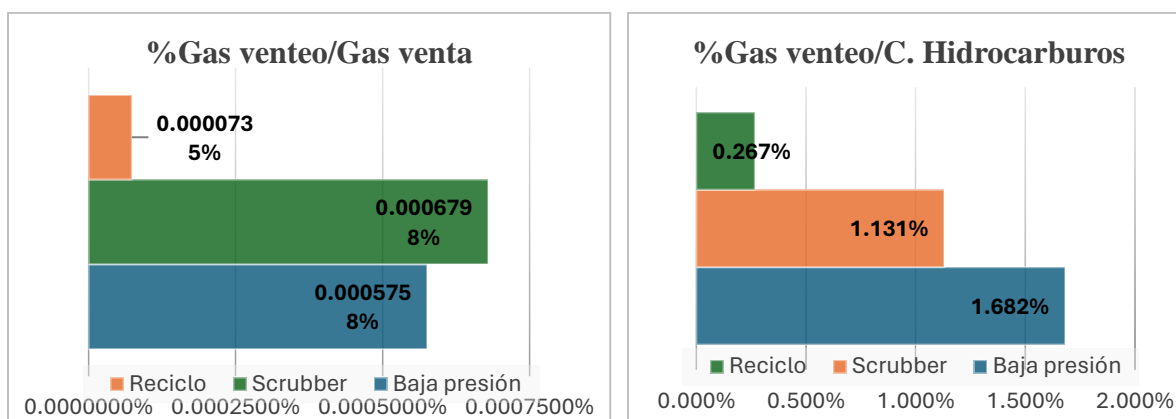
hallazgos y sugiere que el sistema de recirculación en cascada puede ser una opción favorable para reducir las emisiones y mejorar la eficiencia en operaciones de compresión de gas.

6.3.3. Reducción de emisiones.

El propósito principal de este trabajo fue comparar cómo afecta la configuración con la línea de líquidos resultantes de cada etapa, lo cual permite almacenar, transportar o aprovechar los condensados provenientes de este proceso, con el objetivo de reducir el impacto generado al medio ambiente por el venteo de las fracciones aún en estado gaseoso. En las siguientes gráficas se puede observar la proporción de gas que es quemado en comparación con el gas enviado a la venta y la cantidad de hidrocarburos condensados:

Figura 18

Cuantificación de gas venteado.



Nota. Las imágenes comparan la cantidad de gas que es enviado a quema durante el proceso, con el gas producido para la venta y los hidrocarburos condensados. Tomado de: Resultados hysys.

De esta gráfica es importante destacar tres aspectos: La configuración de alta presión no se encuentra dentro de este análisis, ya que no se encontraron fracciones en la línea resultante de

venteo para este ajuste, resultando en una quema equivalente a cero. El sistema Scrubber de alta presión mostró la menor reducción de emisiones en comparación con el desempeño de los otros dos esquemas en relación con el gas enviado a la venta. El sistema de baja presión es el que presenta la mayor quema de gas en comparación con la cantidad de hidrocarburos condensados durante el proceso.

La observación de que el Scrubber de alta presión tiene un mayor impacto ambiental coincide con los hallazgos de (Pennybaker, 2000). Ambos estudios sugieren que el manejo de condensados a alta presión puede generar mayores emisiones y riesgos ambientales.

7. Conclusiones

Los resultados obtenidos de la selección del gas fueron satisfactorios para el estudio realizado. La composición del gas seleccionado se ajustó de manera adecuada al caso de estudio, permitiendo observar cómo las fracciones de hidrocarburos condensadas a temperaturas ambiente responden a incrementos de presión en el sistema. Esta composición se basó en datos de un campo existente, lo que aumenta la relevancia y aplicabilidad de los resultados a un proceso real de compresión en una planta.

La utilización del simulador HYSYS facilitó el análisis detallado de cada configuración y sus impactos en las diferentes etapas del proceso. Las configuraciones seleccionadas para el estudio permitieron comparar cómo el reciclaje de condensados o el almacenamiento a presiones específicas afectan los resultados en el caso de estudio. Este enfoque de análisis proporcionó información valiosa sobre las eficiencias y eficacias de cada esquema en el proceso de compresión.

La cuantificación de emisiones fue esencial para determinar el esquema óptimo de los cuatro estudiados para el gas en cuestión, bajo las condiciones planteadas. Los resultados destacaron el esquema de reciclaje como el más eficiente para el proceso de compresión de gas en términos de eficiencia. Sin embargo, para reducir las emisiones a la atmósfera, el esquema óptimo parece ser aquel de alta presión, donde el gas resultante de la línea de condensados es recirculado en el sistema. Este enfoque no solo optimiza el proceso de compresión, sino que también minimiza el impacto ambiental al reducir las emisiones.

Estas conclusiones reflejan los logros y hallazgos significativos de la investigación, cómo la selección del gas, las configuraciones estudiadas y la cuantificación de emisiones son aspectos clave para mejorar reducir el impacto ambiental en los procesos de compresión de gas.

8. Recomendaciones

Ampliar el estudio para incluir una variedad de gases y composiciones podría proporcionar una comprensión más completa de cómo diferentes tipos de hidrocarburos responden a la compresión. Investigar gases con composiciones variadas permitiría establecer comparaciones más detalladas sobre la eficiencia y el impacto ambiental de diferentes esquemas de compresión.

Realizar un análisis detallado de los costos asociados con cada esquema de compresión podría ser crucial para la implementación práctica en la industria. Comprender cómo afectan los diferentes esquemas de compresión a los costos de operación y mantenimiento, así como su viabilidad económica a largo plazo, ayudaría a los ingenieros y empresas a tomar decisiones informadas.

Profundizar en la optimización de los esquemas de reciclaje de condensados podría ser beneficioso. Investigar cómo variar las tasas de recirculación y las presiones afecta la eficiencia y las emisiones podría revelar estrategias aún más eficaces para reducir el impacto ambiental sin sacrificar la eficiencia del proceso.

Referencias Bibliográficas

Arroyo, J. (n.d.). *COMPRESORES, TIPOS*.

Brady, R. N. (2013). Internal Combustion (Gasoline and Diesel) Engines. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.01056-3>

Campbell, J. (2017). *IMPACTOS EL RECICLAJE INFINITO SOBRE LOS SISTEMAS DE COMPRESIÓN*.

Carrillo, S. (2007). *ESTUDIO Y EVALUACIÓN DE LAS FACILIDADES DE SUPERFICIE PARA OPTIMIZAR EL SISTEMA DE VENDEO DE GAS EN LA ESTACIÓN VILLANO A DE AGIP OIL ECUADOR B.V.*

Casale, A., & Strada, F. (n.d.). *TRABAJO FINAL-POSTGRADO ITBA Optimización del procesamiento de gas natural a través de un sistema de control centralizado*.

Castro, H. (2022). *TRANSFORMACIÓN DE GAS DE TEA PARA LA REDUCCIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN EL DEPARTAMENTO DEL META, COLOMBIA*.

COMPRESION Y TRATAMIENTO DEL GAS. (2008).

CREG. (2007). *CIRCULAR 00187 DE 2007*.

Emisiones de dióxido de carbono . (2023, June 7). *US EPA* .

Fernández Díez, P. (n.d.). *DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ENERGETICA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA COMPRESORES*.

García, J. (2000). *Reducción en la quema de gas y en la emisión de contaminantes dentro de los procesos de explotación de pemex*. Instituto tecnologico de estudios superiores de Monterrey.

- Gil, C. (2013). *SELECCIÓN Y DISEÑO DE COMPRESORES CENTRÍFUGOS*. UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID .
- González, J. T., Héctor, I., Gallardo, E., & Fferr, F. (n.d.). *Comportamiento de yacimientos de gas P R E S E N T A UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO FACULTAD DE INGENIERÍA*.
- Jarunghammachote, S. (2022). Optimal interstage pressures of multistage compression with intercooling processes. *Thermal Science and Engineering Progress*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101202>
- León, A., Galván, G. E. E., Fernando, S., & Verduzco, S. (2018). 4 | *Ingeniería Petrolera Comportamiento termodinámico de los yacimientos de gas seco, gas húmedo y gas y condensado*.
- López, P. I., Rodríguez, J., Sánchez, S., & Roncal, J. (2020). Step by step derivation of the optimum multistage compression ratio and an application case. *Entropy*, 22(6). <https://doi.org/10.3390/E22060678>
- Luis, J., & Bauza, B. (2022). 386 | *Ingeniería Petrolera Relevancia del gas para optimizar los factores de recuperación de yacimientos, su rentabilidad y producción de HC livianos*.
- Ministerio de minas y energías. (2022). *Resolución 40066 de 2022*.
- Moreno, B. (2009). *Análisis del proceso de la recirculación de los gases de escape de baja presión en motores diesel sobrealimentados*. Universidad politecnica de valencia.
- Pennybaker, K. A. (2000). *Optimizing Field Compressor-Station Designs*.
- Ramirez, A. (2012). *DISEÑO CONCEPTUAL DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE GAS PARA*.

Rodríguez, J. (2021). *Instalación y montaje de un sistema de compresión de gas natural para el transporte y distribución en municipios de los departamentos de Cauca y Nariño.*

www.promigas.com

Rodríguez, N., & Godoy, S. (n.d.). *UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL-FACULTAD REGIONAL ROSARIO Integración IV Trabajo práctico N° 3: Uso de Componentes.*

Selección de sistemas de compresión de Gas Natural comprimido. . (2014).

THE PROPERTIES OF PETROLEUM FLUIDS: Vol. THIRD EDITION (THIRD EDITION).
(2017).

Tipos de compresores. (2019).

UNIDAD 12 COMPRESORES. (n.d.).