

**UNIVERSIDAD MAYOR, REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO
XAVIER DE CHUQUISACA**

VICERRECTORADO

**CENTRO DE UNIVERSIDAD ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA



**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA
SEPARADOR- COMPRESOR EN LA LÍNEA INTERMEDIA DE
ABASTECIMIENTO DE GLP A LOS CALDEROS DE VAPOR EN LA PLANTA
DE CARBONATO DE LITIO-SALAR DE UYUNI**

**TRABAJO EN OPCIÓN A DIPLOMADO EN TRANSPORTE, ALMACENAMIENTO Y
DISTRIBUCIÓN DE HIDROCARBUROS, VERSION III**

JHOVANA BARRON MEDRANO

**Sucre - Bolivia
2024**

CESIÓN DE DERECHOS

Al presentar este trabajo como requisito previo a la obtención del Diplomado en Transporte, Almacenamiento y Distribución de Hidrocarburos de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, autorizo al Centro de Estudios de Posgrado e Investigación o a la Biblioteca de la Universidad, para que se haga de este trabajo un documento disponible para su lectura, según normas de la Universidad.

También cedo a la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, los derechos de publicación de este trabajo o parte de él, manteniendo mis derechos de autor hasta un periodo de 30 meses posterior a su aprobación.



JHOVANA BARRON MEDRANO

Sucre, mayo 2024

DEDICATORIA

A mis Padres Paulino y Benita, quienes, con su amor, paciencia y esfuerzo, que hicieron día a día, me permitieron llegar hoy, a esta meta cumplida. Gracias por inculcar en mí el valor de la perseverancia.

A mis hermanos Nancy, Cintia, Liliana y Noelia, por estar presentes y apoyarme en todo el proceso de estudio realizado.

A mi hermana Cintia por haber sido un pilar fundamental en este proceso.

A toda mi familia porque con sus consejos y palabras de aliento, hicieron de mí una mejor persona.

Finalmente dedico el presente trabajo a mis amigos y amigas, que con su apoyo moral e incondicional pude llegar a cumplir esta meta.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer, a Dios por otorgarme salud y bienestar, en todo momento.

Agradecer a mis padres por estar siempre en el momento indicado para poder cumplir con el objetivo, por brindarme siempre su apoyo incondicional, por darme valentía y fortaleza de seguir y avanzar.

De igual manera agradezco a mi padre, por enseñarme a como uno debe enfrentarse a la vida sin retroceder, por enseñarme que paso a paso de manera persistente se llega la meta.

A mis queridos amigos de la carrera por su amistad incondicional, por haber compartido momentos inolvidables y brindarme su apoyo durante todo este tiempo.

A la universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, a los docentes de la carrera Ingeniería Industrial e Ingeniería Química por las enseñanzas brindadas, paciencia y dedicación, para formarnos como profesionales dedicados

RESUMEN

El objetivo de la presente monografía es realizar una propuesta de implementación de un sistema de separador, compresor y puente de regulación con la finalidad de llegar a las condiciones de operación requeridas por los calderos, los parámetros con las que se trabajara es la presión y composición de llegada a los calderos.

se basará en un enfoque mixto, combinando técnicas cualitativas y cuantitativas. Se utilizarán análisis documentales y revisión bibliográfica de fuentes científicas y técnicas para establecer un marco teórico y contextual del problema. Además, se llevarán a cabo mediciones in situ y pruebas experimentales para evaluar la eficiencia y el rendimiento del sistema separador-compresor. Donde se realizaron los cálculos para un separador vertical, determinando que la altura debe ser de 3 metros y el diámetro de 0.8 metros para satisfacer la capacidad de caudal de GLP requerida por los calderos.

Para la composición en el separador en las fases vapor y líquido, se consideró una sola etapa, presión constante, una fracción vaporizada del 96%, y se utilizó la correlación de Kessler-Lee para las propiedades termodinámicas. En la fase líquida se eliminaron trazas de componentes pesados, mientras que en la fase vapor se incrementó la concentración de propano y butano, conforme a las especificaciones de los calderos. Para el cálculo de potencia del compresor se tomó en cuenta la presión de succión y descarga y con las gráficas de potencia de freno serán necesarios 14 BHP. Donde se realizó una estimación de costos para la implementación de todo el sistema, que incluye el separador, el compresor y el puente de regulación. El costo total estimado es de aproximadamente 596,369 dólares. Esta inversión contemplara no solo la compra e instalación de los equipos, sino también los costos asociados a la integración del sistema en la infraestructura existente y los posibles costos que pueden exceder en el futuro.

INDICE GENERAL

INDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.1.1 Planteamiento del problema	2
1.1.2 Formulación del problema.....	2
1.2. OBJETIVOS	2
1.2.1 Objetivo General	2
1.2.2 Objetivos Específicos.....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	3
1.3.1 Justificación Técnica	3
1.3.2 Justificación Económica.....	3
1.4. METODOLOGÍA.....	3
1.4.1 Tipo de enfoque	3
1.4.2 Tipo de investigación	4
1.4.3 Diseño de investigación	4
1.4.4 Métodos de Investigación	4
1.4.5 Técnicas e Instrumentos de Investigación.....	4
2 CAPÍTULO II: DESARROLLO.....	5
2.1 MARCO TEORICO (CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL)	6
2.1.1. MARCO CONCEPTUAL	6
2.1.1.1. Yacimientos de Litio Boliviano.....	6
2.1.1.2 Salares	6
2.1.1.3 Carbonato de litio.....	7
2.1.1.4 Proceso de producción de carbonato de litio.....	7
2.1.1.5 Gas Licuado de petróleo (GLP).....	8
2.1.1.6 Transporte de GLP	10
2.1.1.7 Tanques de almacenamiento de GLP	12

2.1.1.8 Vaporización de GLP	13
2.1.1.9 Separador Flash de una etapa.....	16
2.1.1.10 Compresores	19
2.1.1.11 Puente de Regulación.....	20
2.1.2. MARCO CONTEXTUAL.....	23
2.1.2.1 Ubicación de la planta de carbonato de litio	23
2.1.2.2 Demanda de carbonato de litio	23
2.1.2.3 Distribución de la planta de carbonato de litio	24
2.1.2.4 Generación de vapor en la planta de Carbonato de Litio.....	25
2.1.2.5 Distribución de GLP a los calderos de vapor.....	25
2.1.2.6 Abastecimiento de gas a la planta de carbonato de litio.....	26
2.1.2.7 Situación actual de distribución de GLP a los calderos de vapor.	27
2.2. INFORMACION Y DATOS OBTENIDOS	29
2.2.1. DEMANDA DE GLP PARA ABASTECIMIENTO DE CALDEROS	29
2.2.2 LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN DE GLP	31
2.2.3 SELECCIÓN DEL SISTEMA SEPARADOR-COMPRESOR	33
2.2.3.1 Para los Cálculos -Separador	33
2.2.3.2 Cálculos en composición en el separador	38
2.2.4 EVALUACIÓN DE COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA SEPARADOR-COMPRESOR ...	45
2.3. ANALISIS Y DISCUSION	46
CAPITULO III: CONCLUSIONES.....	47
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
ANEXOS.....	52

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	Producción de carbonato de litio hasta grado batería a partir de Salmuera.....	8
Figura 2	Diagrama de instalación, vaporizador a fuego directo	15
Figura 3	Diagrama de instalación, vaporizador tipo eléctrico.....	15
Figura 4	Vaporizador de fuego indirecto.....	16
Figura 5	Esquema Separador Flash.....	17
Figura 6	Puente de Regulación.....	21
Figura 7	Esquema de conexión para presión de entrada menor a 10 bar	21
Figura 8	Esquema de conexión para presión de entrada mayor a 10 bar.....	22
Figura 9	Ubicación de la planta de Carbonato de litio (YLB) – Salar de Uyuni	23
Figura 10	Distribución de la planta de Carbonato de litio (YLB) – Salar de Uyuni	24
Figura 11	Proceso de distribución de GLP a los calderos de Vapor (YLB) – Salar de Uyuni	26
Figura 12	Fotografía 1 de calderos de vapor -Planta de carbonato de litio.....	28
Figura 13	Fotografía 2 de calderos de vapor -Planta de carbonato de litio.....	28
Figura 14	Metodología de procedimiento	29
Figura 15	Diagrama de distribución de GLP desde almacenamiento a los calderos de vapor	32
Figura 16	Diagrama de un separador flash	39
Figura 17	Diagrama de implementación de sistema separador compresor	44

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Correlación para el cálculo de las propiedades críticas Lee-Kesler	18
Tabla 2.- Condiciones de ingreso de GLP a los calderos	27
Tabla 3.- Condiciones de operación	32
Tabla 4.- Condiciones de operación del área de regulación	33
Tabla 5.- Cálculos del separador	33
Tabla 6.- Resultados de dimensiones del separador	36
Tabla 7.- Condiciones de operación de Separador	39
Tabla 8.- Composición de GLP.....	40
Tabla 9.- Tabulación de datos de propiedades críticas del GLP	41
Tabla 10.- Tabulación de resultados de composición de fase vapor y líquido del separador .	41
Tabla 11.- Estimación de costos de implementación de Sistema separador-re compresor y puente de regulación en la línea de distribución de GLP a los calderos de vapor	45

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Tabla de masa molar constante de gas y propiedades del punto crítico.

Anexo 2 Cálculo del peso molecular del gas

Anexo 3 Planta de carbonato de litio vista en 3D

Anexo 4 Potencia de freno requerido por cada millón de pies cúbicos por día

1 CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

(Gutierrez Cardenas & Quezada Martin, 2020) desarrollaron la investigación, implementación de un sistema de vaporización forzada automática de gas licuado de petróleo (GLP) en una empresa manufacturera de envases plásticos y metálicos. En la investigación realizada se llegó a las siguientes conclusiones: en dicha investigación se realizó el diseño de un intercambiador de calor de tubos y coraza de cabezal removible, que cumple la función de vaporizar el GLP operando de manera automatizada con la finalidad de satisfacer la demanda pico de energía que se requiere dentro de los procesos de producción.

(Castellano Sastre , 2012) realizó el diseño de una instalación de GLP en una estructura autoportante tipo skid para autoabastecimiento de gas. En la investigación realizada se diseñó una instalación de GLP para autoabastecimiento de gas, de dimensiones limitadas para poder incluirla en una estructura autoportantes tipo skid.

(Arroyo Panchi & Tufiño Leon, 2016) desarrollaron el rediseño de la instalación centralizada de Gas licuado de petróleo de la empresa textil San Pedro según la norma NTE INEN 2260, e implementación de un plan de mantenimiento para el cumplimiento del registro oficial 313 y 435, llegaron a las conclusiones:

- a) El sistema centralizado de gas licuado de petróleo de la Textil San Pedro cumple con la norma INEN 2260:2010 proporcionando un funcionamiento seguro y eficiente de la instalación en función de la nueva demanda requerida en el diseño.
- b) El plan de mantenimiento que implemento para todo el sistema centralizado de GLP, sirve como sustento para la elaboración de actividades de inspección y mantenimiento al personal de la Textil San Pedro. Además, da a conocer las actividades que se deben realizar por parte de empresas calificadas para la elaboración de las pruebas obligatorias para el cumplimiento del RO 313 del 8 de mayo de 1998 y el RO 435 del 10 de febrero de 2015.

1.1.1 Planteamiento del problema

La empresa estatal Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB), realiza la construcción de la Planta de Carbonato de Litio, misma que se encuentra ubicada en el salar de Uyuni, localidad Llipi.

Actualmente la empresa estatal Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) está en la etapa de puesta en marcha. En este proceso se ha observado algunas condiciones de operación diferentes al diseño establecido, la planta de Carbonato tiene 3 calderos de vapor en el área de refrigeración de la salmuera, estos calderos operan con GLP.

En condiciones normales de temperatura, el GLP es un gas. Cuando se somete a presiones moderadas o se enfría, se transforma en líquido. En estado líquido, se transporta y almacena con facilidad. El GLP se transporta en cisternas hasta la Planta de Litio, es almacenado en las instalaciones de YPFB que está dentro de la planta.

Los calderos requieren ciertas especificaciones de operación y se ha evidenciado que el GLP a la llegada de los calderos no ofrece la cantidad necesaria de presión para alimentar a los calderos y la composición contiene impurezas.

Según las condiciones climáticas de la zona con temperaturas por debajo del 0 absoluto, existe una caída de presión en el tramo de distribución.

1.1.2 Formulación del problema

¿De qué manera se podría proporcionar una solución eficiente y efectiva a la ineficiencia en el abastecimiento de gas licuado de petróleo (GLP) a los calderos de vapor en la planta de carbonato de litio en el Salar de Uyuni?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Realizar el estudio técnico para la implementación de un sistema separador- compresor en la línea intermedia de abastecimiento de GLP a los calderos de vapor en la planta de carbonato de litio -Salar de Uyuni.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diagnosticar la eficiencia del suministro de GLP a los calderos de vapor en la planta de carbonato de litio del Salar de Uyuni, identificando los parámetros críticos de operación.
- Identificar los parámetros específicos necesarios para el funcionamiento óptimo de los calderos.

- Realizar la selección de un separador y compresor para cumplir con las especificaciones requeridas en la alimentación de los calderos.
- Evaluar costos asociados a la implementación del sistema separador-compresor en comparación con las condiciones requeridas por los calderos.

1.3. JUSTIFICACIÓN

1.3.1 Justificación Técnica

En este estudio, se llevará a cabo una cuidadosa selección de equipos, considerando aspectos como la capacidad de separación y compresión, resistencia a la corrosión y especificaciones dimensionales, para la implementación eficiente del sistema de separador-compresión en la línea de distribución de GLP. Se analizarán detalladamente las condiciones operativas requeridas, como presión, temperatura y flujo de GLP, así como los requisitos de seguridad y normativas aplicables, garantizando un diseño que se adapte a las necesidades específicas de la planta, optimizando la operación de los calderos de vapor y minimizando el riesgo de deterioro de los equipos.

1.3.2 Justificación Económica

La implementación del sistema separador-compresor en la línea de abastecimiento de GLP a los calderos de vapor en la planta de carbonato de litio del Salar de Uyuni mejorará la eficiencia operativa, reduciendo pérdidas y costos de mantenimiento, mientras optimiza el uso de recursos energéticos, generando ahorros significativos en combustible y aumentando la productividad para una mayor rentabilidad a largo plazo.

1.4. METODOLOGÍA

El enfoque de investigación adoptado para el tema propuesto es de naturaleza positivista. Este enfoque implica la realización de un análisis predictivo inicial mediante la implementación del sistema separador-compresor. Posteriormente, se procederá a verificar las condiciones de suministro de Gas Licuado de Petróleo (GLP) a los calderos, lo cual permitirá contrastar los resultados obtenidos con las expectativas planteadas.

1.4.1 Tipo de enfoque

El enfoque de investigación adoptado para este tema es cuantitativo. Se recopilará la información necesaria para llevar a cabo un análisis detallado de la implementación del

sistema separador-compresor. Luego, se procederá a determinar las propiedades específicas del Gas Licuado de Petróleo (GLP). Esta implementación nos permitirá realizar una comparación exhaustiva de las propiedades del GLP y verificar la eficiencia en el rendimiento de los calderos.

1.4.2 Tipo de investigación

El enfoque de investigación adoptado es de naturaleza descriptiva. Este enfoque implica proporcionar una descripción detallada y cuantificable de las condiciones de transporte del Gas Licuado de Petróleo (GLP), desde el punto de almacenamiento inicial hasta el punto de alimentación de los calderos. Se analizarán diversos parámetros relevantes, como la presión, temperatura, flujo y calidad del GLP durante todo el proceso de transporte, con el fin de comprender mejor su comportamiento y optimizar la eficiencia del sistema de suministro.

1.4.3 Diseño de investigación

El diseño de investigación adoptado es no experimental y de tipo transversal. Se llevará a cabo un diagnóstico exhaustivo que abarcará desde el suministro inicial de gas hasta el punto de alimentación de los calderos. Durante este proceso, se recopilarán los datos necesarios para realizar los cálculos correspondientes y obtener una comprensión detallada de todo el sistema de suministro.

1.4.4 Métodos de Investigación

El método de investigación cuantitativo descriptivo, se recopilará la información necesaria para el desarrollo de la presente monografía se obtendrá mediante la revisión de fuentes secundarias, como ser la página oficial de Yacimientos de Litio Boliviano (YLB) como ser también la página oficial de Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos Transporte y la Agencia Nacional de hidrocarburos.

Por otra parte, también se obtendrá información mediante consulta directa con personal de YLB, la cual se modificará por cuestión de confidencialidad.

1.4.5 Técnicas e Instrumentos de Investigación

Para llevar a cabo el estudio técnico mencionado, se aplicarán diversas técnicas e instrumentos. Las entrevistas con el personal operativo serán realizadas utilizando guiones estructurados para obtener información cualitativa sobre el sistema actual y sus deficiencias. Para recopilar datos cuantitativos sobre los requerimientos de producción y los costos operativos, se utilizarán encuestas diseñadas específicamente y se emplearán programas de análisis estadístico para procesar los resultados.

De la misma manera se llevarán a cabo observaciones directas en la planta para identificar áreas de mejora y corroborar los datos obtenidos a través de las entrevistas y encuestas. Para complementar estas metodologías, se utilizarán instrumentos de medición in situ, como medidores de presión, termómetros y medidores de caudal, para obtener datos precisos sobre parámetros clave del sistema. La combinación de estas técnicas e instrumentos proporcionará una evaluación integral de la implementación propuesta y sus efectos en la operación de la planta.

2 CAPÍTULO II: DESARROLLO

2.1 MARCO TEORICO (CONCEPTUAL Y CONTEXTUAL)

2.1.1. Marco conceptual

2.1.1.1. Yacimientos de Litio Boliviano.

Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) es una empresa estatal creada por Ley N° 928 del 27 de abril de 2017, es una entidad descentralizada dependiente del Ministerio de Hidrocarburos y Energías, encargada de desarrollar los procesos de la química básica de los recursos evaporíticos con una participación 100% estatal, para la producción de:

- Cloruro de Litio
- Sulfato de Litio
- Hidróxido de Litio
- Carbonato de Litio
- Cloruro de Potasio
- Nitrato de Potasio
- Sulfato de Potasio

Además de sales derivadas e intermedias y otros productos de los recursos evaporíticos, en toda su cadena productiva desde la prospección, explotación beneficio, industrialización y comercialización de productos finales con valor agregado (YLB, 2024).

2.1.1.2 Salares

Entre las fuentes de litio más importantes se destacan los salares. Un salar es una cuenca cerrada con drenaje interior, generalmente en un clima árido, donde la evaporación hace cristalizar las sales que están disueltas en el agua. Puede haber explotación de las sales por medio de labores a cielo abierto o de aguas subterráneas, según donde se encuentren los yacimientos.

La capacidad del depósito depende de la composición y niveles de concentración de los diversos elementos, tales como litio, potasio, magnesio y boro, entre otros, por lo que cada uno debe ser tratado en forma particular, puede encontrarse en diversas formas en la naturaleza, unos pocos tienen valor económico ya que existen algunas limitantes para la explotación de este tipo de yacimientos. (Mendez Martin, 2019).

2.1.1.3 Carbonato de litio

El litio, conocido como el metal más liviano forma uno de los componentes más importantes del Salar de Uyuni, en la región de Potosí. Este material valioso se ha sumado a las riquezas del suelo boliviano.

Utilizado en diferentes industrias, su utilidad para las nuevas baterías de celulares, tabletas y distintos dispositivos electrónicos han hecho crecer los precios internacionales de este material al alza. La vasta región del Salar de Uyuni que cuenta con alrededor de unos 10.500 km² con una profundidad promedio de 10 a 12 metros, es el mayor depósito evaporítico de Sudamérica. La profundidad del salar está compuesta de capas de salmueras superpuestas y barro lacustre. Esta salmuera se compone de: litio, boro, potasio, magnesio, carbonatos y sulfatos de sodio. (Mendez Martin, 2019)

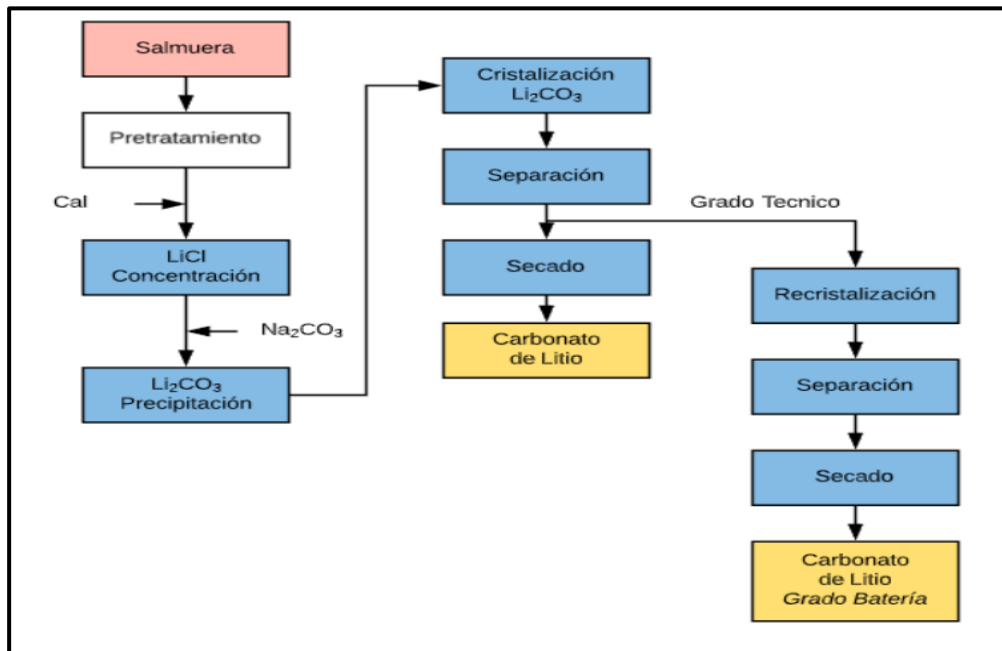
2.1.1.4 Proceso de producción de carbonato de litio.

El contenido de litio, además del de otros minerales como el boro, bromo, calcio, carbonatos, cloruros, nitratos, potasio y sodio dependen de la composición de las salmueras. Esto hace que el tratamiento de cada salmuera sea diferente y específico dependiendo de las características del salar.

Dicha salmuera se procesa luego en plantas industriales donde se utilizan sustancias químicas tales como soda caustica, ácido sulfúrico, ácido clorhídrico y agua, que juegan un rol fundamental en la remoción de impurezas, ya que logran quitar sustancias como boro, magnesio y otros elementos no deseados. Este procesamiento se realiza a través de la purificación de la salmuera, precipitación del carbonato de litio, junto con el lavado, secado y envasado de estas sustancias. (Mendez Martin, 2019).

Figura 1

Producción de carbonato de litio hasta grado batería a partir de Salmuera



Fuente: (Aenlle Imbrosciano, Albimari, Benitez de Lugo, Firmo, & Hortal, 2019)

Se muestra un breve resumen de las etapas involucradas y las materias primas más importantes en el procesamiento de salmuera para la producción de carbonato de litio grado batería desde que es extraída hasta el proceso de secado. Por grado batería se entiende una pureza del carbonato de litio mayor al 99,5%. (Aenlle Imbrosciano, Albimari, Benitez de Lugo, Firmo, & Hortal, 2019).

2.1.1.5 Gas Licuado de petróleo (GLP)

GLP es la abreviatura de “gases licuados del petróleo” y reciben este nombre debido a que son una mezcla de hidrocarburos, subproducto de la destilación del petróleo, que alcanzan el estado gaseoso a temperatura y presión atmosférica, y que tienen la propiedad de pasar a estado líquido por un aumento de presión o disminución de la temperatura. (Castellano Sastre, 2012)

El GLP comercial consiste en una mezcla de gases principalmente propano y butano, siendo la proporción del primero mayor que la del segundo, ya que el propano se vaporiza a partir de -44 °C, y el butano lo hace a 0 °C. Es por este motivo que el propano es el componente

gaseoso preferido particularmente para el uso industrial, donde se puede requerir una alta capacidad de evaporación rápida, ya que vaporiza incluso en las condiciones de temperatura exterior más extremas. En cambio, el butano no lo hace cuando la temperatura exterior es de 0 °C o inferior. (Castellano Sastre , 2012)

A) Características físicas y químicas de los GLP

- **Inflamabilidad y combustión.** Ambos gases forman con el aire mezclas inflamables y necesitan una gran cantidad de aire para su combustión. Resultan inflamables en el aire solo cuando se mezclan en una cierta proporción: (Heras, 2013)

Propano: entre el 2,2 y el 9,5 % de propano

Butano: entre el 1,9 y el 8,5 % de butano

- **Corrosión.** No corroen al acero, ni al cobre o sus aleaciones y no disuelven los cauchos sintéticos por lo que estos materiales pueden ser usados para construir las instalaciones. Por el contrario, disuelven las grasas y al caucho natural.
- **Toxicidad.** No es toxico. El butano y propano desplazan el oxígeno, por lo tanto, la muerte se presenta por envenenamiento, sino por asfixia porque la sangre por falta de aire no se oxigena en los pulmones. (Arroyo Panchi & Tufiño Leon, 2016)
- **Olor.** Carecen de color y de olor natural por lo que, para poder detectar por el olfato las eventuales fugas que pudieran ocasionarse, se les añade antes de su distribución un odorizante peculiar a base de mercaptanos. El olor es sentido cuando todavía se encuentra la mezcla muy por debajo del límite inferior de inflamabilidad. (Heras, 2013)
- **Contaminación.** La combustión es limpia; cuando es adecuadamente mezclado con aire prácticamente no produce ningún hollín, monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx), sin embargo, cuando existe una combustión incompleta, el GLP como todos los combustibles puede producir monóxido de carbono (CO) que es sumamente tóxico porque se combina con la hemoglobina de la sangre en un proceso irreversible. Debido a que el GLP se almacena y transporta bajo presión moderada en tanques. se logra impedir cualquier tipo de emisión de evaporación. En el caso de fuga, el GLP se evapora fácilmente y se disipa a la atmósfera y no contamina los acuíferos o el suelo. (Arroyo Panchi & Tufiño Leon, 2016)

B) Algunas consideraciones sobre el manejo de los GLP

El líquido que sale de un recipiente se evapora rápidamente en la atmósfera libre. Como consecuencia de esta evaporación rápida, produce frío en su entorno, siendo peligroso el contacto personal con el líquido fugado. La propagación del gas en la atmósfera es en general lenta, excepto en presencia de viento. Cualquier llama o punto caliente puede iniciar la combustión de una mezcla de GLP y aire, siempre que se encuentren en la proporción adecuada. (Heras, 2013).

2.1.1.6 Transporte de GLP

El GLP siendo un combustible muy explosivo e inflamable, se requiere mucha precaución al momento de planificar, dimensionar y seleccionar sus sistemas de almacenamiento (recipientes), de transporte (tuberías), equipos de consumo y elementos de protección y seguridad.

El riesgo en un sistema de GLP siempre está presente y no se lo puede eliminar, pero se lo puede minimizar si los sistemas que lo contienen son concebidos técnicamente, de acuerdo con los lineamientos establecidos en normas técnicas donde se indican los requerimientos mínimos de seguridad al momento de realizar las instalaciones. En la naturaleza el GLP se encuentra en estado gaseoso, pero para facilitar su almacenamiento en recipientes se lo lleva a estado líquido aumentando su presión y bajando su temperatura. Al interior de estos recipientes se produce un fenómeno de vaporización natural del líquido dado por el intercambio de calor entre este y el medioambiente, y en este estado es transportado por tuberías para su consumo. (Heras, 2013).

A) Transporte de GLP en cisternas

a) Normativa de transporte de GLP en camiones cisterna

Según el documento base de contratación para servicio de transporte por cisternas de GLP (YPFB , 2015), se toma las siguientes consideraciones:

- Cada cisterna deberá tener una capacidad de carga mínima operativa de 20 TM y tener todos los permisos vigentes para el inicio de operaciones
- El tracto y tanque cisterna deberán tener una antigüedad no mayor a 10 años (2005 en adelante).
- Todos los permisos especiales, autorizaciones y otros requerimientos legales para llevar a cabo el transporte de GLP y Butano por cisternas, con relación a las leyes y

reglamentaciones de carga en territorio boliviano, países de tránsito y país de destino, son responsabilidad del Transportista, en cuanto a su solicitud, tramitación, obtención, habilitación y plena vigencia, así como el costo que emerja de los mismos.

- El volumen nominado para cada cisterna deberá contemplar el peso que generará de manera que no sobrepase el peso máximo permitido. El Transportista se responsabilizará por el costo de cualquier multa resultado de una mala nominación, debiendo el transportista asumir las multas o sanciones que se determinen en la ocurrencia de la falta.

B) Transporte de GLP por ductos

El gasoducto es el sistema clásico de transporte de gas entre dos puntos determinados, para el cual se utilizan tuberías de acero con carbono, de elevada elasticidad, que suelen estar enterrados en la superficie terrestre o en el fondo de los océanos. La capacidad de transporte de los gasoductos depende de la diferencia de presión entre sus extremos y de su diámetro. (MMTuberia, 2023).

Los materiales de los ductos y sus componentes deben:

- Mantener su integridad estructural de acuerdo con las condiciones previstas de temperatura y otras condiciones del medio ambiente.
- Ser químicamente compatibles con el gas natural que se transporte.
- Ser compatibles con cualquier otro material que esté en contacto con la tubería.

a) Normativa Transporte de GLP por ductos

La normativa que se emplea para ductos es la ASME B31.3 contiene requisitos para las tuberías que normalmente se encuentran en las refinerías de petróleo. Cubre materiales y componentes, diseño, fabricación, montaje, examen, inspección y prueba de tuberías.

Según Reglamento para Construcción y Operación de Plantas de Gas Licuado de Petróleo (GLP), 23 de julio de 1997 (ANH, 2014), en el Anexo 4 especifica lo siguiente en cuanto a las tuberías conectadas a los tanques de almacenamiento:

- Las cañerías de interconexión en las instalaciones de GLP podrán ser aéreas o enterradas, pero no podrán ser empotradas. Si se sitúan en canales, estos serán registrables en toda su longitud.

- Las cañerías de conexión entre tanques de superficie y equipos complementarios de la estación de GLP, o de ellos entre sí, serán aéreas.
- Cuando las cañerías deban atravesar paramentos, se los hará por medio de para muros de forma tal que quede libre como mínimo un centímetro alrededor de la tubería.
- Los tramos de cañerías destinados a la fase líquida y que puedan quedar aislado entre válvulas de corte, dispondrán de una válvula de seguridad (alivio térmico) o de by-pass de funcionamiento automático que libere cualquier sobrepresión interior excesiva.
- Equipos de trasvase. Las tuberías conectadas a la bomba de impulsión de GLP deberán estar dotadas de disposiciones que, en caso de sobrepresión, provoquen automáticamente el retorno de GLP al tanque que alimenta la bomba o bien que permita la interconexión entre la impulsión y la succión.
- Cuando el trasvase se efectuó por compresión de la fase gaseosa, el compresor debe disponer de presostatos de baja y alta.
- En el extremo de la instalación rígida y en los puntos de unión de las tuberías de la fase líquida con las mangueras flexibles de conexión con el camión cisterna se colocará una válvula antirretorno; además en cada uno de los puntos de unión tanto de la fase líquida como gaseosa, deberá instalarse una válvula de cierre rápido de accionamiento manual.

2.1.1.7 Tanques de almacenamiento de GLP

El GLP se licua para maximizar sus oportunidades de almacenamiento, ya que se ha demostrado que 1 litro de GLP es tan eficiente como 270 litros de gas natural. Para licuarlo es necesario someterlo a condiciones específicas de enfriamiento y presión, que también deben mantenerse durante su almacenamiento (y potencial transporte). Los tanques criogénicos de fondo plano son una de las posibilidades más eficientes para almacenar GLP, en un rango de capacidad que va desde los 1.000 a los 30.000 m³. (CRYOSPAIN, 2024)

Hay una serie de riesgos que se deben tener en cuenta al considerar los tanques de GLP:

- Hay riesgo de explosión
- Las fugas de GLP también pueden provocar riesgo de asfixia
- Es una sustancia extremadamente inflamable.
- En estado licuado, el contacto con el GLP puede provocar quemaduras graves.

A) Normativa de tanques de almacenaje de GLP

Según Reglamento para Construcción y Operación de Plantas de Gas Licuado de Petróleo (GLP), 23 de julio de 1997 (ANH, 2014), el cual especifica en el Anexo 4 “**Especificaciones y características de los tanques de almacenaje de GLP**” el cual especifica lo siguiente:

- Los Tanques de Almacenaje de GLP deberán ser aptos para operar a una presión de 20 bar y a una presión de prueba de 26 bar.
- Deberán responder a las exigencias del Código A.S.M.E. Sección VIII, División I.
- Deberán llevar en la placa de identificación la siguiente información: Superficie exterior en metros cuadrados, el volumen geométrico en metros cúbicos, presión de trabajo, presión de prueba.
- Indicador de nivel máximo de llenado. El grado de llenado en los tanques no excederá del 85% (ochenta y cinco por ciento) de su volumen.
- Válvula de seguridad de exceso de presión conectada a la fase gaseosa del tanque.
- Dos dispositivos destinados a la salida del GLP. Uno en fase líquida y otro en gaseosa.
- Borne de toma de tierra.
- Drenaje situado en uno de los extremos de la generatriz inferior.
- Cuando en una instalación existan equipos de trasvase, de vaporización, regulación y medida, éstos deberán quedar dentro del cerco. Podrán prescindirse del cerco cuando de la instalación de GLP está ubicada en el interior de las plantas industriales destinadas al almacenamiento, producción y/o tratamiento de productos petrolíferos o combustibles gaseosas.
- La distancia entre tanques no será nunca inferior a la semisuma de sus radios y como mínimo será de 1.00 metro.
- Se protegerán mediante pinturas blancas reflectantes y serán puestos a tierra con una resistencia menor a 20 ohm.

2.1.1.8 Vaporización de GLP.

El consumo de GLP se lo realiza por lo general en estado gas, por lo tanto, es necesario que exista un cambio de estado a vapor, antes que llegue al lugar de consumo. Este proceso se denomina vaporización y puede ser natural o forzada. (Castellano Sastre , 2012)

A) Vaporización natural

La vaporización natural es la posibilidad de un depósito de suministrar de manera continua una determinada cantidad de fase gaseosa sin la necesidad de aportar calor de manera auxiliar al GLP líquido, y depende de la superficie del depósito, de la temperatura ambiente y de la presión a la que se extrae el gas. (Castellano Sastre , 2012).

B) Vaporización forzada.

Si la demanda de fase gaseosa de la instalación es mayor que la que puede aportar el depósito, el GLP se va enfriando, con lo que disminuye la vaporización llegando a interrumpirse el suministro. Cuando mediante la vaporización natural no se obtiene la cantidad suficiente para suministrar de manera continua la fase gaseosa que se precisa para el consumo, se ha de instalar un sistema de vaporización forzada consistente en un intercambiador de calor o vaporizador en el que por medio de un fluido auxiliar se aporta al GLP el calor necesario para aportar a la fase gaseosa que requiere la instalación sin que descienda la temperatura en el depósito. De manera que, la vaporización forzada es la que se produce cuando se calienta la fase líquida de forma artificial para provocar la vaporización, y se lleva a cabo mediante un aporte de calor de forma auxiliar al GLP líquido. (Castellano Sastre , 2012)

C) Proceso de vaporización de GLP.

Cuando el caudal de fase gaseosa suministrado por vaporización natural no es insuficiente para alimentar la instalación de consumo, se ha de recurrir a la vaporización forzada por medio de un vaporizador. La finalidad de este aparato es regasificar el GLP contenido en los depósitos de almacenamiento antes de su emisión a la red de distribución, proporcionándole a dicho combustible, el calor necesario para que se lleve a cabo el cambio de estado y el GLP pase de líquido a vapor (Castellano Sastre , 2012)

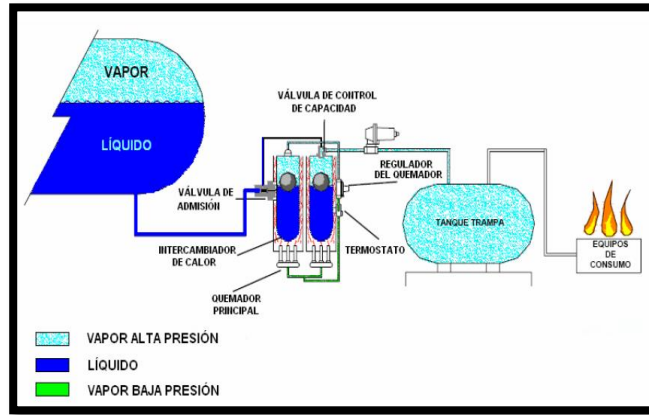
D) Tipos de vaporizadores

a) Vaporizadores de Fuego Directo

Los vaporizadores de GLP son un intercambiador de calor para vaporizar el GLP líquido.

Figura 2

Diagrama de instalación, vaporizador a fuego directo



Fuente: (Castellano Sastre , 2012)

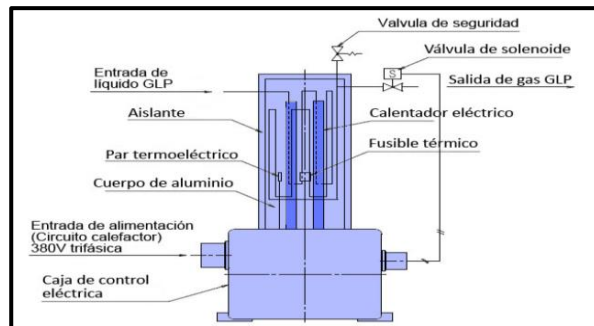
Se muestra el sistema de vaporización de fuego o contacto directo, ya que su suministro de energía térmica es mediante una llama aplicada directamente sobre la superficie de un intercambiador de calor, que se encuentra en contacto con el GLP líquido que se requiere vaporizar. (Gutierrez Cardenas & Quezada Martin, 2020)

b) Vaporizadores Eléctricos

El vaporizador eléctrico, usa como fuente de energía térmica la transferencia de calor que generan unas resistencias eléctricas que puede ser aplicada de manera directa, indirecta o sobre la superficie de los recipientes a presión (Gutierrez Cardenas & Quezada Martin, 2020).

Figura 3

Diagrama de instalación, vaporizador tipo eléctrico



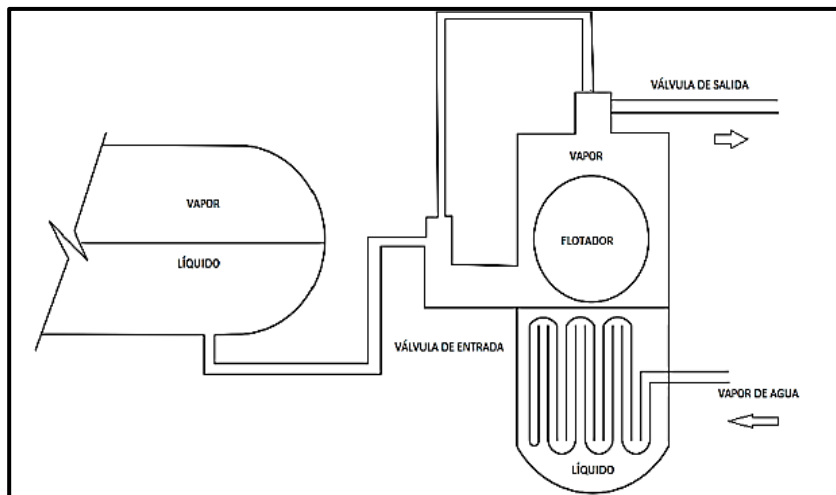
Fuente: (Algas SDI, 2024)

Se muestra las partes que componen un vaporizador de GLP del tipo eléctrico trifásico, de tipo indirecta, debido que utilizara un fluido externo para que realice la transferencia de calor al GLP.

c) Vaporizadores Indirectos o de Fuego Indirecto

En un sistema de vaporización de fuego indirecto, el calor suministrado es por medio de vapor o agua caliente que ingresa a una línea de tubería que forma parte del intercambiador de calor como se observa en la Figura 10, esto transfiere energía térmica por convección al fluido GLP que se desea vaporizar. La característica principal es que el calentamiento del medio usado se produce en una instalación alejada (Gutierrez Cardenas & Quezada Martin, 2020).

Figura 4
Vaporizador de fuego indirecto



Fuente: (Algas SDI, 2024)

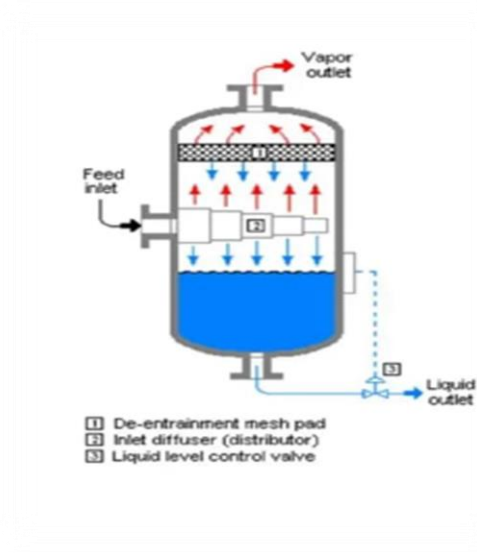
Se muestra el proceso con un vaporizador de fuego indirecto, la diferencia con el de fuego directo es que este requiere otro flujo externo de alimentación que transferirá su energía por convección para poder vaporizar el GLP.

2.1.1.9 Separador Flash de una etapa

Una alimentación multicomponente de fluidos se separa de dos fases en equilibrio (L y V). Dependiendo de las diferencias de presión de vapor de los componentes de la mezcla es posible realizar una separación simple en solo una etapa a temperatura y presión constantes. Se aumenta la concentración de los componentes livianos en la corriente de tope (vapor outlet)

y la composición de los componentes pesados en la corriente de fondo (liquid outlet) (Sepúlveda, 2018).

Figura 5
Esquema Separador Flash



Fuente: (Sepúlveda, 2018)

A) Ecuación de Lee-Kesler

El principio de estados correspondientes de tres parámetros como propusieron Pitzer y sus colaboradores ha sido utilizado ampliamente para correlacionar las propiedades volumétricas y termodinámicas necesarias para el diseño de un proceso determinado. El objetivo de Lee era desarrollar una correlación analítica, basada en el principio de estados correspondientes de tres parámetros, y cubrir todo el rango y de interés práctico en el procesado de hidrocarburos, además de mejorar la precisión y consistencia de las correlaciones publicadas. Esto se ha conseguido mediante dos ecuaciones de estado, similares en la forma de Benedict, Webb y Rubin, para fluidos simples y de referencia (Villca, 2022).

Tabla 1.-Correlación para el cálculo de las propiedades críticas Lee-Kesler

Lee- Kesler	$\ln(P_c) = \left(8,3634 - \frac{0,0566}{SG}\right) - \left(0,24244 + \frac{2,2898}{SG} + \frac{0,11857}{SG^2}\right) 10^{-3} * T_b$ $+ \left(1,4685 + \frac{3,648}{SG} + \frac{0,47227}{SG^2}\right) 10^{-7} * T_b^2$ $- \left(0,42019 + \frac{1,6977}{SG^2}\right) 10^{-10} * T_b^3$
	$T_c = 341,7 + 811,1 * SG + (0,4244 + 0,1174 * SG) * T_b$ $+ \frac{\left((0,4669 - 3,2623 * SG) * 10^5\right)}{T_b}$
	$PM = [D] + \frac{[A]}{T_b} + \frac{[B]}{T_b^3}$
	$D = 12272,6 + 9486,43 * SG + (4.6523 - 43,4387 * SG) * T_b$ $A = (1 - 0,77084 * SG - 0,02058 * SG^2) * \left(1.34437 - \frac{720,79}{T_b}\right) * 10^7$ $B = (1 - 0,80882 * SG + 0,02226 * SG^2) * \left(1,8828 - \frac{181,92}{T_b}\right) * 10^{12}$
	$T_{br} = \frac{T_b}{T_c}$ <p style="text-align: center;">Si $T_{br} < 0,8$</p> $\omega = \frac{\left(\ln\left(\frac{P_c}{14,696}\right) - 5,927143 + \frac{6,09648}{T_{br}} + 1,28862 \ln(T_{br}) - 0,1693437 T_{br}^6\right)}{15,2518 - \frac{15,6875}{T_{br}} - 13,4721 \ln(T_{br}) + 0,43577 T_{br}^6}$ <p style="text-align: center;">Si $T_{br} > 0,8$</p> $\omega = -7,904 + 0,135 K - 0,007465 K^2 + 8,359 T_{br} + \frac{1,408 - 0,0106 K}{T_{br}}$

Fuente: Obtenido de Barron Jhovana, 2024

2.1.1.10 Compresores

Los compresores de gas licuado de petróleo se utilizan principalmente para el transporte y presurización de gas licuado de petróleo o gases con propiedades similares. Un compresor cumple las siguientes funciones (YISEN ENERGY, 2024):

- Carga y descarga de camiones naufragados de gas licuado de petróleo, camiones naufragados y barcos naufragados;
- Envasado y vertido de gas licuado de petróleo o gas de similares propiedades.
- Recuperación de gas residual de gas licuado de petróleo o líquido residual.
- Compresor especial para la producción de productos químicos, su medio de compresión se puede dividir en: amoníaco líquido, diformaldehído, propileno, propano, butadieno, cloruro de vinilo, metano.

A) Estructura del compresor de gas licuado de petróleo

Los cilindros y las piezas de empaquetadura de los compresores de la serie GLP fabricados por buenos fabricantes de compresores GLP deben lubricarse sin aceite, ya que esto garantiza la pureza del medio durante el funcionamiento. Los componentes del cigüeñal, la biela y la cruceta están lubricados por salpicadura para garantizar un movimiento confiable.

Los compresores de GLP se pueden dividir en: vertical, de efecto simple, enfriado por aire, lubricación sin aceite, estructura de pistón alternativo, filtro de alta eficiencia, separador de gas, válvula de cuatro vías de dos posiciones, sistema de tuberías, motor a prueba de explosiones, etc., el sistema de protección se compone de válvula de cierre, flotador, válvula de seguridad, etc. (YISEN ENERGY, 2024)

B) Marco normativo

Según el Reglamento para Construcción y Operación de Plantas de Gas Licuado de Petróleo (GLP), 23 de julio de 1997 (ANH, 2014), especifica lo siguiente sobre el funcionamiento de compresores:

- Cuando el trasvase se efectuó por compresión de la fase gaseosa, el compresor debe disponer de presostatos de baja y alta. Anexo N°4. Especificaciones y características de los tanques de almacenaje de GLP.
- Los interruptores generales de los circuitos de alimentación de bombas, compresoras, motores y alumbrado de toda la instalación, estarán centralizadas en un panel situado próximo

a la entrada de la estación y de fácil acceso. Anexo N°4. Especificaciones y características de los tanques de almacenaje de GLP.

- El área de bombas y compresores de GLP deberá estar dotado de 2, 5 kilogramos de polvo químico seco por cada metro cubico por hora de capacidad de trasvase, con un mínimo de 50 kilogramos distribuidos, al menos, en dos (2) extintores. Anexo N°5. Normas de protección y seguridad industrial de los tanques de almacenaje de GLP.

- Cada compresor deberá identificarse en su placa (Anexo 7. Normas técnicas mínimas para plantas de engarrafado) y con la siguiente información:

- Fabricante compresor:

- Compresor tipo:

- Número de cilindros:

- Capacidad de succión ar.p.m. en M3/H:

- Presión de succión Mínima en bar:

- Presión de descarga Máxima en bar:

- Temperatura de descarga Máxima en 1C:

- Relación de compresión:

- Potencia requerida del motor eléctrico en KW:

2.1.1.11 Puente de Regulación

Son instalaciones que tienen la función de filtrar el gas, reducir y estabilizar su presión, manteniéndola constante en su salida, dentro de unos límites previamente determinados, independientemente de la presión de entrada y de los caudales circulantes. Estos dispositivos permiten reducir y adecuar la presión del gas desde las redes de transporte hasta el consumidor doméstico (GM, 2020).

Figura 6
Puente de Regulación



Fuente: (GM, 2020)

A) Filtros

Los filtros deben separar cualquier impureza existente del gas natural dado que estas pueden causar problemas en los equipos a proveer gas natural o en el mismo PRM (Fernández, 2018).

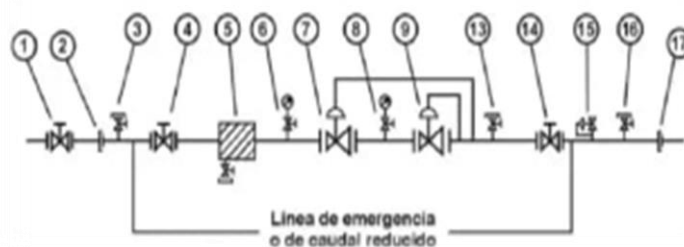
B) Válvulas

Las válvulas son accesorios que bloquean y permiten el paso de gas y deben instalarse a la entrada del PRM, aguas arriba y aguas abajo para poder cortar el suministro de gas si se presentara cualquier inconveniente. Pueden ser válvulas: de bola, de diafragma o de mariposa (Fernández, 2018).

C) Esquema de conexión de Ramas de Regulación

La Norma recomienda diversos tipos de tramos recomendados para PRM. Los más importantes se muestran a continuación:

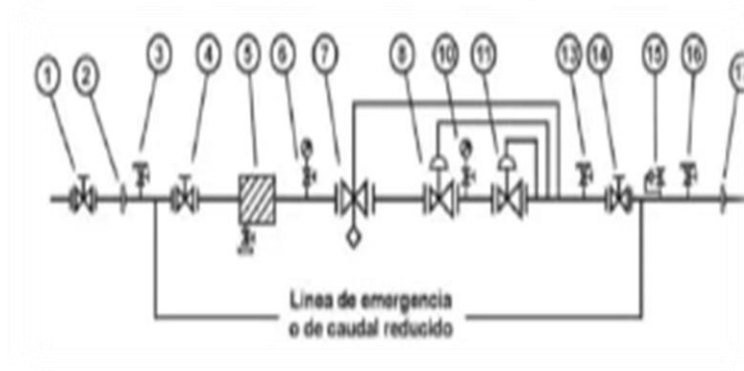
Figura 7
Esquema de conexión para presión de entrada menor a 10 bar



Fuente: (Fernández, 2018)

Figura 8

Esquema de conexión para presión de entrada mayor a 10 bar



Fuente: (Fernández, 2018)

1. Válvula de bloqueo general
2. Junta aislante aguas arriba
3. Válvula de toma aguas arriba
4. Válvula de bloqueo
5. Filtro
6. Manómetro aguas arriba
7. Válvula de seguridad por bloqueo
8. Válvula de seguridad de monitor
9. Válvula de seguridad monitor con bloqueo incorporado
10. Manómetro intermedio
11. Válvula reguladora principal
12. Válvula reguladora principal con seguridad monitor incorporado
13. Válvula de toma aguas abajo

14. Válvula de bloqueo aguas abajo
15. Válvula de alivio por venteo
16. Válvula de toma general aguas abajo
17. Junta aislante aguas abajo.

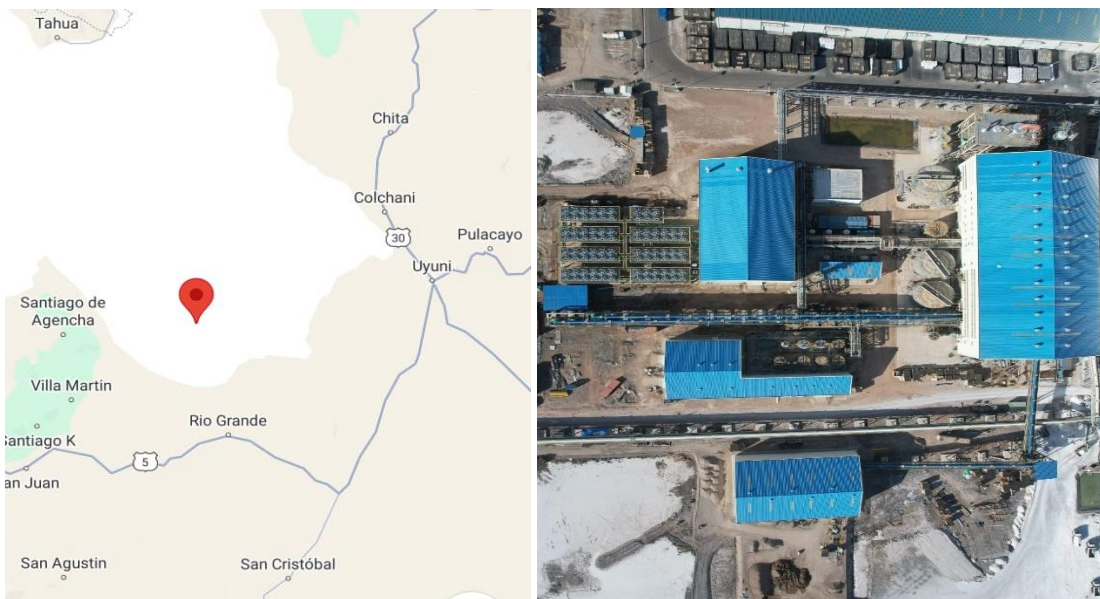
2.1.2. Marco contextual

2.1.2.1 Ubicación de la planta de carbonato de litio

La planta de carbonato de Litio queda ubicada en la localidad de Llipi, en el municipio de Colcha K, al borde del salar de Uyuni, donde se encuentra la principal reserva del país, en la región andina de Potosí. El complejo es administrado por la empresa estatal Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB).

Figura 9

Ubicación de la planta de Carbonato de litio (YLB) – Salar de Uyuni



Fuente: Google Map,202

2.1.2.2 Demanda de carbonato de litio

Con el inicio de operaciones de la planta industrial, Bolivia se unirá a la producción y exportación a escala industrial de carbonato de litio. El carbonato de litio es la materia prima para la fabricación de baterías que, a su vez, tienen alta demanda en el mercado internacional por la creciente producción de vehículos eléctricos.

Se prevé que la planta industrial comenzará a operar inicialmente con el 20% de su capacidad y al 100% a partir de 2024. Está proyectada para producir 15.000 toneladas métricas de carbonato de litio por año, cuando alcance su máxima capacidad.

El ministro de Hidrocarburos y Energías, Franklin Molina, ya anticipaba en agosto que la Planta de Carbonato de Litio producirá entre el 20 y 30% de su capacidad, para ir subiendo paulatinamente el siguiente año y para 2025 alcance la capacidad máxima. (Flores , 2024).

2.1.2.3 Distribución de la planta de carbonato de litio

Según la información proporcionada por la página de (YLB, 2024), la planta consta de las siguientes secciones que son:

Planta de Cloruro de potasio

Planta de Carbonato de Litio

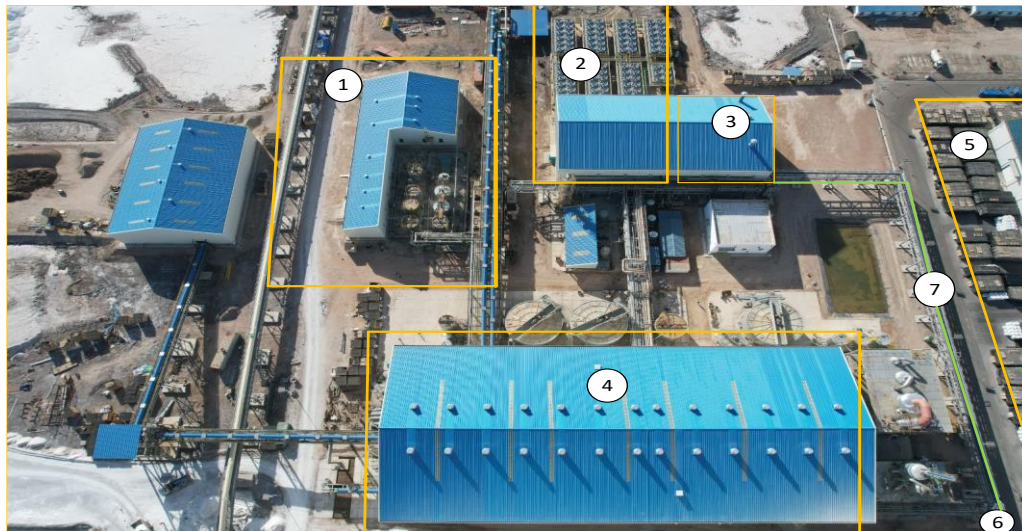
Lagunas de Evaporación

Planta de Tratamiento de de agua

Área de almacenes

Figura 10

Distribución de la planta de Carbonato de litio (YLB) – Salar de Uyuni



Fuente: Obtenido de Barron Jhovana,2024

1— Planta de tratamiento de agua

2—Área de Refrigeración

3—Sala de calderos de vapor

4—Área de proceso de carbonato de litio

5—Almacenes de productos terminados

6—Almacenamiento de GLP

7—Red de distribución de GLP, Almacenamiento de GLP- Sala de calderos de vapor²

2.1.2.4 Generación de vapor en la planta de Carbonato de Litio

Los calderos producen vapor seco, en 3 calderos separados paralelamente, vapor necesario para llevar a cabo los procesos en la sección según la Figura 6, dichos calderos cubren la demanda requerida sección 4 (Área de proceso de carbonato de litio, según la Figura 6) , además cubre la demanda propia para el precalentamiento interno y para la desgasificación. Estos calderos tienen como fuente de combustible GLP (Gas licuado de petróleo).

La demanda de vapor dependerá de los flujos de vapor requeridos por sección 4, los flujos calentados que serán afectados por las condiciones ambientales, y temporada del año.

La alimentación requerida en la sección 4, se dispondrá para la alimentación de los siguientes equipos:

Tanque de reactores

Intercambiadores de calor y un calentador auxiliar

Secadores de bandejas

Intercambiadores térmicos

Eyector de vapor.

Intercambiador de vapor

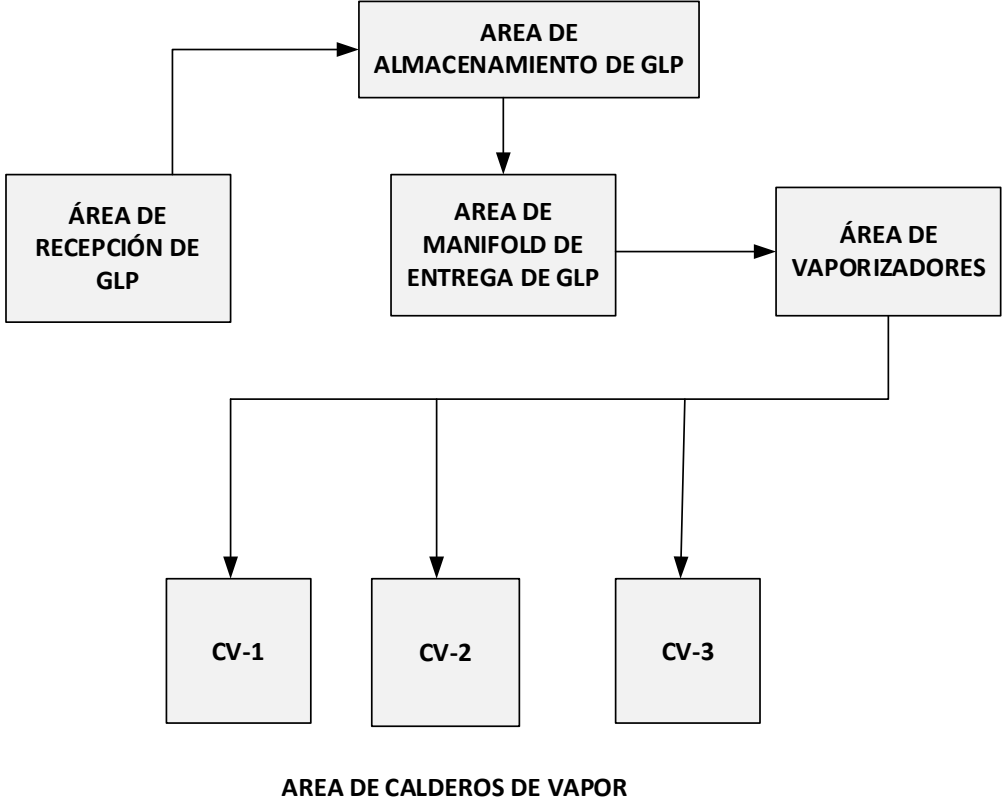
La función principal de los calderos de vapor es acondicionar a los tanques de reactores.

2.1.2.5 Distribución de GLP a los calderos de vapor

El estudio se enfocará en el área de red de distribución de GLP, desde el almacenamiento de GLP a la sala de calderos de vapor. La distribución de GLP empieza desde el transporte de GLP en camiones cisterna a la planta de litio, donde se hace la descarga respectiva al Área de

Almacenamiento de GLP, de esta área pasa al Área de Manifold de entrega de GLP para luego ingresar al área de los vaporizadores. De los vaporizadores empieza el trayecto de distribución hacia la sala de calderos. (CMAC, 2023). A continuación, se tiene un esquema, donde se detalla cada una de estas áreas:

Figura 11
Proceso de distribución de GLP a los calderos de Vapor (YLB) – Salar de Uyuni



Fuente: Obtenido de Barron Jhovana, 2024

2.1.2.6 Abastecimiento de gas a la planta de carbonato de litio

Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos (YPFB) entregará un volumen de 224.000 kilogramos por mes de Gas Licuado de Petróleo (GLP) a granel, energético que se empleará en el funcionamiento de dos calderos y un secador de la Planta Industrial de Sales de Potasio. Yacimientos de Litio Bolivianos efectuó la construcción, montaje y puesta en marcha de la Planta Industrial de Sales de Potasio en el municipio de Uyuni del departamento de Potosí.

La nueva planta requiere contar con el suministro de GLP para operar sus equipos y estamos prestos a suministrar el volumen demandado por este nuevo cliente. La estatal petrolera realizó el diseño y construcción de la red de GLP desde la salida de los tanques de almacenamiento

hasta el puente de regulación de primera etapa, pasando por las bombas y vaporizadores de GLP.

2.1.2.7 Situación actual de distribución de GLP a los calderos de vapor.

El sistema de almacenamiento cuenta con doce tanques estacionarios de almacenamiento de GLP distribuidos en baterías de seis tanques cada batería, que le permitirá una autonomía aproximada de cinco días.

Debido a las bajas temperaturas predominantes en la región de Uyuni, se cuenta con un sistema de bombeo de GLP para garantizar caudal y presión con el objetivo de llevar el producto desde la salida de los tanques hasta la entrada de los vaporizadores.

Pero este sistema de vaporizadores no abastece a la caída de presión existente, a continuación, se tiene las condiciones del GLP que debe tener al ingreso a los calderos:

Tabla 2.-Condiciones de ingreso de GLP a los calderos

Parámetros	Unidades	Valores
Fracción de Vapor	--	1
Temperatura	°F	70
Presión	Psig	8
Flujo masico	Kg/h	5000
Calor especifico	BTU/Lb-F	0,7

Fuente: (CMAC, 2023)

Nota: Los valores de esta tabla han sido modificados por razones de confidencialidad de la empresa.

Según la información proporcionada por la empresa existe una caída de presión del 30% al ingreso a los calderos y por esta caída de presión la fracción de vapor tiene una disminución de en un 5%.

Figura 12

Fotografía 1 de calderos de vapor -Planta de carbonato de litio



Fuente: Obtenido de Barron Jhovana, 2024

Figura 13

Fotografía 2 de calderos de vapor -Planta de carbonato de litio

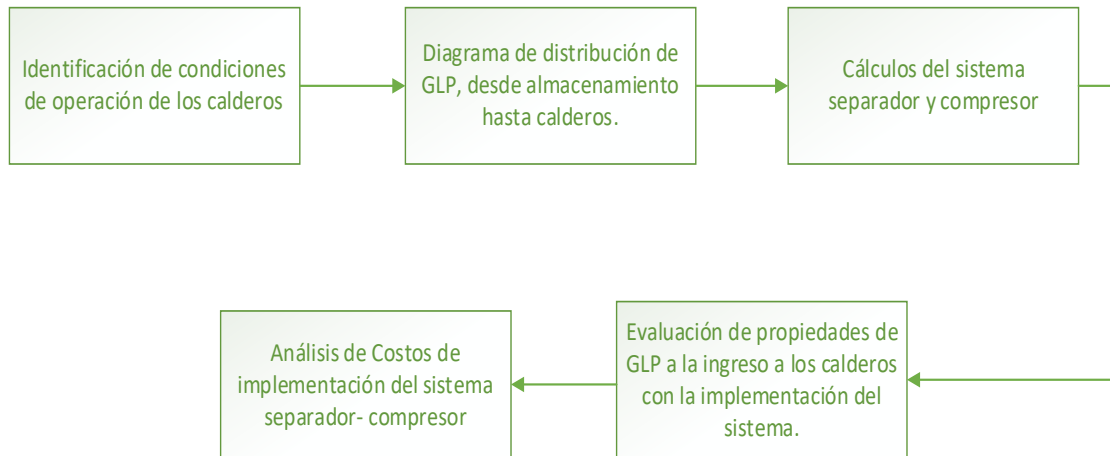


Fuente: Obtenido de Barron Jhovana, 2024

2.2. INFORMACION Y DATOS OBTENIDOS

Figura 14

Metodología de procedimiento



Fuente: obtenido de Barron Jhovana, 2024

2.2.1. Demanda de GLP para abastecimiento de calderos

- La planta de carbonato de litio producirá 2.5 toneladas (Ton) por hora (h) de carbonato de litio en un ciclo de proceso.
- Para cumplir un ciclo de proceso los calderos necesitan generar 50 toneladas por hora de vapor ($\text{Ton}_{\text{vapor}}/\text{h}$).
- El consumo de gas para un ciclo de proceso es de 1500 metros cúbicos por hora (m^3/h)

Esta información fue proporcionada por YLB, los datos fueron modificados por cuestión de confidencialidad de la empresa.

La demanda máxima de producción de carbonato de litio a cumplir es de 15000 toneladas por año ($\text{ton}_{\text{litio}}/\text{año}$).

Cálculo de la producción de carbonato de litio (PCL) en tonelada/hora considerando que la planta producirá las 24 horas al día y 360 días en un año.

$$PCL \left[\frac{\text{Ton}_{\text{litio}}}{h} \right] = 15000 \frac{\text{Ton}_{\text{litio}}}{\text{año}} * \frac{1 \text{ año}}{360 \text{ dias}} * \frac{1 \text{ dia}}{24h} \quad (1)$$

$$PCL \left[\frac{\text{Ton}_{\text{litio}}}{h} \right] = 1.736 \frac{\text{Ton}_{\text{litio}}}{h}$$

Para cumplir la demanda actual la planta deberá producir 1.736 Ton/h de carbonato litio.

Cálculo de flujo del vapor (vap) requerido para producir 1.736 Ton_{vapor}/h de carbonato de litio

$$\begin{array}{l} 2.5 \text{ Ton}_{\text{litio}}/h \text{ ----- } 50 \text{ Ton}_{\text{vap}}/h \\ 1.7 \text{ Ton}_{\text{litio}}/h \text{ ----- } \text{vap} \left[\text{Ton}_{\text{vap}}/h \right] \end{array}$$

$$\text{vap} \left[\frac{\text{Ton}_{\text{vap}}}{h} \right] = \frac{1.7 \frac{\text{Ton}_{\text{litio}}}{h} * 50 \frac{\text{Ton}_{\text{vap}}}{h}}{2.5 \frac{\text{Ton}_{\text{litio}}}{h}}$$

$$\text{vap} \left[\frac{\text{Ton}_{\text{vap}}}{h} \right] = 34 \frac{\text{Ton}_{\text{vap}}}{h}$$

Cálculo de consumo de gas (Cg) para generar $34 \frac{\text{Ton}_{\text{vap}}}{h}$.

$$C_g \left[\frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{h} \right] = \frac{34 \frac{\text{Ton}_{\text{vap}}}{h} * 35 \frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{h}}{50 \frac{\text{Ton}_{\text{vap}}}{h}} = 23.8 \frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{h}$$

$$C_g \left[\frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{h} \right] = 23.8 \frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{h}$$

Cálculo del consumo de Gas (Cg) para un año de producción de carbonato de litio en m³/año considerando que la planta producirá las 24 horas del día y 360 días en un año.

$$C_g \left[\frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{h} \right] = 23.8 \frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{h} * \frac{24h}{1 \text{ dias}} * \frac{365 \text{ dias}}{1 \text{ año}}$$

$$C_g \left[\frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{h} \right] = 205632 \frac{\text{m}^3_{\text{gas}}}{\text{año}}$$

Cálculo del consumo o la demanda de gas (C_g) en ft^3/dia

$$C_g \left[\frac{ft^3}{dia} \right] = 205632 \frac{m^3_{gas}}{año} * \frac{1 año}{360 dias} * \frac{35.315 ft^3}{1m^3}$$

$$C_g \left[\frac{ft^3}{dia} \right] = 20156 \frac{ft^3}{dia}$$

Cálculo del consumo o demanda de Gas para una producción de carbonato de litio de 10 años.

$$C_g \left[\frac{ft^3}{dia} \right] = 10 * 20156 \frac{ft^3}{dia}$$

$$C_g \left[\frac{ft^3}{dia} \right] = 201563 \frac{ft^3}{dia}$$

2.2.2 Líneas de distribución de GLP

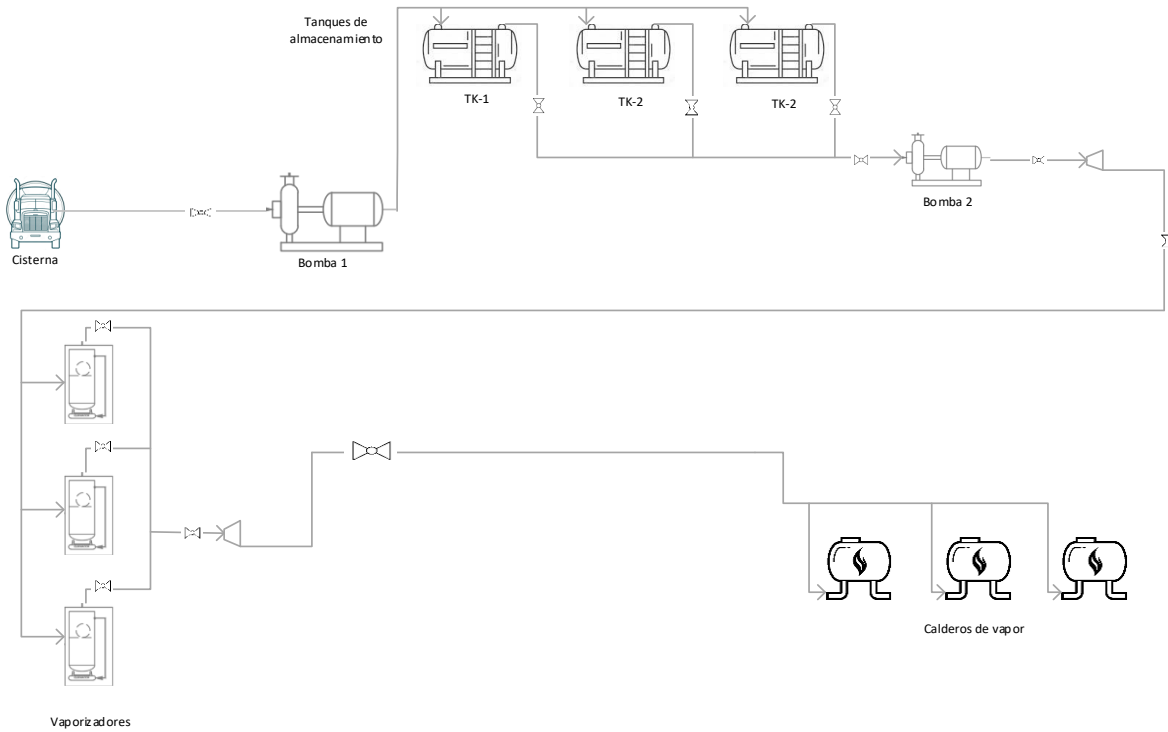
El proceso inicia con el suministro de GLP proporcionado por la Planta Separadora de Líquidos Rio Grande, por medio de transporte con camión cisterna.

Una vez que el camión cisterna se encuentre en planta, en la sección acondicionada para la descarga de GLP, se procede al descargue, a través de una tubería que interconecta el camión cisterna con la Bomba 1, la cual impulsa y desplaza el fluido a través de una tubería conectada al tanque de almacenamiento TK-1, TK-2 y TK3 donde se almacenara el GLP.

El GLP almacenado es transportado hacia los vaporizadores por medio de un sistema de tuberías interconectada con el vaporizador, se asume que la presión de los ranques de almacenamiento no cumplirá con las condiciones de operación, requeridas para el correcto funcionamiento de los vaporizadores, por lo cual el fluido será impulsado por medio de la Bomba 2, para llegar a las condiciones de operación del vaporizador, es en este equipo donde el GLP liquido cambia de estado a GLP gas, para así poder abastecerse a la planta de carbonato de litio. El vaporizador estará interconectado a los calderos mediante un sistema de tuberías

Figura 15

Diagrama de distribución de GLP desde almacenamiento a los calderos de vapor



Fuente: Obtenida en base a información proporcionada por la empresa CMAC

Tabla 3.-Condiciones de operación

Descripción	Unidades	Descarga de cisterna	Entrada a vaporizador 1	Salida a vaporizador 1
Fracción de vapor	-	0	0	1
Temperatura	°F	5	4,8	95
Presion	Psig	25,12	98	99
Flujo masico	Kg/h	12000	1000	100 0
Densidad	Lb/ft3	36	36	1,03
Calor especifico	Btu/lb-F	0,58	0,58	0,44

Fuente: Información por la empresa CMAC proporcionada

Tabla 4.-Condiciones de operación del área de regulación

Descripción	Unidades	Salida a vaporizadores	Ingreso área de regulación	Salida de área de regulación
Fracción de vapor	-	0,97	0,93	0,98
Temperatura	°F	94	92	75
Presión	Psig	100	23	5
Flujo masico	Kg/h	4300	4300	4300
Densidad	Lb/ft ³	1,03	1,03	0,33
Calor específico	Btu/lb-F	0,44	0,44	0,44

Fuente: Información proporcionada por la empresa CMAC

2.2.3 Selección del sistema separador-compresor

2.2.3.1 Para los Cálculos -Separador

$$\rho_{liquido} = 36 \frac{lb}{ft^3}$$

$$\rho_{vapor} = 1,73 \frac{lb}{ft^3}$$

$$Q_{vapor} = 574 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{Liquido} = 24 \frac{m^3}{h}$$

Tabla 5.-Cálculos del separador

Estado	Caudal Q(ft ³ /seg)	Densidad ρ (Lb/ft ³)	Flujo masico W(Lb/seg)
Gas (g)	5,626	1,73	9,734
Liquido (l)	0,235	36	8,469

Fuente: Obtenida de Barron J.,2024

Correlación K_v (*constante de souder y Brown*), se calculará el parámetro de “j” con la siguiente ecuación:

$$j = \frac{W_L}{W_g} * \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} = 0,19 \quad (2)$$

$$6,0 \geq j \geq 0,2$$

$$2,0 > j > 0,6$$

$$0,6 \geq j > 0,2$$

$$0,2 \geq j \geq 0,1$$

$$0,1 > j > 0,04$$

Por tanto k_v será igual a:

$$K_v = 0,0585 * j^2 - 0,551 * j + 0,4727 \quad (3)$$

Velocidad critica del gas permisible

$$V'_g = K_v * \sqrt{\frac{\rho_l - \rho_g}{\rho_g}} \left[\frac{ft}{seg} \right] \quad (4)$$

$$V_g = 0,85 * V'_g \left[\frac{ft}{seg} \right] \quad (5)$$

- Área de sección transversal

$$A'_g = \frac{Q_g}{V_g} \left[ft^2 \right] \quad (6)$$

$$A_g = 1,2 * A'_g \left[ft^2 \right] \quad (7)$$

- Diámetro del separador

$$d_{min} = 12 * \sqrt{\frac{4 * A_g}{\pi}} \left[in \right] \quad (8)$$

$$d_{min} = 30 \left[in \right]$$

$$D_N = 32 \text{ in}$$

- Velocidad del gas real

$$A_g^* = \frac{\pi}{4} * \left(\frac{D_N}{12}\right)^2 \quad [ft^2] \quad (9)$$

$$V_g^* = \frac{Q_g}{A_g^*} \quad \left[\frac{ft}{seg}\right] \quad (10)$$

$$V_g > V_g^*$$

- Volumen de retención de liquido

$$V_1 = t_{resp} * Q_l \quad [ft^3] \quad (11)$$

$$V_2 = t_{resp(API)} * Q_l \quad [ft^3] \quad (12)$$

$$40 < API \leq 1,5 \text{min}$$

$$25 \leq API \leq 40 \quad 3 \text{min}$$

$$API < 25 \quad 5 \text{min}$$

$$V_r = V_1 + V_2 \quad [ft^3] \quad (13)$$

- Altura de la boquilla de entrada

$$\lambda = \frac{Q_l}{Q_l + Q_g} \quad (14)$$

$$\rho_M = (1 - \lambda) * \rho_g + \lambda * \rho_l \quad \left[\frac{lb^3}{ft}\right] \quad (15)$$

$$W_M = W_g + W_l \quad [lb/seg] \quad (16)$$

$$Q_M = Q_g + Q_l \quad [ft^3/seg] \quad (17)$$

$$Ve_{min} = \frac{45}{\sqrt{\rho_M}} \quad [ft/seg] \quad (18)$$

$$Ve_{max} = \frac{60}{\sqrt{\rho_M}} \quad [ft/seg] \quad (19)$$

$$De_{min} = 12 * \sqrt{\frac{4 * Q_M}{\pi * Ve_{max}}} \quad [in] \quad (20)$$

$$De_{max} = 12 * \sqrt{\frac{4 * Q_M}{\pi * Ve_{min}}} \quad [in] \quad (21)$$

- Altura boquilla de entrada -NAAL (h_3):

$$h_3 = DE_N \quad [in] \quad (22)$$

- Altura de línea tangente superior y la boquilla de salida

$$h_o = \frac{D_N}{4} \quad [in] \quad (23)$$

- Altura tope extractor y la línea tangente y la línea tangente superior:

$$h_1 = 0,15 * D_N \quad [in] \quad (24)$$

- Espesor del extractor de niebla:

$$A_{malla} = \frac{Q_g}{V_g^*} \quad [ft^2] \quad (25)$$

$$a_{malla} = \sqrt{A_{malla}} \quad [ft] \quad (26)$$

- Altura del líquido entre NAAL-NBBL:

$$h_4 = 12^3 * \frac{V_r}{\frac{\pi}{4} * D_N^2} \quad [in] \quad (27)$$

- Altura máxima desde la boquilla de entrada hasta c/e el fondo de extractor:

$$c/e \quad h_2=24" \text{ o } 0,5 * D \quad h_2 = 0,5 * D_N \quad [in] \quad (28)$$

$$s/e \quad h_2=36" \text{ o } 0,3 * D \quad h_2 = 0,3 * D_N \quad [in] \quad (29)$$

- Altura entre NBLL -Boquilla inferior:

$$h_5 \geq 9$$

- Altura mínima efectiva del separador:

$$c/e \quad leff' = D_N + h_3 + h_1 + a_{malla} + h_4 + h_2 + h_5 \quad [in] \quad (30)$$

$$s/e \quad leff' = D_N + h_3 + h_4 + h_2 + h_5 \quad [in] \quad (31)$$

- verificar leff/D

$$2,5 < \frac{leff}{D} < 5$$

Longitud del equipo:

$$L = \frac{(1 * leff + 2 * h_0)}{12 * 3,28} \quad [m] \quad (32)$$

Tabla 6.-Resultados de dimensiones del separador

Parámetros a calcular	Variables	Valor
	J	0,191
Velocidad permisible del gas	Kv	0,370
	V'g (ft/seg)	1,646
	Vg(ft/seg)	1,399
Área de sección transversal requerida	A'g (ft ²)	4,022
	Ag (ft ²)	4,827
Diámetro de tambor	d (in)	29,749

	D(in)	32
	D(m)	0,8
Velocidad del gas real	A*g(ft ²)	5,585
	V*g (ft/seg)	1,007
	tr f(API) (seg)	90
Volumen de retención de liquido	v ₁ (ft ³)	21,173
	v ₂ /ft ³)	21,173
	V _r (ft ³)	42,345
	ρ_M (lb/ft ³)	3,105
	Wmezcla (lb/seg)	18,203
	Qmezcla (ft ³ /seg)	5,862
	λ	0,040
Altura de la boquilla de entrada	Ve,min(ft/s)	25,536
	Ve,max(ft/s)	34,048
	de,min (in)	5,618
	de,max(in)	6,487
	de(in)	6
	Ve (ft/seg)	29,853
Altura boquilla de entrada -NAAL (h3	h ₃ (IN)	6,000
Altura tope extractor y la línea tangente y la línea tangente superior	h ₁ (in)	4,800
	h ₁ (in) redon	5,000
Espesor del extractor de niebla	Amala(ft ²)	5,585
	ancho (in)	2,363
	ancho redon	2,500
AI NAAL-NBBL	h ₄ (in)	90,982
	h ₄ (in) redon	91,000
Altura Boq ent:	c/e h ₂ =24" o 0,5*D	16,000
	s/e h ₂ =36" o 0,5*D	8,925
AI NBBL-boq sal	h ₅ (in)	9
	c/e leff (in)	135,500

Altura efectiva del separador	s/e leff (in)	119,725
Verificar leff/D	c/e leff	4,234
	s/e leff	3,741
Longitud total	m	3

Fuente: Obtenido de Barron J, 2024

2.2.3.2 Cálculos en composición en el separador

Se considera un separador de una sola etapa de una mezcla multicomponente, el algoritmo de desarrollo es la siguiente:

A) Algoritmo general del flash

Conocidos presión y temperatura (*fracción vaporizada* (β), P y Z_i)

- Suponer T_{flash}
- calcular P_k (Flash)
- calcular presiones de saturación con T del sistema
- Calcular Z_{ci} , T_r , A_i , B_i
- calcular K_i
- calcular $y_i = \frac{Z_i K_i}{(1+\beta)(K_i-1)}$; $x_i = \frac{Z_i}{(1+\beta)(K_i-1)}$ (33)
- Verificar si la $\sum(x_i - y_i) = 0,0001$
- NO \rightarrow Volver a Suponer T_{flash}
- SI \rightarrow Normalizar

$$x_i = \frac{x_i}{\sum x_i}; y_i = \frac{y_i}{\sum y_i}; \quad (34)$$

$$x_{i,k} \neq x_{i,k+1}$$

$$y_{i,k} \neq y_{i,k+1}$$

Relación de equilibrio

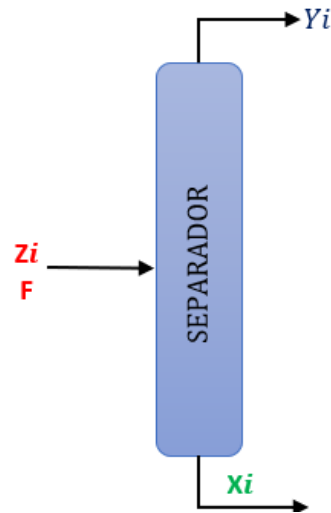
$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \quad (35)$$

Criterio para resolver el flash

$$\sum_{i=1}^N \frac{Z_i(1-K_i)}{1+\beta(K_i-1)} = 0 \quad (36)$$

Figura 16

Diagrama de un separador flash



Fuente: obtenido de Barron J, 2024

Tabla 7.-Condiciones de operación de Separador

Condiciones de operación del Separador	
P_{man} (Psi)	98
P (Psia)	112,70
F(Kg/h)	4300,00
F (Kmol)	89,30
(S.G.) γ	0,56
Tebull (°R)	433,17
Fracción vaporizada requerida	0,96

Fuente: Obtenido de Barron J, 2024

Las propiedades críticas de cada componente se puede visualizar en el Anexo 1 y 2

Tabla 8.- Composición de GLP

Comp.	% Molar
C1	0,1
C2	3
C3	65,7
i-C4	9,4
n-C4	21
i-C5	0,5
C5	0,2
C6	0,1

Fuente: (Rgrados, 2011)

- Correlación de kesler and Lee (1969)

$$PM = [D] + \frac{[A]}{T_b} + \frac{[B]}{T_b^3} \quad (37)$$

$$D = 12272,6 + 9486,43 * SG + (4.6523 - 43,4387 * SG) * T_b \quad (38)$$

$$A = (1 - 0,77084 * SG - 0,02058 * SG^2) * \left(1,34437 - \frac{720,79}{T_b}\right) * 10^7 \quad (39)$$

$$B = (1 - 0,80882 * SG + 0,02226 * SG^2) * \left(1,8828 - \frac{181,92}{T_b}\right) * 10^{12} \quad (40)$$

Correlación para el cálculo de las propiedades críticas de kesler and Lee

- Temperatura crítica

$$T_c = 341,7 + 811,1 * SG + (0,4244 + 0,1174 * SG) * T_b + \frac{((0,4669 - 3,2623 * SG) * 10^5)}{T_b} \quad (41)$$

- Presión crítica

$$\ln(P_c) = \left(8,3634 - \frac{0,0566}{SG}\right) - \left(0,24244 + \frac{2,2898}{SG} + \frac{0,11857}{SG^2}\right) 10^{-3} * T_b + \left(1,4685 + \frac{3,648}{SG} + \frac{0,47227}{SG^2}\right) 10^{-7} * T_b^2 - \left(0,42019 + \frac{1,6977}{SG^2}\right) 10^{-10} * T_b^3 \quad (42)$$

- Temperatura reducida

$$T_{br} = \frac{T_b}{T_c} \quad (43)$$

- Factor acéntrico

$$Si \ T_{br} < 0,8$$

$$\omega = \frac{\left(\ln\left(\frac{P_c}{14,696}\right) - 5,927143 + \frac{6,09648}{T_{br}} + 1,28862 \ln(T_{br}) - 0,1693437 T_{br}^6\right)}{15,2518 - \frac{15,6875}{T_{br}} - 13,4721 \ln(T_{br}) + 0,43577 T_{br}^6} \quad (44)$$

Si $T_{br} > 0,8$

$$K = \frac{(1,8 * T_b)^{\frac{1}{3}}}{SG} \quad (45)$$

$$\omega = -7,904 + 0,135 K - 0,007465 K^2 + 8,359 T_{br} + \frac{1,408 - 0,0106 K}{T_{br}} \quad (46)$$

- Factor de compresibilidad crítico

$$Z_c = \frac{P_c * V}{10,73 * T_c} \quad (47)$$

- Constante de reparto aproximado del componente i

$$K_i = \frac{1}{P_{re}} * EXP \left((A_i * B_i) * (1 - P_r)^{\frac{0,33}{T_r}} \right) \quad (48)$$

$$A_i = 10,7016 - \ln(P_K) - \left(\frac{4,4316}{T_r}\right) - \left(\frac{0,1968}{T_r^3}\right) \quad (49)$$

$$B_i = 6,3816 - 29,002 * Z_{ci} + 35,3443 * Z_{ci}^2 \quad (50)$$

Tabla 9.-Tabulación de datos de propiedades críticas del GLP

Para cálculo de Ki	
PM	63,559
Tc (°R)	694,26
Pc (Psia)	565,38
Tbr	0,624
V (ft ³ /lbmol)	14,435
Zci	1,096
Pk (Psia)	1088,44
Pr	0,104

Fuente: Obtenido de Barron Jhovana, 2024

Tabla 10.-Tabulación de resultados de composición de fase vapor y liquido del separador

Alimentación		T crítica	Z crítica	T red	Parámetros de correlación		Ki	Composición (%Molar)	
Comp.	Zi	Tc (°R)	Zci	Tr	Ai	Bi		Yi (vap)	Xi (liq)
C1	0,001	343,3	0,288	1,640	0,962	0,961	23,851	0,10	0,00
C2	0,03	549,7	0,289	1,024	-0,802	0,952	4,621	3,10	0,67
C3	0,657	665,5	0,281	0,846	-1,855	1,023	1,568	66,67	42,53
i-C4	0,094	734	0,270	0,767	-2,505	1,128	0,652	9,20	14,12
n-C4	0,21	766,1	0,274	0,735	-2,818	1,089	0,520	20,25	38,91
i-C5	0,005	830	0,270	0,678	-3,456	1,128	0,240	0,44	1,85
C5	0,002	845,5	0,263	0,666	-3,614	1,199	0,159	0,17	1,04
C6	0,001	913,7	0,264	0,616	-4,326	1,188	0,076	0,07	0,89

Fuente: Obtenido de Barron Jhovana, 2024

La Temperatura a la que tiene que operar el separador para cumplir las condiciones especificadas es de 562,9 °R

B) Cálculos – compresor

Capacidad del gas requerido:

$$C_g = 201563 \frac{\text{ft}^3_{\text{gas}}}{\text{dia}}$$

P_1 = Presión de succión = 30 Psig

P_2 = Presión de descarga = 120Psig

Temperatura de succion = 562,9 °R

Presion atmosférica en Uyuni = 14,8 psia

$$P_1 = 30 + 14,8 = 44,8 \text{ psia}$$

$$P_2 = 120 + 14,8 = 134,8 \text{ psia}$$

La relación de compresión será:

$$R_c = \frac{134,8}{44,8} = 3 \quad (51)$$

Con una constante de gas de $K=1.25$ y con el dato de R_c , calculamos la temperatura final aplicando la ecuación:

$$T_2 = T_1 * R_c * \frac{K - 1}{K}$$
$$T_2 = 75^\circ\text{F} * 3 * \frac{1,25 - 1}{1,25}$$
$$T_2 = 45^\circ\text{F}$$

Con estos datos se lee potencia de frenado de 68 BHP, reemplazando en la ecuación de potencia tenemos (ANEXO 4):

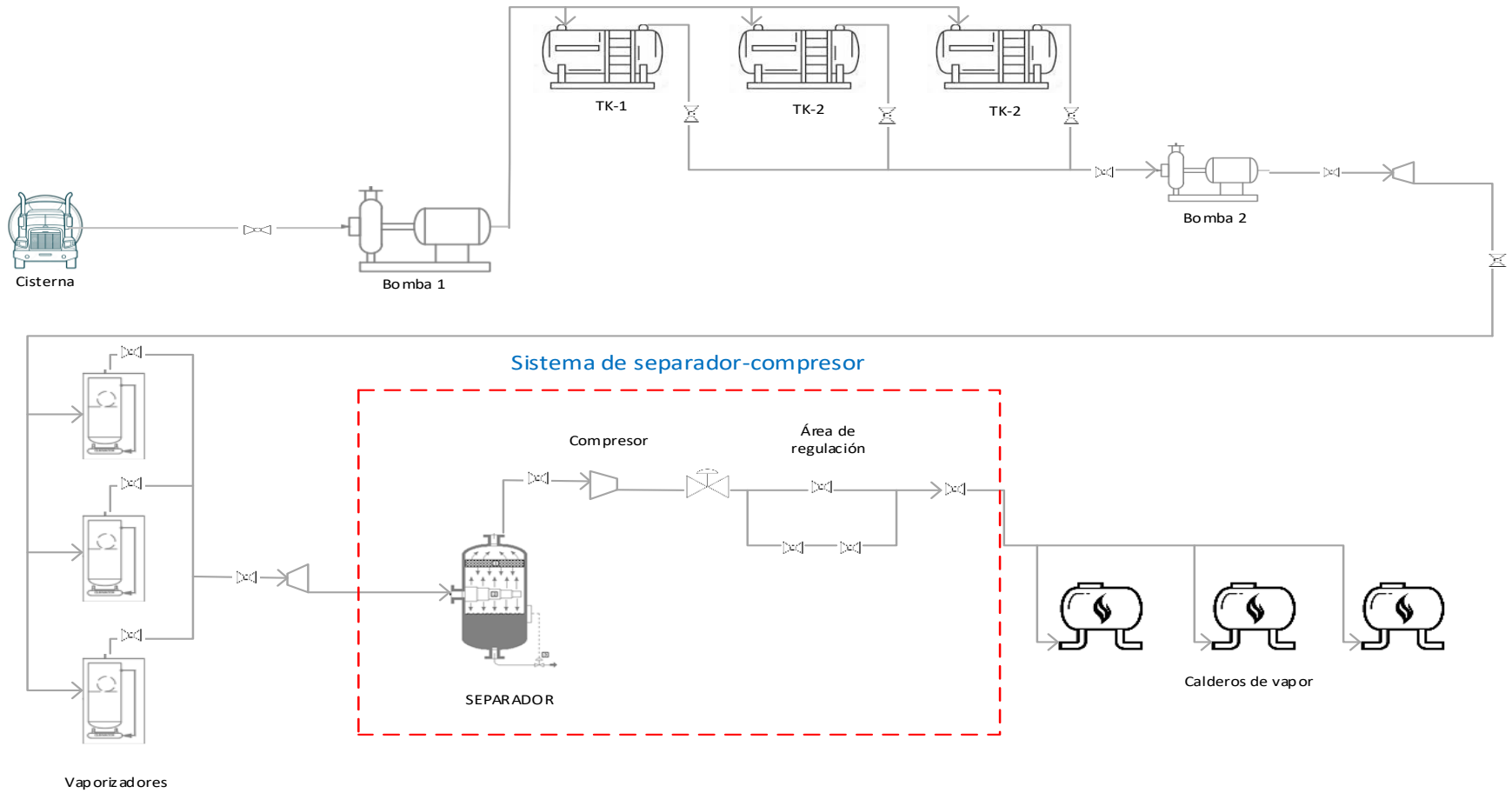
$$\text{Potencia} = \frac{\text{BPH}}{\text{MMPCD}} * \frac{Q}{1 * 10^6} \quad (52)$$
$$\text{Potencia} = 68 \frac{\text{BPH}}{\text{MMPCD}} * \frac{201563}{1 * 10^6}$$

$$\text{Potencia} = 14 \text{ BHP}$$

Para poder suministrar el GLP en estado gas a los calderos, a condiciones requeridas por YLB se realizará la implementación de un sistema de Separador -Compresor con un Puente de Regulación y medición que cumplirá la función de Mantener la presión constante de operación requerida por los calderos.

En el siguiente diagrama se puede visualizar la ubicación del sistema propuesto:

Figura 17
Diagrama de implementación de sistema separador compresor



Fuente: Obtenido de Barron Jhovana, 2024

2.2.4 Evaluación de costos de implementación de sistema separador-compresor

Tabla 11.- Estimación de costos de implementación de Sistema separador-re compresor y puente de regulación en la línea de distribución de GLP a los calderos de vapor

Costos de inversión	Unidad	USD / unidad	Cantidad	Costo (USD)
Inversión de capital fijo				
válvulas y accesorios	milla	55.521	1	55.521
Estación de compresión	Hp	32.000	1	32.000
Puente de regulación y medición	unidad	96.047	1	96.047
Separador	unidad	75000	1	75000
Servidumbre	Global	67.560	1	67.560
Ingeniería y construcción	Global	101.340	1	101.340
Contingencia	Global	168.901	1	168.901
Total (USD)				596.369

Fuente: Cotizaciones y aproximación de costos, 2024

2.3. ANALISIS Y DISCUSION

La operación eficiente de la planta de carbonato de litio depende en gran medida de un suministro continuo y confiable de gas licuado de petróleo (GLP). Para asegurar este suministro, se han llevado a cabo cálculos y estimaciones detalladas que abarcan desde la demanda de gas hasta el diseño de equipos críticos.

La demanda de GLP ha sido determinada para un año de operación de la planta. Este enfoque permite una planificación precisa del suministro, evitando interrupciones que podrían afectar negativamente la producción. En contraste, la demanda de GLP se ha calculado para un periodo de diez años, proporcionando una perspectiva a largo plazo de las necesidades energéticas de la planta.

El diseño del separador es un componente crítico para la eficiencia del proceso de separación de fases vapor y líquido del GLP. Se ha optado por un separador vertical con una altura de 3 metros y un diámetro de 0.8 metros, dimensiones que se consideran adecuadas para manejar el caudal requerido. Los cálculos del equilibrio de fases en el separador se realizaron bajo la premisa de una sola etapa y presión constante. La utilización de la correlación de Kessler-Lee para las propiedades termodinámicas garantiza una estimación precisa de las fracciones de vapor y líquido.

En el separador, se eliminan trazas de componentes pesados en la fase líquida, mientras que en la fase vapor se incrementa la proporción de propano y butano, gases de interés en los calderos. Este enfoque no solo optimiza la eficiencia del proceso, sino que también asegura que los componentes más valiosos se concentren en la fase vapor, mejorando la calidad del GLP.

Un componente esencial del sistema es el compresor, cuya potencia requerida se ha calculado en 14 BHP para alcanzar la presión deseada. Posteriormente, es necesario la instalación de un puente de regulación para ajustar la presión según las especificaciones de los calderos, establecida en 8 psig. Este sistema de regulación es vital para mantener la estabilidad y seguridad del suministro de gas a los calderos, evitando fluctuaciones que podrían afectar la eficiencia operativa y la seguridad del proceso.

La inversión estimada para la implementación es de 596,369 dólares. Esta inversión significativa subraya la importancia de mejorar el rendimiento en los calderos y asegurar la vida útil de estos equipos operando a las condiciones técnicas especificadas.

CAPITULO III: CONCLUSIONES

Según el diagnóstico realizado con los datos proporcionados, se identificaron las condiciones óptimas de operación de los calderos de vapor. En el análisis, se detectaron bajas presiones de entrada y una composición de propano 2% inferior a las especificaciones técnicas requeridas por los calderos. Estas deficiencias podrían afectar la eficiencia y el rendimiento de los calderos.

Para abordar estos problemas, se propuso la implementación de un separador bifásico. Este dispositivo tiene el objetivo de ajustar la composición del gas a un 67% de propano, además de vaporizar la fracción líquida generada en la línea de los vaporizadores. Según las especificaciones técnicas de los calderos, es crucial que el gas llegue a los calderos como vapor al 100% para garantizar un funcionamiento óptimo.

El separador, diseñado como vertical, tendrá dimensiones de 3 metros de altura y 0,8 metros de diámetro, de acuerdo con los cálculos realizados. Estas dimensiones aseguran una capacidad adecuada para manejar el flujo de gas y cumplir con los requisitos de separación y vaporización.

El sistema propuesto incluye varios componentes clave: vaporizadores, seguidos por el separador bifásico, un compresor y un puente de regulación. El compresor seleccionado tiene una potencia de 14 BHP, lo que es adecuado para alcanzar la presión de descarga necesaria. A continuación, el gas pasa por un puente de regulación de presión para ajustar la presión de entrada a los calderos a 8 psig, como se requiere por las especificaciones técnicas.

Además, se realizó una estimación detallada de costos para la implementación de todo el sistema, que incluye el separador, el compresor y el puente de regulación. El costo total estimado es de aproximadamente 596,369 dólares. Esta inversión contempla no solo la compra y instalación de los equipos, sino también los costos asociados a la integración del sistema en la infraestructura existente, asegurando así un proceso de transición eficiente y minimizando posibles interrupciones en la operación de los calderos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aenlle Imbrosciano, M. P., Albimari, A., Benitez de Lugo, M., Firmo, T., & Hortal, J. (2019). PRODUCCIÓN DE CARBONATO DE LITIO A PARTIR DE SALMUERA. Buenos Aires.
- Algas SDI. (16 de Abril de 2024). Algas-IDE. Obtenido de <https://algas-sdi.com/>
- Ali Quispe, H. W. (2023). CÁLCULO Y ANÁLISIS DEL FACTOR DE SEGURIDAD PARA LA DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA DE UNA NUBE DE GNL PARA LA ESTACIÓN SATELITAL DE REGASIFICACIÓN DE COBIJA. La Paz.
- ANH. (2014). REGLAMENTO PARA LA CONSTRUCCION Y OPERACION DE PLANTAS DE DISTRIBUCION DE GAS LICUADO DE PETROLEO (GLP).
- Arroyo Panchi , B. D., & Tufiño Leon, W. J. (2016). Rediseño de la instalacion centralizada de gas licuado de petroleo (GLP) de la empresa Textil San Pedro segun la norma NTE INEN 2260, e implementacion de un plan de mantenimiento para el cumplimiento del registro oficial 313 y 435. Quito.
- Campbell, J. M. (Diciembre de 2014). PetroSkills. Obtenido de PretroSkills: <https://www.jmccampbell.com/tip-of-the-month/spanish/?p=1487>
- Castellano Sastre , S. (2012). Diseño de una instalación de GLP en una estructura autoportante tipo skid para autoabastecimiento de gas. Cataluña .
- Checa , S. k., & Orellana, J. F. (2011). COMERCIALIZACIÓN DE GAS NATURAL LICUADO EN EMPRESA COMERCIALIZADORA DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO. Guayaquil.
- CMAC. (2023). MANUAL DE OPERACION DE CALDEROS DE VAPOR.
- CourseHero. (2015). Calculo de potencia para la seleccion de un compresor. Obtenido de <https://www.coursehero.com/file/55631762/Calculos-de-potencia-para-la-seleccion-de-un-compresorpdf/>
- CRYOSPAIN. (16 de Abril de 2024). ¿Para qué se utilizan los tanques de GLP? Información técnica e importante. Obtenido de <https://cryospain.com/lpg-tanks-technical-important-information>
- Departamento de Planificacion y Evaluacion Institucional. Universidad San Francisco Xavier de Chuquisaca. (2021). Directrices Específicas y Operativas de Formulación del POA.

Cronograma de Formulación. Objetivos de Gestión Institucionales, Específicos, Catálogo Básico de Indicadores. Obtenido de <https://usfx.bo/>

Dirección de Planificación. Ministerio de Economía y Finanzas Bolivia. (2020). Formulación del POA. Obtenido de https://www.google.com/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=0CAIQw7AJahcKEwjoiZWz7-7_AhUAAAAAHQAAAAQAw&url=https%3A%2F%2F repositorio.economiayfinanzas.gob.bo%2Fdocumentos%2FDGPLA%2FTutorial%2520de%2520Formulaci%25C3%25B3n%2520del%2520POA_Transcrip

ENERGIA BOLIVIA . (16 de abril de 2024). YPFB entregará 224.000 kilogramos por mes de GLP a granel a la Planta Industrial de Sales de Potasio. Obtenido de https://www.energiabolivia.com/index.php?option=com_content&view=article&id=5086:ypfb-entregara-224-000-kilogramos-por-mes-de-glp-a-granel-a-la-planta-industrial-de-sales-de-potasio&catid=54&Itemid=172

Facultad de Ciencias y Tecnología. (marzo de 2006). Revista Informativa de la Facultad de Tecnología. 1, 120. Sucre, Bolivia: Imprenta Editorial Tupac Katari.

Facultad de Ciencias y Tecnología. (03 de 2023). Documentación Administrativa Facultad de Ciencias y Tecnología. Sucre, Bolivia.

Facultad de Ciencias y Tecnología. (30 de 04 de 2023). SITIO OFICIAL DE LA FACULTAD DE CIENCIAS TECNOLOGIA. Obtenido de <https://tecnologia.usfx.bo>

Fernández, M. (29 de Mayo de 2018). Scribd. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/document/380470503/Puentes-de-Regulacion-y-Medicion>

Flores , Y. (25 de Noviembre de 2024). Planta de Carbonato de Litio inicia fase de pruebas mecánicas con carga. La Razon.

GM, F. (3 de Mayo de 2020). Scribd. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/document/459667515/PUENTES-DE-REGULACION-Y-MEDICION-docx>

Gutierrez Cardenas , B. N., & Quezada Martin, A. J. (2020). Implementación de un sistema de vaporización forzada automática de GLP en una empresa manufacturera de envases plásticos y Metálicos. Guayaquil-Ecuador.

- Heras, G. J. (2013). Analisis comparativo de gasoductos virtuales frente a otras alternativas de abastecimiento energetico. Buenos Aires .
- Los Tiempos. (9 de septiembre de 2022). Producción de gas en Bolivia: Tarija aporta con 48% y Santa Cruz con 39%. Los Tiempos .
- Mendez Martin, J. (2019). Extraccion de litio en el salar de uyuni. La Paz.
- Ministerio de Economía y Finanzas. (2023). Clasificadores Presupuestarios Gestión 2023. Obtenido de https://repositorio.economiayfinanzas.gob.bo/documentos/VPCF/DGP/2023/Clasificadores_Presupuestarios_Gestion_2023.pdf
- MMTuberia. (16 de Abril de 2023). Las tuberías de acero al carbono y la transportación de gas. Obtenido de <https://www.mmtuberia.com/blog/las-tuberias-de-acero-al-carbono-y-la-transportacion-de-gas>
- Opinion. (15 de octubre de 2014). Reservas probables de gas en la llajta llegan a 7 TCF. Diario la Opinion.
- Ortega, C. (2023). Método analítico: Qué es, para qué sirve y cómo realizarlo. Obtenido de <https://www.questionpro.com/blog/es/metodo-analitico/>
- Ortiz Limón, M. (2023). INFORME DE RENDICION DE CUENTAS DE LA GESTION 2022 DE LA FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA. Sucre.
- Pulgarin, A. J., & Rincon, G. L. (2021). PROPUESTA TÉCNICA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO Y TRANSFORMACIÓN DE GAS NATURAL LICUADO PARA LA ZONA SUR OCCIDENTE DEL PAÍS. Bogota.
- Ramírez Martínez, I. F. (2013). APUNTES DE METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN. Un Enfoque Crítico. Sucre: Servicios Gráficos PRISMA - 6465261. Obtenido de https://usfx.bo/Documentos/RepositorioLibros/APUNTES_DE_METODOLOGIA_DE_LA_INV.pdf
- Reyes Martinez, I., Cadena Martínez, L., & De León Vázquez, I. (s.f.). La importancia del análisis de los estados financieros en la toma de decisiones. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Obtenido de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/tlahuelilpan/n4/e2.html>

Rgrados. (7 de Septiembre de 2011). Slideshare. Obtenido de Slideshare:
<https://es.slideshare.net/slideshow/propiedades-y-caractersticas-del-glp-9166571/9166571>

Sánchez Ruiz, E. E. (1991). Apuntes sobre una metodología histórico-estructural (con énfasis en el análisis de medios de difusión). Obtenido de <http://biblioteca.udgvirtual.udg.mx/jspui/handle/123456789/2613>

Sepúlveda, J. (11 de Septiembre de 2018). Scribd. Obtenido de Scribd:
<https://es.scribd.com/document/388304000/Clase-Separador-Flash>

Villca, O. (2022). Studoku. Obtenido de Studoku:
<https://www.studocu.com/bo/institution/universidad-mayor-de-san-andres/1309?origin=uploader-suggestion>

Xinhua. (3 de marzo de 2020). Bolivia se consolida como el mayor exportador de GLP a Paraguay y Perú. America Economía.

YISEN ENERGY. (7 de Abril de 2024). Descripción General De La Operación Y La Estructura Del Compresor De GLP. Obtenido de OIL AND GAS SUPERCHARGING AND EXPLOTATION TECHNOLOGY : <https://es.oil-gassuperchargedsystem.com/>

YLB. (16 de abril de 2024). YAacimiento de Litio Bolivianos. Obtenido de <https://www.ylb.gob.bo/>

YPFB . (2015). DOCUMENTO BASE DE CONTRATACION DE SERVICIO DE TRANSPORTE INTERNACIONAL DE GLP Y/O BUTANO POR CISTERNAS . La Paz .

ANEXOS

Anexo 1Tabla de masa molar constante de gas y propiedades del punto crítico.

Masa molar, constante de gas y propiedades del punto crítico						
Sustancia	Fórmula	Masa molar, M kg/kmol	Constante de gas, R kJ/kg · K*	Propiedades del punto crítico		
				Temperatura, K	Presión, MPa	Volumen, m ³ /kmol
Agua	H ₂ O	18.015	0.4615	647.1	22.06	0.0560
Aire	—	28.97	0.2870	132.5	3.77	0.0883
Alcohol etílico	C ₂ H ₅ OH	46.07	0.1805	516	6.38	0.1673
Alcohol metílico	CH ₃ OH	32.042	0.2595	513.2	7.95	0.1180
Amoniaco	NH ₃	17.03	0.4882	405.5	11.28	0.0724
Argón	Ar	39.948	0.2081	151	4.86	0.0749
Benceno	C ₆ H ₆	78.115	0.1064	562	4.92	0.2603
Bromo	Br ₂	159.808	0.0520	584	10.34	0.1355
n-Butano	C ₄ H ₁₀	58.124	0.1430	425.2	3.80	0.2547
Cloro	Cl ₂	70.906	0.1173	417	7.71	0.1242
Cloroformo	CHCl ₃	119.38	0.06964	536.6	5.47	0.2403
Cloruro metílico	CH ₃ Cl	50.488	0.1647	416.3	6.68	0.1430
Criptón	Kr	83.80	0.09921	209.4	5.50	0.0924
Diclorodifluorometano (R-12)	CCl ₂ F ₂	120.91	0.06876	384.7	4.01	0.2179
Diclorofluorometano (R-21)	CHCl ₂ F	102.92	0.08078	451.7	5.17	0.1973
Dióxido de carbono	CO ₂	44.01	0.1889	304.2	7.39	0.0943
Dióxido de sulfuro	SO ₂	64.063	0.1298	430.7	7.88	0.1217
Etano	C ₂ H ₆	30.070	0.2765	305.5	4.48	0.1480
Etileno	C ₂ H ₄	28.054	0.2964	282.4	5.12	0.1242
Helio	He	4.003	2.0769	5.3	0.23	0.0578
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	86.179	0.09647	507.9	3.03	0.3677
Hidrógeno (normal)	H ₂	2.016	4.1240	33.3	1.30	0.0649
Metano	CH ₄	16.043	0.5182	191.1	4.64	0.0993
Monóxido de carbono	CO	28.011	0.2968	133	3.50	0.0930
Neón	Ne	20.183	0.4119	44.5	2.73	0.0417
Nitrógeno	N ₂	28.013	0.2968	126.2	3.39	0.0899
Óxido nitroso	N ₂ O	44.013	0.1889	309.7	7.27	0.0961
Oxígeno	O ₂	31.999	0.2598	154.8	5.08	0.0780
Propano	C ₃ H ₈	44.097	0.1885	370	4.26	0.1998
Propileno	C ₃ H ₆	42.081	0.1976	365	4.62	0.1810
Tetracloruro de carbono	CCl ₄	153.82	0.05405	556.4	4.56	0.2759
Tetrafluoroetano (R-134a)	CF ₃ CH ₂ F	102.03	0.08149	374.2	4.059	0.1993
Triclorofluorometano (R-11)	CCl ₃ F	137.37	0.06052	471.2	4.38	0.2478
Xenón	Xe	131.30	0.06332	289.8	5.88	0.1186

Fuente: Obtenido del Manual de fundamentos de química

Anexo 2

Cálculo del peso molecular del gas

Gas	Composición (y_i)	Peso molecular del compuesto (PM_i)	Peso molecular del gas ($PM_i \cdot y_i$)
Metano	0.8517	16.04	13.6618
Etano	0.0777	30.07	2.3373
Propano	0.0288	44.10	1.2721
i-butano	0.0054	58.12	0.3144
n-butano	0.0075	58.12	0.4359
i-pentano	0.0023	72.15	0.1652
n-pentano	0.0014	72.15	0.1003
Hexano	0.0010	86.18	0.0870

Fuente: Obtenido en base a tabla 1 y a datos obtenidos del anexo 1

Anexo 3

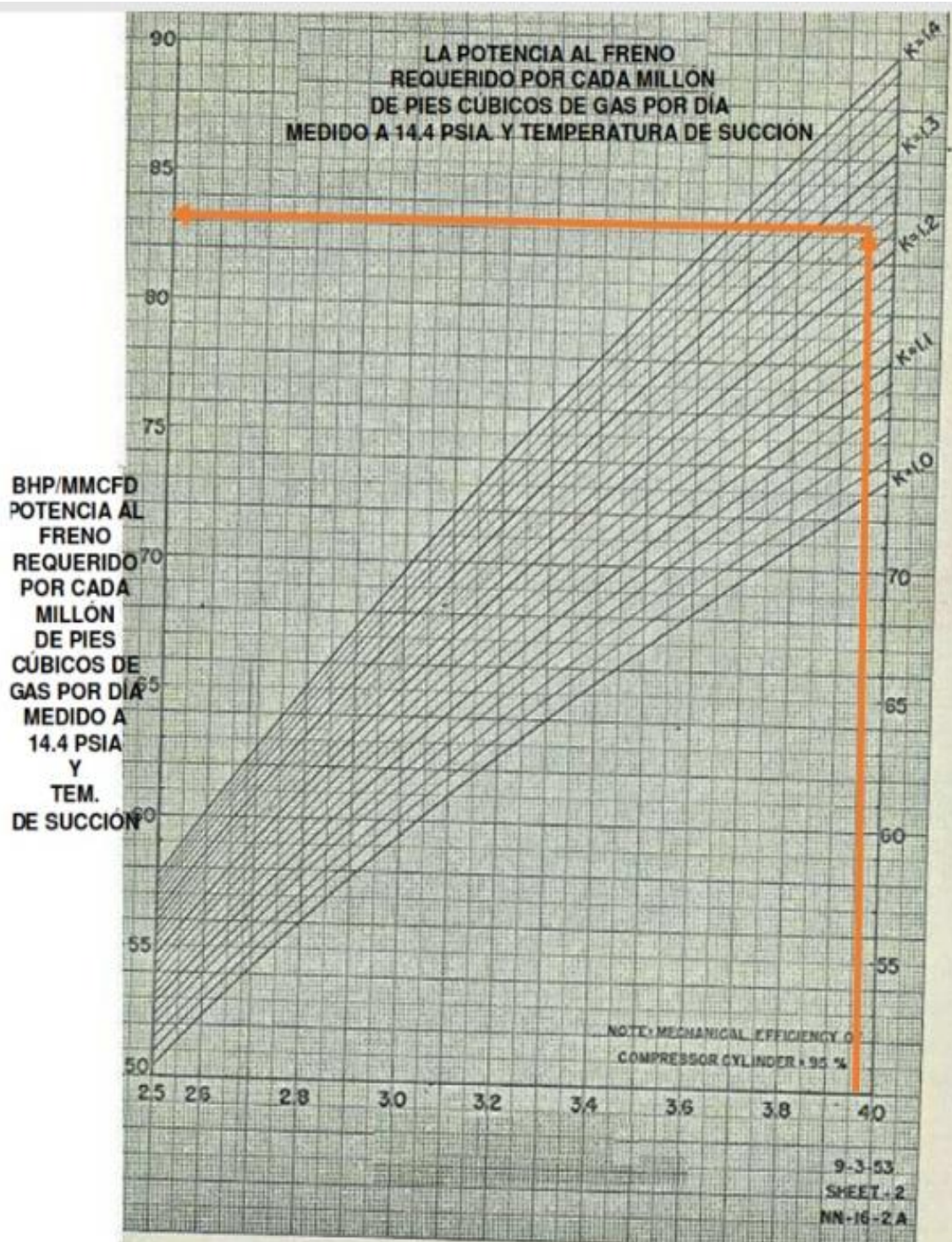
Planta de carbonato de litio vista en 3D



Fuente: (CMAC, 2023)

Anexo 4

Potencia de freno requerido por cada millón de pies cúbicos por día



(CourseHero, 2015)

