

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

**VICERRECTORADO**

**CENTRO DE ESTUDIOS DE  
POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**



**SELECCIÓN DE UN COMPRESOR RECIPROCANTE DE  
RESPALDO (BACKUP) PARA OPTIMIZAR LA OPERACIÓN  
Y PREVENIR PAROS NO PROGRAMADOS EN LA  
ESTACIÓN DE COMPRESIÓN DE NOVILLERO**

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

**YOSELIN MIREYA ARANCIBIA ESTRADA**

**Sucre - Bolivia  
2023**



## **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.

Yoselin Mireya Arancibia Estrada

Sucre, diciembre de 2023

## **DEDICATORIA**

Este Trabajo está dedicado a:

A Dios, por darme fortaleza y guía en todos los días de estudio y trabajo.

A mi madre, Apolonia Estrada Rivas por dar fuerzas y ánimos todos días.

A mi padre, Nilo Arancibia Tango por todo el apoyo y cariño brindado a diario.

A mis hermanos y seres queridos que siempre estuvieron para motivarme y apoyarme.

## **AGRADECIMIENTOS**

A: Dios por guiarme por un buen camino, darme fortaleza y perseverancia en todo el trayecto de la carrera universitaria.

A: los profesionales de YPFB Transporte S.A. por la paciencia y por haberme compartido los conocimientos y datos necesarios para la elaboración del presente trabajo.

A: mi familia por la motivación y apoyo incondicional.

A: todos mis seres queridos que siempre confiaron en mí.

## RESUMEN

El presente trabajo se centra en la Estación de Compresión de Gas de Novillero, la cual finalizó su instalación en agosto de 2022 y se encuentra en espera de iniciar operaciones una vez que la nueva fábrica de cemento en Potosí inicie su producción. A la fecha, la estación funciona esporádicamente para prevenir y detectar posibles fallas, pero se prevé que, después de 2 años desde su instalación, será necesario realizar un mantenimiento programado del compresor, lo que requerirá detener su funcionamiento. Para evitar interrupciones en el transporte de gas, se recomienda contar con una unidad de compresión adicional como respaldo.

El objetivo de la investigación es evaluar la necesidad de contar con una unidad de compresión adicional como respaldo en la Estación de Compresión de Gas de Novillero, considerando su futura operación continua y el mantenimiento programado del compresor principal.

La metodología utilizada consistió en el estudio de datos obtenidos de la estación para lograr realizar una selección óptima de la unidad, realizando cálculos y estudiando los compresores más usados a nivel nacional.

Los resultados obtenidos del trabajo de investigación indican la importancia de contar con una unidad de compresión adicional como respaldo, considerando la futura operación continua y el mantenimiento programado del compresor principal, con el fin de evitar interrupciones en el transporte de gas.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.3 JUSTIFICACIÓN .....	3
1.4 METODOLOGÍA.....	3
1.4.1 Recopilación de Datos Cuantitativos.....	3
1.4.2 Análisis Comparativo .....	3
1.4.3 Recopilación de Datos Cualitativos .....	4
1.4.4 Síntesis de Datos.....	4
1.5 OBJETIVOS .....	4
1.5.1 Objetivo General .....	4
1.5.2 Objetivos Específicos .....	4
<b>CAPÍTULO II: DESARROLLO</b> .....	<b>5</b>
2.1 MARCO TEÓRICO.....	5
2.1.1 Estación de Compresión de Gas Natural.....	5
2.1.1.1 Sistema de gas de proceso (succión y descarga) .....	6
2.1.1.2 Sistema de tuberías.....	7
2.1.1.3 Válvulas .....	7
2.1.1.4 Puente de regulación y medición .....	7
2.1.1.5 Interfaz hombre maquina .....	7
2.1.1.6 Pararrayo.....	7
2.1.1.7 Unidad de Compresión de Gas Natural .....	7
2.1.2 Procedimiento de selección de un Compresor Reciprocante.....	14
2.1.2.1 Cálculo de propiedades del Gas natural.....	14
2.1.2.2 Cálculo de Numero de Etapas .....	17
2.1.2.3 Cálculo de relación de compresión.....	18
2.1.2.4 Cálculo de potencia requerida.....	18
2.1.2.5 Calculo de la cantidad volumétrica real de gas en la entrada.....	19
2.1.2.6 Cálculo de eficiencia volumétrica .....	19
2.1.2.7 Cálculo de desplazamiento del pistón .....	21
2.1.2.8 Dimensionamiento de diámetro de cilindro.....	21
2.1.2.9 Cálculo de cargas permisible .....	22

2.1.3	Estación de compresión Bidireccional .....	22
2.1.4	Estaciones de Compresión de Gas Natural en Bolivia .....	22
2.1.5	Parámetros operativos .....	25
2.1.5.1	Presión de succión .....	25
2.1.5.2	Presión de descarga.....	26
2.1.5.3	Potencia requerida .....	26
2.1.5.4	Caudal Estándar .....	26
2.1.5.5	Temperatura.....	26
2.1.5.6	MAOP.....	26
2.1.5.7	MOP .....	27
2.1.6	Normas .....	27
2.1.6.1	Norma B 31.8.....	27
2.1.6.2	Norma B31.3.....	27
2.2	MARCO CONTEXTUAL.....	28
2.2.1	Ubicación de Estación de Compresión.....	28
2.2.2	Descripción de la Estación de Compresión .....	29
2.2.2.1	Sistema de Gas de Proceso (Succión y descarga) .....	30
2.2.2.2	Sistema de Tuberías .....	31
2.2.2.3	Válvulas .....	32
2.2.2.4	Puente de Regulación y Medición.....	32
2.2.2.5	Interfaz Hombre Maquina (HMI) .....	33
2.2.2.6	Pararrayo.....	33
2.2.2.7	Unidad de Compresión de Gas.....	34
2.2.2.8	Parámetros de Operación .....	36
2.2.3	Diagnostico .....	37
2.3	INFORMACION Y DATOS OBTENIDOS .....	38
2.3.1	Cálculos para la Selección del Compresor.....	38
2.3.1.1	Método de cálculo detallado de la potencia del compresor.....	38
2.3.1.2	Selección de Compresores Candidatos .....	43
2.3.1.3	Cálculo de la Cantidad Volumétrica Real de Gas en la Entrada .....	44
2.3.1.4	Cálculo de eficiencia volumétrica .....	44
2.3.1.5	Cálculo del desplazamiento del pistón .....	45
2.3.1.6	Dimensionamiento de diámetro del cilindro.....	46

2.3.1.7	Cálculo de cargas permisibles .....	46
2.3.2	Selección de motor.....	47
2.4	ANALISIS Y DISCUSION.....	48
2.4.1	Análisis.....	48
2.4.2	Discusión .....	50
2.5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	50
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	52
	ANEXOS .....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No 1: Estación de Compresión de Gas Natural.....	6
Figura No 2: Tipos de compresores.....	8
Figura No 3: Motor integral de un compresor .....	9
Figura No 4: Compresor Reciprocante .....	11
Figura No 5: Cilindro de baja presión con doble efecto.....	12
Figura No 6: Características de Motores .....	13
Figura No 7: Método grafico para determinar el factor de compresibilidad .....	16
Figura No 8: Capacidad Calorífica molar $MC_p$ , BTU/(lbmol $\cdot$ °R).....	17
Figura No 9: Función de relación de compresión $r_{1k}$ .....	20
Figura No 10: Macro-localización de la Estación de Novillero.....	28
Figura No 11: Micro-localización de la Estación Novillero.....	29
Figura No 12: Estación de Compresión Novillero.....	29
Figura No 13: Separador de Polvo y Líquidos .....	30
Figura No 14: Válvula de Bloqueo y By-Pass.....	30
Figura No 15: Manifold.....	31
Figura No 16: Válvula Shut Down .....	31
Figura No 17: Sistema de Tuberías .....	32
Figura No 18: Válvula bola.....	32
Figura No 19: Puente de Regulación y Medición .....	33
Figura No 20: HMI Estación de Compresión Novillero .....	33
Figura No 21: Torre Pararrayos.....	34
Figura No 22: Compresor Reciprocanten Ariel JGD2.....	35
Figura No 23: Compresor Waukesha tipo V .....	35
Figura No 24: Aeroenfriador .....	36

## INDICE DE TABLAS

Tabla No 1: Valores estimados de eficiencia de compresor .....	19
Tabla No 2: Estaciones de Compresión en Bolivia (Parte I) .....	23
Tabla No 3: Estaciones de Compresión en Bolivia (Parte II) .....	24
Tabla No 4: Gasoductos en Bolivia.....	24
Tabla No 5: Estaciones de Compresión en Bolivia (Parte III) .....	25
Tabla No 5: Especificaciones del Compresor .....	34
Tabla No 6: Especificaciones del Motor .....	36
Tabla No 7: Parámetros de Operación en Novillero .....	36
Tabla No 8: Cromatografía del gas en el GTC .....	37
Tabla No 9: Datos para la determinación del peso molecular del gas .....	39
Tabla No 10: Propiedades Pseudocríticas .....	39
Tabla No 11: Capacidad calorífica molar .....	40
Tabla No 12: Tabulación de resultados del factor de compresibilidad .....	41
Tabla No. 13: Iteración para Numero de Etapas.....	43
Tabla No 14: Modelos y Marcas de Compresores Candidatos .....	44
Tabla No 15: Interpolación para determinación $r(1k)$ .....	45
Tabla No 16: Datos de catalogo ARIEL JGE/2.....	46
Tabla No 17: Resultados de cargas de compresión y de tensión. ....	47
Tabla No 18: Características de compresor seleccionado.....	47

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES

A lo largo de la historia, la ingeniería ha buscado satisfacer las necesidades humanas, incluyendo la mejora de la eficiencia en el trabajo. Con el tiempo, ha habido avances significativos en la creación de equipos, instrumentos, herramientas y máquinas diseñadas para colaborar con los seres humanos en sus tareas. Es esencial destacar que tanto las máquinas como las personas desean trabajar de manera conjunta, ya que una máquina requiere de la supervisión y dirección del ser humano, mientras que este último busca reducir el esfuerzo y mejorar la eficiencia en sus trabajos.

En algunas situaciones, ciertas tareas exceden las capacidades humanas, como el transporte de grandes cantidades de sustancias peligrosas, ya sea en estado gaseoso o líquido. Para abordar este desafío, se emplean compresores y bombas, dispositivos de ingeniería diseñados para gestionar y controlar estas sustancias de manera segura, siempre y cuando se operen adecuadamente.

En Bolivia, el proyecto de la Estación de Compresión en Novillero inició el año 2021 con la reubicación, instalación y puesta en marcha de una unidad de compresión proveniente de la estación de compresión SICA SICA. En la actualidad, esta estación ha sido concluida y se encuentra a la espera de un inicio de operaciones continuas, que está programada para coincidir con el inicio de producción de la nueva fábrica de cemento en Potosí.

Salgado De La Guarda, E.M. (2019) en su investigación titulada ***"Ingeniería Básica para construcción de una Estación Compresora"*** describió un proyecto integrador profesional llevado a cabo en la empresa YPF SA con el objetivo de dimensionar una estación compresora para mantener en producción los pozos de gas que transitan un declive en su presión en una ubicación determinada. El informe presento un breve estudio de la curva de producción para determinar las condiciones y requisitos necesarios, así como un estudio detallado de los compresores, presentando los distintos tipos de compresores que ofrece el mercado, su funcionamiento y características principales. Se estableció los criterios necesarios para una correcta selección de compresores, siempre considerando los requisitos preestablecidos. La compresora más adecuada se basa en aquel que cumpla todos los parámetros de operación

y diseño. Se detallaron los criterios de diseño y la metodología de cálculo para el dimensionamiento de la Estación Compresora, y se implementó un programa computacional para dar soporte al dimensionamiento. Por último, se hizo un análisis de las instalaciones existentes, adecuaciones para la instalación de la Estación Compresora y nuevas instalaciones necesarias, considerando el escenario para instalaciones futuras previendo de antemano las posibles modificaciones del proyecto.

Ariaza Gomez, J. (2019) en su investigación titulada "**Guía para la Selección, Instalación y Mantenimiento de Compresores Reciprocantes de Gas**" tuvo como objetivo proporcionar herramientas básicas para desarrollar proyectos de selección, instalación y mantenimiento de compresores reciprocantes de gas. La metodología utilizada se basa en la recopilación de información de la industria, los fabricantes, la academia y las normas internacionales. Los resultados incluyen partes técnicas que describen los procesos físicos que se presentan en el gas cuando este es comprimido, así como una terminología altamente técnica de acuerdo a lo que se presenta habitualmente en el sector. También se presentó capítulos con información muy práctica y de fácil comprensión, que se ha extraído de manuales y otros documentos sencillos, que ayudarán al lector a comprender los principios básicos por los que se rigen los compresores reciprocantes. Las conclusiones destacan la importancia de la selección, instalación y mantenimiento adecuados de los compresores reciprocantes de gas para lograr una mayor eficiencia en términos de mano de obra calificada y tiempos de ejecución cortos en el transporte de gas natural a través de los gasoductos y estaciones compresoras de la red nacional.

## **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La Estación de Compresión en Novillero dará inicio de operaciones de manera continua, cuando la nueva fábrica de cemento en Potosí de luz verde para su producción. Actualmente, la Estación de Compresión de Novillero funciona principalmente como una estación de paso, con monitoreos ambientales realizados una vez al año hasta la fecha. La estación cuenta únicamente con una unidad de compresión, lo que representa uno de los principales desafíos. Cuando la estación tenga un funcionamiento continuo al pasar las 2500 hrs de trabajo debe cumplir con su respectivo mantenimiento, donde será necesario hacer pequeños paros en intervalos lo que ocasiona una desventaja para el transporte de gas.

En casos mayores si el compresor llegara a fallar y como no existe un compresor de reserva (stand by) podría ocasionar interrupciones en el proceso de compresión del gas natural, lo que,

a su vez, podría afectar la capacidad de transporte de gas natural de la estación. Además, la carencia de un compresor de reserva podría conllevar mayores costos operativos a largo plazo, ya que podría ser necesario adquirir o alquilar un compresor de emergencia en caso de un fallo en el compresor principal.

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

La Estación de Compresión de Gas en Novillero desempeña un papel crucial en el transporte eficiente de gas natural, y cualquier paro no programado en su operación puede tener consecuencias significativas en términos de costos y la disponibilidad del suministro. La selección de un compresor recíprocante de respaldo (backup) es un aspecto crítico para prevenir paros no programados y optimizar la operación.

Esta monografía busca abordar la necesidad imperante de garantizar la continuidad y eficiencia en la operación de la estación de compresión de Novillero a través de la selección cuidadosa de un compresor de respaldo. Esto no solo contribuirá a la confiabilidad de la operación, sino que también reducirá los riesgos asociados a las interrupciones no deseadas. Además, la investigación se apoyará en fuentes confiables y relevantes, como normativas y estudios de casos de la industria, para garantizar que el trabajo sea de alta calidad y aplicable en el campo de la compresión de gas natural.

### **1.4 METODOLOGÍA**

El tipo de metodología que se utilizará para realizar la presente monografía es una metodología mixta que combina elementos de investigación cuantitativa y cualitativa.

La metodología se divide en varias etapas:

#### **1.4.1 Recopilación de Datos Cuantitativos**

Para investigar los parámetros operativos del compresor principal, se recopilarán datos cuantitativos, como la capacidad de compresión, la eficiencia, el consumo de energía, la presión y la temperatura de operación. Estos datos pueden obtenerse a través de instrumentación y mediciones en la estación de Novillero y mediante la revisión de registros operativos.

#### **1.4.2 Análisis Comparativo**

Para el análisis comparativo de compresores de diferentes marcas, se utilizarán métodos estadísticos y técnicos para evaluar y comparar las características de los compresores, como su rendimiento, durabilidad, costo, eficiencia y disponibilidad. Esto implica el uso de

herramientas de análisis de datos y la revisión de especificaciones técnicas proporcionadas por los fabricantes.

#### **1.4.3 Recopilación de Datos Cualitativos**

Para crear el plano de ubicación del nuevo compresor y describir el funcionamiento de la estación con el compresor de reserva, se recopilarán datos cualitativos. Esto puede implicar entrevistas con ingenieros y personal de operación, inspecciones en campo y revisión de documentos y planos existentes.

#### **1.4.4 Síntesis de Datos**

Una vez recopilados los datos cuantitativos y cualitativos, se llevará a cabo una síntesis y análisis integral para seleccionar el compresor de reserva más adecuado, determinar la ubicación óptima en la estación y describir el funcionamiento de la estación con el compresor de reserva.

Esta metodología mixta permite abordar de manera integral la investigación, teniendo en cuenta tanto los aspectos cuantitativos como cualitativos involucrados en la selección y operación de la unidad de compresión de reserva en la Estación de Novillero.

### **1.5 OBJETIVOS**

#### **1.5.1 Objetivo General**

Seleccionar un compresor recíprocante de respaldo (backup) para la optimización operativa y evitar paros no programados en la estación de compresión de Novillero.

#### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Realizar una descripción del estado en el que se encuentra actualmente la estación de compresión.
- Determinar mediante criterios técnicos el compresor más óptimo.
- Analizar las características del motor más óptimo para el compresor.

## **CAPÍTULO II: DESARROLLO**

### **2.1 MARCO TEÓRICO**

#### **2.1.1 Estación de Compresión de Gas Natural**

Una estación de compresión de gas cumple un papel esencial al elevar la presión del fluido en el gasoducto, proporcionando la energía requerida para su transporte eficiente. En su operación, el flujo de gas inicia su recorrido por una serie de equipos que desempeñan roles específicos. En primer lugar, se encuentra el Cromatógrafo, que registra datos relacionados con la calidad del gas. Luego, el SlugCatcher permite la expansión del gas, facilitando la separación de condensados. Un Filtro de Succión o Separador elimina impurezas sólidas, mientras que un Medidor Ultrasónico de flujo recopila información crítica como presión, temperatura, volumen y caudal. El Higrómetro se encarga de medir las temperaturas de rocío.

El gas continúa su recorrido hacia los compresores, pasando por los "scrubbers" de Succión y Combustible, que eliminan aún más líquidos. Luego, entra a los cabezales de succión y, finalmente, al compresor. El gas, ahora a una presión superior, sale a través de la línea de descarga de los compresores y pasa por enfriadores o "Coolers" para reducir su temperatura. El filtro de descarga o Coalescente se encarga de separar los líquidos del gas, y el Medidor Ultrasónico de flujo registra los datos correspondientes a esta etapa. Además de estos procesos, una estación compresora está equipada con sistemas de potencia para el funcionamiento de los compresores, motores, sistemas de enfriamiento, válvulas y toda la instrumentación necesaria para controlar el proceso de compresión.

También incluye tanques de almacenamiento para lubricantes, refrigerantes y condensados, con el objetivo de preservar el entorno natural. Cabe destacar que cada estación de compresión de gas natural debe contar con un plan de manejo ambiental que se ajuste a las regulaciones legales nacionales en materia ambiental. En términos de diseño, las unidades de compresión (motor-compresor) y sus sistemas auxiliares, como enfriador, depurador, botellas de succión y descarga, válvulas, tuberías, sistemas de control y monitoreo, están diseñados para operar dentro de un rango de presión, en la succión que varía entre 550 psig y 850 psig, y en la descarga que oscila entre 1050 psig y 1200 psig.

**Figura No 1: Estación de Compresión de Gas Natural**



Fuente: (Kimray, 2023)

### **2.1.1.1 Sistema de gas de proceso (succión y descarga)**

#### **a) Separador de polvo y líquidos**

Diseñado para eliminar partículas sólidas y líquidos del gas antes de que este ingrese al compresor. Su función principal es asegurar que el gas esté limpio y libre de impurezas, lo que ayuda a proteger y prolongar la vida útil del compresor y otros equipos de la estación.

#### **b) Válvulas de bloqueo**

Son dispositivos que controlan o interrumpen el flujo de gas en una estación de compresión. Se utilizan para regular el paso del gas, cerrar o bloquear su flujo en situaciones de emergencia, mantenimiento o cuando se requiere detener la operación de manera rápida y segura.

#### **c) Manifold**

Es una estructura que conecta múltiples tuberías o líneas de gas en una estación de compresión. Su función principal es distribuir, mezclar o dirigir el flujo de gas desde diferentes fuentes o hacia distintos destinos, permitiendo la interconexión y regulación del sistema.

#### **d) Válvulas Shut Down**

Estas válvulas se utilizan para cerrar completamente el flujo de gas en situaciones de emergencia o en eventos no planificados. Son vitales para la seguridad y permiten aislar

secciones específicas del sistema de gas para evitar fugas, accidentes o cualquier otro problema que pueda surgir.

#### **2.1.1.2 Sistema de tuberías**

Es la red de conductos que transporta el gas natural desde su fuente hasta la estación de compresión y luego hacia su destino final. Está compuesto por tuberías de diferentes diámetros, materiales y especificaciones técnicas que garantizan el flujo seguro y eficiente del gas.

#### **2.1.1.3 Válvulas**

Son dispositivos de control instalados en el sistema de tuberías para regular el flujo de gas. Se utilizan para abrir, cerrar o modificar la dirección del flujo en diferentes secciones de la red. Las válvulas también pueden actuar como dispositivos de seguridad en situaciones de emergencia para detener o limitar el flujo de gas.

#### **2.1.1.4 Puente de regulación y medición**

Es una estructura que integra equipos de medición y regulación del flujo de gas. Incluye instrumentos de medición de presión, caudal y otras variables relevantes para monitorear y controlar el flujo de gas, asegurando que se mantengan las condiciones óptimas de operación.

#### **2.1.1.5 Interfaz hombre maquina**

Es el sistema que permite la interacción entre los operadores y el equipo de la estación de compresión. Puede consistir en paneles de control, pantallas táctiles o software especializado que facilita el monitoreo, control y ajuste de los parámetros operativos del sistema.

#### **2.1.1.6 Pararrayo**

Es un dispositivo de protección contra descargas eléctricas atmosféricas. Se instala para proteger la estación de compresión y sus equipos sensibles de daños causados por rayos y sobretensiones, desviando la corriente eléctrica hacia tierra de manera controlada y segura.

#### **2.1.1.7 Unidad de Compresión de Gas Natural**

Es el conjunto de equipos, como compresores y sistemas auxiliares, diseñados para aumentar la presión del gas natural y facilitar su transporte a largas distancias. Estas unidades comprimen el gas para mantener el flujo constante y eficiente a través de la red de tuberías.

Componentes de una unidad de compresión de gas natural:

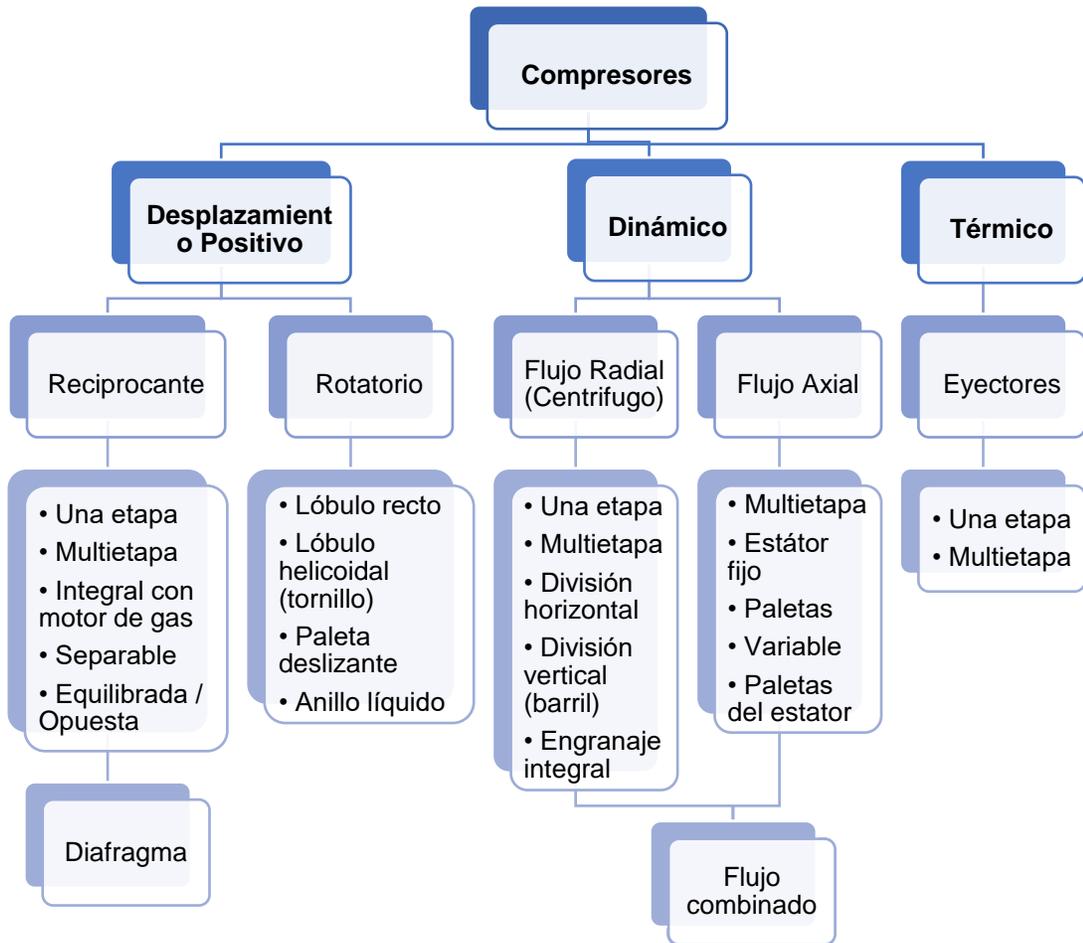
**a) Compresores**

Son el corazón de la unidad y se encargan de aumentar la presión del gas. Pueden ser compresores reciprocantes, centrífugos o axiales, dependiendo de la aplicación y la capacidad requerida.

**1) Tipos de Compresor**

Despndiendo de la aplicación los compresores pueden clasificarse en tres tipos: desplazamiento positivo, dinámico y térmico.

**Figura No 2: Tipos de compresores**



Fuente: (Gas Processors Suppliers Association, 2004)

## 2) Compresores reciprocantes

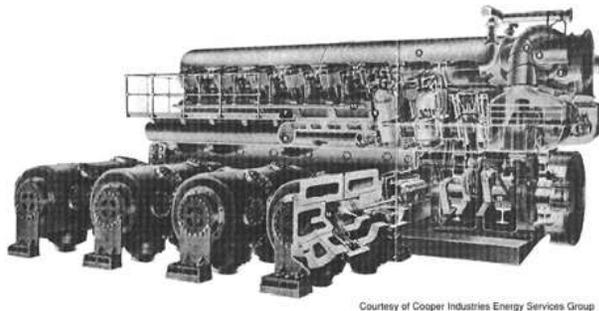
Los compresores reciprocantes son potentes, con capacidades que varían desde fracciones de CV hasta más de 40.000 CV por unidad. Trabaja en un rango de presiones desde el vacío hasta más de 30,000 psi en aplicaciones especiales. Pueden ser de una o múltiples etapas, determinadas por la relación de compresión total, limitada principalmente por la temperatura de descarga, normalmente hasta 4 etapas y, en casos de servicio intermitente, hasta 8. Algunos diseños no requieren lubricación, como en gases como nitrógeno, oxígeno y aire instrumental.

Los modelos de Múltiples etapas incorporan intercoolers, intercambiadores de calor que reducen la temperatura del gas, mejorando la eficiencia y manteniendo un funcionamiento seguro. Sin embargo, requiere gases limpios ya que no toleran líquidos ni partículas sólidas, que podrían dañar la lubricación y los cilindros.

Se rigen por estándares de la industria, como la API 618 para compresores de baja a moderada velocidad, accionados por motores eléctricos o de gas, y la API 11P para compresores separables de alta velocidad, usados combinados en plantas de gas y accionados por motores eléctricos. o de gas también. Estas normativas establecen pautas para su diseño, construcción y aplicaciones específicas. El accionamiento de un compresor puede ser separable o integral, un diseño integral se refiere a un compresor accionado por un motor de gas en el que la potencia cilindros de potencia del motor que hacen girar el cigüeñal están en el mismo alojamiento que los cilindros de compresión de gas.

Un diseño de tipo separable es aquel que requiere de un motor externo para su funcionamiento.

**Figura No 3: Motor integral de un compresor**



Courtesy of Cooper Industries Energy Services Group

Fuente: (Gas Processors Suppliers Association, 2004)

### ➤ **Componentes del Compresor Reciprocantes**

A continuación, se definen las principales partes que componen un equipo compresor recíprocante:

#### ✓ **Montura (Frame)**

Se trata de la estructura central que aloja las partes móviles del compresor (cigüeñal, pistones, crucetas) y sostiene los cilindros dispuestos en forma cruzada. Los fabricantes la diseñan según el número de cilindros, la potencia transferida, las cargas sobre las barras y la disposición de los cilindros, siendo específica para cada cantidad de cilindros.

#### ✓ **Cigüeñal (Cigüeñal)**

Este componente transmite la potencia del motor a las bielas de los pistones y se encuentra alojado dentro de la montura del compresor.

#### ✓ **Biela**

Es el mecanismo que convierte el movimiento circular del cigüeñal en un movimiento lineal de la barra del pistón, transmitiendo la fuerza.

#### ✓ **Caja de Lubricación**

Se encuentra entre el cilindro y la montura y actúa como un separador. Cualquier fuga se drena a través de este componente. Contiene la barra que impulsa el pistón y los sellos de laberinto del cilindro.

#### ✓ **Cojinetes**

Mayormente son del tipo hidrodinámicos en la mayoría de los compresores. Permiten la entrada de aceite a través de agujeros de suministro, formando una película entre las superficies en contacto de las partes móviles y estacionarias.

#### ✓ **Sellos**

Son esenciales para garantizar el sellado dinámico entre el pistón y la barra, y entre la barra y la montura. Están compuestos por anillos de teflón montados en una caja atornillada al cilindro, permitiendo el movimiento de la barra de forma recíprocante.

✓ **Barra**

Une el pistón con la biela y transmite el movimiento al pistón. Este componente soporta esfuerzos considerables debido a las operaciones de tracción y compresión del equipo.

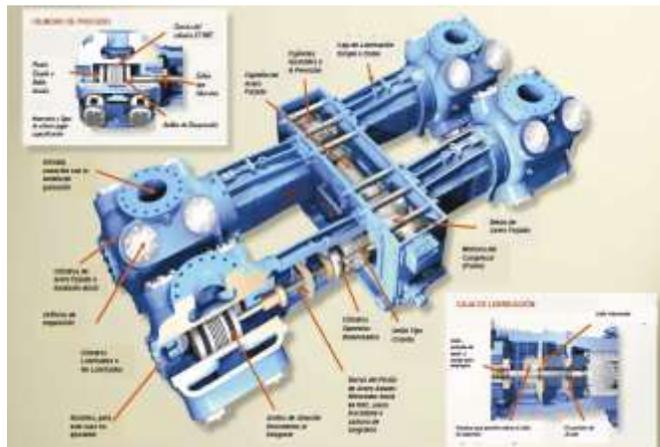
✓ **Botellas de Pulsación**

Recipientes a presión colocados en la succión y descarga para reducir la vibración acústica generada por el flujo irregular del compresor.

✓ **Válvulas**

Permiten la entrada y salida de gas en el cilindro. En compresores de doble acción, existen válvulas de succión en ambos lados, mientras que en los de simple acción, se encuentran en un solo lado. Las válvulas más comunes en compresores recíprocos son las de tipo placa, lengüeta y discos concéntricos.

**Figura No 4: Compresor Recíproco**



Fuente: (Baralt, 2007)

➤ **Equipos de proceso en el compresor recíproco**

✓ **Separadores (Scrubbers)**

Su función principal es separar el agua en forma de vapor de la corriente de gas de entrada al equipo de compresión. Están diseñados para manejar corrientes con alta relación gas-líquido y generalmente incluyen elementos atrapaniebla (desisters) para esta separación.

### ✓ Cilindros (Proceso de Compresión)

Estos elementos, junto con los pistones, reducen el volumen del gas en la cámara hasta alcanzar el volumen necesario para la presión de descarga requerida. Cada etapa del compresor tiene al menos un cilindro.

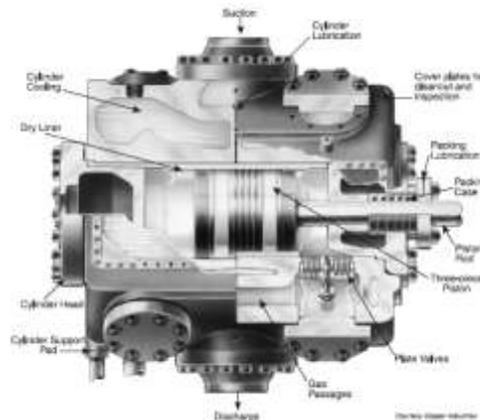
Existen dos tipos:

Acción simple: La ocurre compresión en uno de los lados del pistón durante una vuelta del cigüeñal.

Doble Acción: La compresión sucede en un lado mientras que en el otro se da la expansión durante una vuelta del cigüeñal.

Para gases como Helio u Oxígeno, que no pueden contaminarse con aceite, se usan cilindros no lubricados con anillos de grafito o teflón y superficies pulidas para minimizar la fricción.

**Figura No 5: Cilindro de baja presión con doble efecto**



Fuente: (Gas Processors Suppliers Association, 2004)

### ✓ Enfriadores

Dispositivos que reducen la temperatura del gas después de cada etapa de compresión. Esto es crucial para mantener la temperatura de trabajo dentro de límites seguros para los materiales y los sistemas de lubricación del compresor. Se suelen emplear enfriadores por aire, instalados en una unidad de enfriamiento con un ventilador acoplado directamente al motor del compresor.

✓ **Ensamblaje en "Skid"**

Estos componentes se ensamblan junto al compresor y el motor sobre un "skid" o bastidor común. Esta disposición permite crear una unidad compresora completa y transportable, facilitando su manejo y operación.

**b) Motor o Fuente de Energía**

Proporciona la potencia necesaria para operar los compresores. Puede ser un motor eléctrico, motor de combustión interna (como motores de gas natural) o turbinas.

**Figura No 6: Características de Motores**

Note: Figures may be approximate due to variations in engine services and are representative of new engines only. Refer to manufacturer for exact information.												
ENGINE	Full Power at Full Speed (bhp)	Full Speed (rpm)	Strokes Per Cycle	BMEP (psi)	Fuel Reqmt (Btu/(bhp-hr)) LHV	Jacket Water Cooler	Heat Rejection Btu / (bhp · hr)		Turbo Intercooler/ Aftercooler	Atmosphere i.e. Surface Heat Loss	Exhaust rate (lb/(bhp-hr))	Exhaust temp (F)
							Cylinder Cooling	Oil Cooler				
<b>Waukesha</b>												
F18GL	400	1800	4	160	7524	1980	325	485	211	9.36	674	
H24GL	530	1800	4	160	7800	2147	323	547	188	10.26	851	
L36GL	800	1800	4	160	7129	1839	238	421	144	9.14	838	
P48GL	1065	1800	4	160	7106	1892	233	422	134	9.12	836	
F2895GL	607	1200	4	138	7282	1960	329	395	264	10.81	700	
F3521GL	738	1200	4	138	7377	2003	306	373	253	10.90	703	
F3524GSI	840	1200	4	158	7825	2435	337	149	410	6.84	1135	
L5108GL	1072	1200	4	138	7295	1926	354	368	275	10.78	680	
L5790GL	1215	1200	4	138	7284	1967	329	398	239	10.03	679	
L5794GSI	1380	1200	4	158	7650	2275	355	110	473	6.41	1135	
L7042GL	1478	1200	4	138	7274	1905	291	367	222	10.75	709	
L7044GSI	1680	1200	4	158	7876	2318	337	107	432	6.73	1181	
P9390GL	1863	1200	4	138	7221	1750	316	367	182	10.19	763	
8L1AT27GL	2090	1000	4	190	6556	1187	280	510	125	11.98	677	
12VAT27GL	3130	1000	4	190	6568	1238	239	569	90	11.04	703	
16VAT27GL	4500	1000	4	205	6583	719	290	539	204	12.21	776	
<b>Wartsila</b>												
12V34SG-CD (1)	5.552	750	4	252	5.780	725 (2)	295	233 (3)	94	9.82	779	

Fuente: (Gas Processors Suppliers Association, 2004)

**c) Enfriadores**

Reducen la temperatura del gas comprimido después de cada etapa de compresión. Esto ayuda a evitar el sobrecalentamiento y asegura un funcionamiento más eficiente.

**d) Filtros y Separadores**

Eliminan partículas sólidas, líquidos y otros contaminantes del gas antes de ingresar al compresor. Ayudan a proteger los componentes del compresor y a mantener su funcionamiento eficiente.

**e) Válvulas de Control**

Regulan y controlan el flujo de gas, asegurando que el proceso de compresión se realice de manera segura y eficiente. Pueden ser de varios tipos, como válvulas de succión, descarga y de alivio de presión.

**f) Instrumentación y Sistemas de Monitoreo**

Incluyen medidores de presión, temperatura, caudal, entre otros, que supervisan y controlan las condiciones operativas. Esto permite ajustar y optimizar el funcionamiento de la unidad de compresión.

**g) Sistema de Lubricación**

Suministra lubricantes a los componentes móviles del compresor para reducir la fricción y el desgaste, garantizando su funcionamiento suave y prolongando su vida útil.

**2.1.2 Procedimiento de selección de un Compresor Reciprocante**

**2.1.2.1 Cálculo de propiedades del Gas natural**

El gas natural es un combustible fósil que se encuentra en yacimientos subterráneos y se compone principalmente de metano, aunque también puede contener otros hidrocarburos como etano, propano y butano. Es una fuente de energía limpia y eficiente que se utiliza para la generación de electricidad, calefacción, cocina y como combustible para vehículos. El gas natural es una de las principales fuentes de energía en todo el mundo y su uso se ha expandido en las últimas décadas debido a su bajo costo y su menor impacto ambiental en comparación con otros combustibles fósiles.

Dentro de las principales características y propiedades del gas podemos señalar:

**a) Composición**

Es la proporción variable en porcentaje de los compuestos hidrocarburíferos, estos pueden ser metano principalmente, nitrógeno, etano, propano, butano, dióxido de carbono, nitrógeno. El valor de los datos puede ser proporcionado en fracciones molar o masico.

$$\text{Componente} = y_i$$

**b) Peso molecular**

Es la masa promedio de las moléculas en una muestra de gas, expresada en unidades de masa atómica o en gramos por mol. Se calcula sumando las masas atómicas de todos los átomos en una molécula

$$PM_{gas} = \sum PM_i * y_i \quad (1)$$

**c) Gravedad específica**

Es la relación entre la densidad del gas y la densidad del aire (a una presión y temperatura específicas). Indica si un gas tiende a elevarse (gravedad específica < 1) o a hundirse (gravedad específica > 1) en comparación con el aire.

$$SG_g = \frac{PM_i}{PM_{aire}} \quad (2)$$

**d) Presión y Temperatura Pseudocrítica**

Son condiciones hipotéticas de presión y temperatura en las cuales un gas se comporta de manera similar a un estado líquido, es decir, cerca de su punto crítico. Estos valores son útiles para análisis y cálculos termodinámicos.

$$P_{pc} = \sum P_{pci} * y_i \quad (3)$$

$$T_{pc} = \sum T_{pci} * y_i \quad (4)$$

**e) Presión y Temperatura Pseudoreducidas**

Estos valores normalizados permiten comparar y correlacionar propiedades de distintos gases independientemente de sus propiedades específicas.

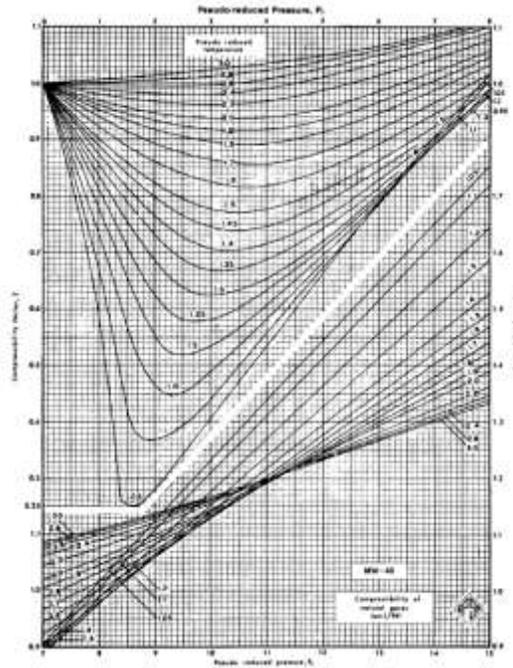
$$P_{sr} = \frac{P}{P_{pc}} \quad (5)$$

$$T_{sr} = \frac{T}{T_{pc}} \quad (6)$$

**f) Factor de compresibilidad (Z)**

Es una medida de la desviación del comportamiento ideal de un gas respecto a las leyes de los gases ideales. Se representa como la relación entre la presión real y la presión ideal a una temperatura y volumen dados. Para determinar este valor existen una variedad de métodos, el más sencillo es el método gráfico.

**Figura No 7: Método grafico para determinar el factor de compresibilidad**



Fuente: (Gas Processors Suppliers Association, 2004)

**g) Capacidad Calorífica**

Es la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa de gas en una unidad de temperatura. Puede ser a presión constante (capacidad calorífica a presión constante,  $C_p$ ) o a volumen constante (capacidad calorífica a volumen constante,  $C_v$ ).

**Figura No 8: Capacidad Calorífica molar  $MC_p$ , BTU/(lbmol·°R)**

\*Data source: Selected Values of Properties of Hydrocarbons, API Research Project 44, MW updated to agree with Fig. 23-2

Gas	Chemical formula	Mol wt	Temperature							
			0°F	50°F	60°F	100°F	150°F	200°F	250°F	300°F
Methane	CH <sub>4</sub>	16.043	8.23	8.42	8.46	8.65	8.95	9.28	9.64	10.01
Ethyne (Acetylene)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.038	9.68	10.22	10.33	10.71	11.15	11.55	11.90	12.22
Ethene (Ethylene)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.054	9.33	10.02	10.16	10.72	11.41	12.09	12.76	13.41
Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.070	11.44	12.17	12.32	12.95	13.78	14.63	15.49	16.34
Propene (Propylene)	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.081	13.63	14.69	14.90	15.75	16.80	17.85	18.88	19.89
Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.097	15.65	16.88	17.13	18.17	19.52	20.89	22.25	23.56
1-Butene (Butylene)	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	17.96	19.59	19.91	21.18	22.74	24.26	25.73	27.16
cis-2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	16.54	18.04	18.34	19.54	21.04	22.53	24.01	25.47
trans-2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.108	18.84	20.23	20.50	21.61	23.00	24.37	25.73	27.07
iso-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	20.40	22.15	22.51	23.95	25.77	27.59	29.39	31.11
n-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.123	20.80	22.38	22.72	24.08	25.81	27.55	29.23	30.90
iso-Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	24.94	27.17	27.61	29.42	31.66	33.87	36.03	38.14
n-Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.150	25.84	27.61	28.02	29.71	31.86	33.99	36.08	38.13
Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.114	16.41	18.41	18.78	20.46	22.45	24.46	26.34	28.15
n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.177	30.17	32.78	33.30	35.37	37.93	40.45	42.94	45.36
n-Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.204	34.96	38.00	38.61	41.01	44.00	46.94	49.81	52.61
Ammonia	NH <sub>3</sub>	17.0305	8.52	8.52	8.52	8.52	8.52	8.53	8.53	8.53
Air		28.9625	6.94	6.95	6.95	6.96	6.97	6.99	7.01	7.03
Water	H <sub>2</sub> O	18.0153	7.98	8.00	8.01	8.03	8.07	8.12	8.17	8.23
Oxygen	O <sub>2</sub>	31.9988	6.97	6.99	7.00	7.03	7.07	7.12	7.17	7.23
Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.0134	6.95	6.95	6.95	6.96	6.96	6.97	6.98	7.00
Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.0159	6.78	6.86	6.87	6.91	6.94	6.95	6.97	6.98
Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	34.08	8.00	8.09	8.11	8.18	8.27	8.36	8.46	8.55
Carbon monoxide	CO	28.010	6.95	6.96	6.96	6.96	6.97	6.99	7.01	7.03
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	44.010	8.28	8.70	8.76	9.00	9.29	9.56	9.81	10.05

\* Exceptions: Air - Keenan and Keyes, Thermodynamic Properties of Air, Wiley, 3rd Printing 1947. Ammonia - Edw. R. Grubb, Thermodynamic Properties of Ammonia at High Temperatures and Pressures, Petr. Processing, April 1950. Hydrogen Sulfide - J. R. West, Chem. Eng. Progress, 44, 257, 1948.

Fuente: (Gas Processors Suppliers Association, 2004)

- Capacidad calorífica molar

$$MC_p = \sum MC_{pi} * y_i \quad (7)$$

- Capacidad calorífica volumétrica

$$MC_v = MC_p - 1.986 \quad (8)$$

- Relación de capacidades caloríficas

$$k = \frac{MC_p}{MC_v} \quad (9)$$

### 2.1.2.2 Cálculo de Numero de Etapas

El proceso de compresión genera incremento de la temperatura del fluido; debido a esto, la presión máxima que puede alcanzarse en una etapa compresión está limitada por la temperatura de descarga máxima permisible; esta temperatura

debe mantenerse en un rango entre 275 – 300 °F. Por lo tanto, el número de etapas de compresión debe ser la cantidad de etapas que garanticen temperaturas de descarga en el rango indicado, en cada una de las etapas de compresión del compresor. Una primera aproximación puede hacerse con la ecuación 10 variando el número de etapas hasta obtener una relación de presión R entre 2,5 y 4.

$$R = \left(\frac{P_d}{P_s}\right)^{1/n} \quad (9)$$

Donde:

R = Relación de compresión  
 Pd = Presión de descarga  
 Ps = Presión de succión  
 n = Numero de Etapas

### 2.1.2.3 Cálculo de relación de compresión

La relación de compresión en la selección de un compresor se refiere a la relación entre la presión de descarga del compresor y la presión de entrada del gas que está siendo comprimido. Es una medida crucial que determina la eficiencia y la capacidad del compresor para aumentar la presión del gas.

$$r = \frac{P_d}{P_s} \quad (10)$$

Donde:

r = Relación de compresión  
 Pd = Presión de descarga, psi  
 Ps = Presión de succión, psi

### 2.1.2.4 Cálculo de potencia requerida

La potencia de compresión, se define como la cantidad de energía teórica necesaria para comprimir un gas a unas condiciones específicas de succión y descarga.

Existen varios métodos para el cálculo de esta variable uno de ellos es el método de cálculo a detalle de la potencia.

$$BHP = 3.033 * Z_{prom} * \left(\frac{Q * T_s}{E}\right) * \left(\frac{K}{K-1}\right) * \left(\frac{P_L}{T_L}\right) * \left[\left(\frac{P_d}{P_s}\right)^{\left(\frac{K-1}{K}\right)} - 1\right] \quad (11)$$

Donde:

BHP = Potencia requerido HP  
 Zprom = factor de compresibilidad promedio  
 Q = Caudal requerido MMPCD  
 Ts = Temperatura de succión °R

E = Eficiencia  
 K = Relación de capacidades caloríficas  
 P<sub>L</sub> = Presión estándar, psi  
 T<sub>L</sub> = temperatura estándar, °R  
 P<sub>d</sub> = Presión de descarga, psi  
 P<sub>s</sub> = Presión de succión. Psi

**Tabla No 1: Valores estimados de eficiencia de compresor**

TIPO DE COMPRESOR	EFICIENCIA (E)
Centrifugo	0.65 – 0.75
Reciprocante Alta Velocidad	0.65 – 0.75
Reciprocante Baja Velocidad	0.75 – 0.85

Fuente: (CAMPBELL, 2010)

#### 2.1.2.5 Cálculo de la cantidad volumétrica real de gas en la entrada

Para los cálculos de rendimiento, la capacidad del compresor se expresa como la cantidad volumétrica real de gas a la entrada de cada etapa de compresión por minuto.

$$Q_{actual} = Q * \left(\frac{14.7}{520}\right) * \left(\frac{T_1 * Z_1}{P_1 * Z_L}\right) \quad (12)$$

Donde:

Q = Caudal requerido MPCD  
 T<sub>1</sub> = Temperatura de entrada, °R  
 P<sub>1</sub> = Presión de entrada, psi  
 Z<sub>1</sub> = Factor de compresibilidad de entrada  
 Z<sub>L</sub> = factor de compresibilidad estándar

#### 2.1.2.6 Cálculo de eficiencia volumétrica

se refiere a la capacidad real de bombeo de un cilindro en comparación con la cilindrada del pistón. Sin un volumen libre para que el gas se expanda y retrasar la apertura de la(s) válvula(s) de aspiración, el cilindro podría suministrar todo el desplazamiento del pistón como capacidad de gas.

Un método para tener en cuenta las pérdidas de las válvulas de succión y descarga es reducir el rendimiento volumétrico en una cantidad arbitraria, normalmente un 4%.

➤ **Clearance**

El pistón de un compresor recíprocante no viaja hasta el final del cilindro; ya que cierto espacio se necesita para las válvulas entre del cilindro, cuando el pistón se encuentra al final de su carrera; este espacio, se denomina volumen muerto (clearance) y se expresa como un porcentaje entre el volumen muerto total y el volumen total barrido por el pistón, puede asumirse en 20% para un cálculo previo y luego ajustarse con el valor real indicado por el fabricante del cilindro.

$$V.E. = 96 - r - C * \left[ \frac{Z_s}{Z_d} * r^{1/k} - 1 \right] \quad (13)$$

Donde:

V.E. = Eficiencia volumétrica

r = Relación de compresión

Z<sub>s</sub> = factor de compresibilidad de succión

Z<sub>d</sub> = factor de compresibilidad de descarga

r<sup>1/k</sup> = función de relación de compresión (Figura No 9)

**Figura No 9: Función de relación de compresión r<sup>1/k</sup>**

Compression Ratio	k, isentropic exponent Cp/Cv								
	1.10	1.14	1.18	1.22	1.26	1.30	1.34	1.38	1.42
1.2	1.180	1.173	1.167	1.161	1.156	1.151	1.146	1.141	1.137
1.4	1.358	1.343	1.330	1.318	1.306	1.295	1.285	1.276	1.267
1.6	1.533	1.510	1.489	1.470	1.452	1.436	1.420	1.406	1.392
1.8	1.706	1.675	1.646	1.619	1.594	1.572	1.551	1.531	1.513
2.0	1.878	1.837	1.799	1.765	1.733	1.704	1.677	1.652	1.629
2.2	2.048	1.997	1.951	1.908	1.870	1.834	1.801	1.771	1.742
2.4	2.216	2.155	2.100	2.050	2.003	1.961	1.922	1.886	1.852
2.6	2.384	2.312	2.247	2.188	2.135	2.086	2.040	1.999	1.960
2.8	2.550	2.467	2.393	2.326	2.264	2.208	2.156	2.109	2.065
3.0	2.715	2.621	2.537	2.461	2.391	2.328	2.270	2.217	2.168
3.2	2.879	2.774	2.680	2.595	2.517	2.447	2.382	2.323	2.269
3.4	3.042	2.926	2.821	2.727	2.641	2.563	2.492	2.427	2.367
3.6	3.204	3.076	2.961	2.857	2.764	2.679	2.601	2.530	2.465
3.8	3.366	3.225	3.100	2.987	2.885	2.792	2.708	2.631	2.560
4.0	3.526	3.374	3.238	3.115	3.005	2.905	2.814	2.731	2.655
4.2	3.686	3.521	3.374	3.242	3.124	3.016	2.918	2.829	2.747
4.4	3.846	3.668	3.510	3.368	3.241	3.126	3.021	2.926	2.839
4.6	4.004	3.814	3.645	3.493	3.357	3.235	3.123	3.022	2.929
4.8	4.162	3.959	3.779	3.617	3.473	3.342	3.224	3.116	3.018
5.0	4.319	4.103	3.912	3.740	3.587	3.449	3.324	3.210	3.106
5.2	4.476	4.247	4.044	3.863	3.700	3.554	3.422	3.303	3.193
5.4	4.632	4.390	4.175	3.984	3.813	3.659	3.520	3.394	3.279
5.6	4.788	4.532	4.306	4.105	3.925	3.763	3.617	3.485	3.364
5.8	4.943	4.674	4.436	4.224	4.035	3.866	3.713	3.574	3.448
6.0	5.098	4.815	4.565	4.343	4.146	3.968	3.808	3.663	3.532
6.2	5.252	4.955	4.694	4.462	4.255	4.069	3.902	3.751	3.614
6.4	5.406	5.095	4.822	4.579	4.363	4.170	3.996	3.839	3.696
6.6	5.560	5.235	4.949	4.696	4.471	4.270	4.089	3.925	3.777
6.8	5.713	5.374	5.076	4.813	4.578	4.369	4.181	4.011	3.857

Fuente: (Gas Processors Suppliers Association, 2004)

También la eficiencia volumétrica puede estudiarse con la siguiente ecuación:

$$V.E. = \frac{Q_{actual}}{PD} \quad (14)$$

Donde:

$Q_{actual}$  = Caudal a la entrada

PD = desplazamiento del pistón

### 2.1.2.7 Cálculo de desplazamiento del pistón

El desplazamiento del pistón se refiere al volumen total que es desplazado por el movimiento del pistón en una sola carrera, desde su posición más alejada hasta su posición más cercana al extremo del cilindro.

Para un pistón de doble efecto (que no sea del tipo de biela de cola), la ecuación es la siguiente:

$$PD = \frac{stroke * N * (2 * D^2 - d^2) * \pi}{4 * 1728} \quad (15)$$

Donde:

PD = desplazamiento del pistón

Stroke= longitud de carrera, in

N = velocidad, rpm

D = Diámetro del cilindro, in

d = Diámetro del vástago, in

### 2.1.2.8 Dimensionamiento de diámetro de cilindro

Las ecuaciones que se indican a continuación, permiten calcular el diámetro del cilindro, para luego seleccionar los disponibles en manuales de fabricantes de compresores. Despejando ecuación (15):

$$D = \sqrt{\frac{\left[ \frac{PD * 4 * 1728}{stroke * N * \pi} \right] + d^2}{2}} \quad (16)$$

### 2.1.2.9 Cálculo de cargas permisible

Los fabricantes de compresores reciprocantes, especifican sus monturas en función de la potencia promedio, velocidad de giro y cargas admisibles; estas cargas, corresponden a las fuerzas a compresión y tensión aplicadas y son proporcionales a la fuerza estática y a las cargas de inercia sobre los componentes del compresor, tales como: cigüeñal, barras de conexión, barra del pistón y el área proyectada de los cojinetes del cilindro; en ninguna circunstancia, las cargas aplicadas pueden exceder las admisibles.

- Cargas de compresión

$$L_c = A_p * P_d - A_c * P_s \quad (17)$$

- Cargas de tensión

$$L_T = A_c * P_d - A_p * P_s \quad (18)$$

Donde:

$L_c$  = cargas de compresion  
 $L_T$  = Cargas de tensión  
 $A_p$  = Área del cilindro  
 $A_c$  = Área efectiva (Área del cilindro-Área del vástago)  
Stroke= longitud de carrera, in  
 $P_d$  = Presión de descarga, psi  
 $P_s$  = Presión de succión. Psi

### 2.1.3 Estación de compresión Bidireccional

es una instalación diseñada para comprimir y descomprimir gases en dos direcciones opuestas dentro de un sistema de transporte de gas. Esta estación es capaz de recibir gas a alta presión, comprimirlo para su transporte a largas distancias, y también de recibir gas a baja presión proveniente de la red y descomprimirlo para su distribución o almacenamiento local. Este tipo de estación es crucial en redes de gas para mantener un flujo bidireccional eficiente y óptimo, asegurando la capacidad de manejar tanto el gas de entrada como el de salida de manera efectiva y segura.

### 2.1.4 Estaciones de Compresión de Gas Natural en Bolivia

En toda la extensión de los gasoductos que recorre en Bolivia existen más de 20 estaciones de compresión de gas natural destinadas tanto al mercado interno como al externo, las empresas en cargadas son YPFB Transporte S.A., YPFB Andina S.A. y Gas Transboliviano.

Donde en estas estaciones pueden existir compresores o turbocompresores como en el caso del gasoducto de Gas Transboliviano, en cada estación las unidades de compresión que existen son mayores 1.

**Tabla No 2: Estaciones de Compresión en Bolivia (Parte I)**

No	Nombre de Estación	Gasoducto	Nº de Unid.	Compresor/ Turbo compresor	Cap. (MMPCD)	Pot. (HP)	Marcas de Compresor y Motor	Emp.
1	Estación de Compresión Samaipata	GAA	4	Compresores	75	5 520	Waukesha- Ariel L5794GSI W/ESM	YPFB Transporte S.A.
2	Estación de Compresión Oconi	GAA	4	Compresores	75	4 860	•Caterpillar - ARIEL G3516 - JGD2 •Waukesha - L5794GSI W/ESM Dresser Rand 6VIP •Waukesha - Ariel L5794GSI ESM-JGE4	
3	Estación de Compresión Chillijchi	GAA	4	Compresores	75	5 520	Waukesha- Ariel L5794GSI c/ESM/JGE/4	
4	Estación de Compresión Huayñacota	GAA	5	Compresores	89.1	6 900	Waukesha- Ariel L5794GSI c/ESM/JGD/2	
5	Estación de Compresión Totoroco	GAA	4	Compresores	75	5 520	Waukesha- Ariel L5794GSI W/ESM	
6	Estación de Compresión Sica Sica	GAA	4	Compresores	71.5	5 520	•Waukesha - Dresser Rand L5794GSI c/ESM 6DVIP/2 •Waukesha - Ariel L5794GSI c/ESM/JGE/4	
7	Estación de Compresión Carrasco	GCC /GCY	4	Compresores	75	5 520	Waukesha- Ariel L5794GSI c/ESM/JGD/2	

Fuente: (Elaboración propia, 2023)

**Tabla No 3: Estaciones de Compresión en Bolivia (Parte II)**

No	Nombre de Estación	Gasoducto	Nº de Unid.	Compresor/ Turbo compresor	Cap. (MMPC D)	Pot. (HP)	Marcas de Compresor y Motor	Emp.
8	Estación de Compresión Cerrillos	GTC	4	Compresores	21	1 717	Caterpillar G3412C LE AJAX DPC-360	YPFB Transporte S.A.
9	Estación de Compresión Torrepampa	GTC	3	Compresores	21	1 800	AJAX DPC-600	
10	Estación de Compresión Tapirani	GTC	3	Compresores	10	1 245	CAT-Worthington G 379	
11	Estación de Compresión Novillero	GTC	1	Compresores	16	1 380	Waukesha- Ariel L5794GSI JGD/2	
12	Estación de Compresión Qhora Qhora	GTS	2	Compresores	6.8	1 460	•Ingersoll Rand 12SVGA-2 •AJAX DPC-800	
13	Estación de Compresión San Lorenzo	DGTP	2	compresores	5.7	720	AJAX DPC-360	
14	Estación de Compresión Caigua	GSCY	3	Turbo compresores	420	15 500	•Solar Centauro 40 •Solar Centauro 50	
15	Estación de Compresión Taquiperenda	GSCY / GTC	3	Turbo compresores	422	18 300	Solar Centauro 50 S	

Fuente: (Elaboración propia, 2023)

**Tabla No 4: Gasoductos en Bolivia**

<b>GAA</b>	Gasoducto al altiplano
<b>GCC</b>	Gasoducto Carrasco-Cochabamba
<b>GCY</b>	Gasoducto Carrasco-Yapacani
<b>GTC</b>	Gasoducto Taquiperenda-Cochabamba
<b>GTS</b>	Gasoducto Tarabuco-Sucre
<b>GSP</b>	Gasoducto Sucre-Potosí
<b>DGTP</b>	Gasoducto Derivada Tarija-ElPuente
<b>GSCY</b>	Gasoducto Santa Cruz- Yacuiba
<b>GTB</b>	Gasoducto TransBolibiano
<b>GYRG</b>	Gasoducto Yacuiba- Rio Grande

Fuente: (Elaboración propia, 2023)

**Tabla No 5: Estaciones de Compresión en Bolivia (Parte III)**

No	Nombre de Estación	Gasoducto	Nº de Unid.	Compresor/ Turbocompresor	Cap. (MMPCD)	Pot. (HP)	Marcas de Compresor y Motor	Emp.
16	Estación de Compresión Sairupú	GSCY	3	Turbocompresores	420	16 900	•Solar Centauro 40 •Solar Centauro 50 S	YFPB Transporte S.A.
17	Estación de Compresión Campo Grande	GSCY	3	Turbocompresores	989	47 700	Solar Mars 100	
18	Planta de Compresión Rio Grande	GYRG	8	Turbocompresores	200	-	•Solar Turbines •Man Diesel & Turbo	YFPB Andina S.A.
19	Estación de Compresión Izozog	GTB	2	Turbocompresores	-	19 500	Solar Titan 130s - Compresor Mitsubishi 5V-2	Gas Transboliviano S.A.
20	Estación de Compresión Chiquitos	GTB	2	Turbocompresores	-	19 500	Solar Titan 130s - Compresor Solar C652	
21	Estación de Compresión Robore	GTB	2	Turbocompresores	-	19 500	Solar Titan 130s - Compresor Mitsubishi 5V-2	
22	Estación de Compresión Yacuses	GTB	5	Turbocompresores	-	32 700	•Solar Taurus 60 - Compresor Mitsubishi 3V-2 •Solar Mars 100s - Compresor Solar C452 •Solar Taurus 70s - Compresor C404	

Fuente: (Elaboración propia, 2023)

### 2.1.5 Parámetros operativos

Los parámetros operativos en una estación de compresión se refieren a las condiciones y variables fundamentales que se monitorean y controlan para asegurar el funcionamiento adecuado y eficiente de los compresores y equipos asociados en una instalación.

#### 2.1.5.1 Presión de succión

Es la presión a la cual el gas o fluido ingresa al compresor antes de ser comprimido. Esta presión es un factor crucial ya que afecta el rendimiento y la eficiencia del compresor. Una

presión de succión adecuada es fundamental para el funcionamiento óptimo del compresor, ya que influye en la capacidad de compresión, el consumo de energía y la vida útil del equipo.

#### **2.1.5.2 Presión de descarga**

La presión de descarga en un compresor se refiere a la presión a la que el gas comprimido es expulsado del compresor hacia el sistema o la red de distribución. Es el resultado del aumento de presión que ocurre dentro del compresor debido al proceso de compresión, donde el gas es comprimido y su volumen se reduce, lo que eleva su presión.

#### **2.1.5.3 Potencia requerida**

La potencia requerida en un compresor se relaciona con la fuerza necesaria para comprimir el gas desde la presión de entrada a la presión de salida deseada. Esta potencia puede ser suministrada por motores eléctricos, motores de combustión interna u otras fuentes de energía, dependiendo del tipo de compresor y de las aplicaciones específicas.

#### **2.1.5.4 Caudal Estándar**

El caudal estándar en una estación de compresión se refiere a la tasa de flujo de gas que se mide y ajusta a condiciones específicas de temperatura, presión y composición, usualmente normalizadas a condiciones estándar.

#### **2.1.5.5 Temperatura**

La temperatura del gas en diferentes puntos del sistema, como la temperatura de entrada y salida del compresor, es esencial para garantizar un funcionamiento seguro y eficiente.

Otros Parámetros a Considerar:

#### **2.1.5.6 MAOP**

MAOP significa "Presión Máxima de Operación Permitida". Es el nivel máximo de presión en un sistema o tubería que se considera seguro para operar de manera continua bajo condiciones normales de funcionamiento. Este límite está establecido por normativas, estándares o códigos de seguridad y se determina teniendo en cuenta factores como la resistencia de los materiales, el diseño del sistema, la presión de operación habitual y las características del fluido transportado.

### **2.1.5.7 MOP**

La MOP se establece con base en estándares de seguridad, análisis de ingeniería y pruebas de resistencia de materiales. Este valor es esencial en industrias como la del gas, petróleo y productos químicos, donde la presión en los sistemas de tuberías y equipos debe mantenerse dentro de límites seguros para evitar fallos, fugas, rupturas u otros eventos peligrosos.

### **2.1.6 Normas**

#### **2.1.6.1 Norma B 31.8**

La norma B31.8 es una normativa de ingeniería establecida por la Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos (ASME) que establece los estándares para el diseño, construcción, inspección y mantenimiento de sistemas de tuberías para el transporte y distribución de gas y líquidos inflamables.

En una estación de compresión de gas, la norma B31.8 se aplica para asegurar que el diseño y la operación de las tuberías, compresores y equipos asociados cumplan con estándares de seguridad y rendimiento. Defina directrices para la selección de materiales, espesores de pared, pruebas de presión, métodos de soldadura y otras consideraciones esenciales para garantizar la integridad y la seguridad de las instalaciones de transporte de gas. La norma B31.8 busca asegurar que la presión, temperatura y otros parámetros operativos se mantengan dentro de límites seguros para prevenir accidentes y proteger la vida, la propiedad y el medio ambiente.

#### **2.1.6.2 Norma B31.3**

La norma B31.3 es un estándar de ingeniería establecido por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) que se enfoca en el diseño, construcción y ensayo de sistemas de tuberías para el transporte y procesamiento de fluidos, excluyendo el transporte de gas y líquidos inflamables, que están cubiertos por la norma B31.8.

En una estación de compresión de gas, la norma B31.3 podría aplicarse en conexiones de tuberías para fluidos diferentes al gas inflamable, tales como líquidos de enfriamiento, lubricantes, sistemas de control de temperatura, entre otros. Esta norma proporciona pautas para el diseño, selección de materiales, métodos de soldadura, pruebas de presión y otros aspectos de construcción y mantenimiento de sistemas de tuberías que no involucran el transporte de gases inflamables.

Es fundamental seguir la norma B31.3 en las conexiones de tuberías en una estación de compresión de gas para garantizar la integridad estructural, la seguridad y el rendimiento de los sistemas no relacionados con el transporte de gases inflamables.

## 2.2 MARCO CONTEXTUAL

### 2.2.1 Ubicación de Estación de Compresión

La estación de compresión de Novillero se encuentra ubicada en el departamento de Cochabamba, provincia Campero, municipio de Aiquile, esta estación pertenece al gasoducto Taquiperenda-Cochabamba (GTC).

- Las coordenadas de la estación son: 264458E y 7972756S
- Altura: 2 082.1 msnm.

**Figura No 10: Macro-localización de la Estación de Novillero**



Fuente: (Google Earth, 2023)

**Figura No 11: Micro-localización de la Estación Novillero**



Fuente: (Google Earth, 2023)

### **2.2.2 Descripción de la Estación de Compresión**

La Estación de Compresión Novillero trabaja con el gasoducto Taquiperenda-Cochabamba (GTC) con sentido de flujo bidireccional, donde actualmente predomina la dirección de Cochabamba hacia Sucre.

La unidad de compresión de gas (UCG) que se instaló, fue trasladada desde la Estación Sica Sica con todas sus partes, actualmente la estación cuenta con servicios utilitarios requeridos, además de sus respectivas cubiertas formadas por perfiles estructurales y calamina trapezoidal.

**Figura No 12: Estación de Compresión Novillero**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

### 2.2.2.1 Sistema de Gas de Proceso (Succión y descarga)

#### a) Succión

El gas que ingresa a la Estación Novillero, ya sea con sentido de flujo Huayñacota – Tapirani o Tapirani – Huayñacota, pasa por un filtro horizontal este impide el ingreso de de solidos extraños en particulas durante las operaciones de puesta en marcha.

**Figura No 13: Separador de Polvo y Líquidos**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

El arreglo de válvulas cuenta con válvulas de bloqueo o de by-pass, en la Estación de novillero, las válvulas de bloqueo permiten que estas se cierren automáticamente cuando existe reducción de presión.

**Figura No 14: Válvula de Bloqueo y By-Pass**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

La Estación también cuenta con un juego de válvulas para el control de succión y descarga bidireccional.

**Figura No 15: Manifold**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

La línea de succión ingresa al skid del compresor donde previamente se encuentra una válvula Shut Down para protección de la UCG.

**Figura No 16: Válvula Shut Down**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

**b) Descarga**

Al salir el gas de la unidad de compresión y el Aeroenfriador, la línea de descarga pasa por un puente de medición tipo ultrasónico.

**2.2.2.2 Sistema de Tuberías**

Los sistemas de tuberías se especificaron en conformidad con el código ASME B31.8 principalmente y ASME B31.3. El diseño de tuberías contempla las conexiones requeridas y ampliaciones futuras.

El diseño se refiere a las líneas: de succión, descarga, venteo, alivio, drenajes, gas combustible, gas de arranque, gas de instrumentos y otros.

**Figura No 17: Sistema de Tuberías**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

### **2.2.2.3 Válvulas**

Entre los tipos de válvulas instaladas en la Estación tenemos válvula bola totalmente soldadas, válvula de bola de tres cuerpos, válvula de retención, válvulas globo, también se cuentan con actuadores.

**Figura No 18: Válvula bola**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

### **2.2.2.4 Puente de Regulación y Medición**

El gas comprimido que sale de la UCG es dirigido a un puente de regulación tipo ultrasónico, este se encuentra con una cubierta tipo trapezoidal galvanizada.

**Figura No 19: Puente de Regulación y Medición**

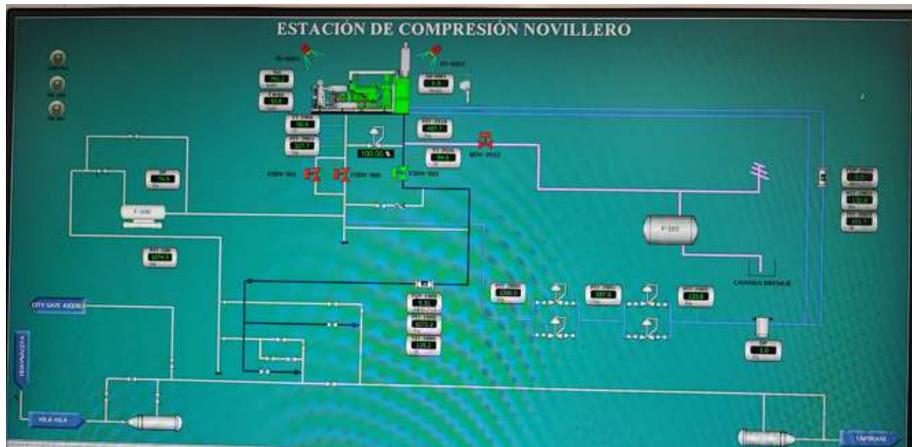


Fuente: (Elaboración propia, 2023)

### 2.2.2.5 Interfaz Hombre Maquina (HMI)

El HMI se encuentra instalada en sala de control y seguridad, este es de tipo PC industrial que esta enlazada a un sistema SCADA. Tiene como función principal monitorear las señales principales de la UCG como ser el motor, compresor y aereoenfriador, también monitorea las señales del campo y medición, reportando así alarmas y paros.

**Figura No 20: HMI Estación de Compresión Novillero**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

### 2.2.2.6 Pararrayo

Esta estructura tiene la finalidad de proteger a la Estación de descargas atmosféricas.

**Figura No 21: Torre Pararrayos**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

### **2.2.2.7 Unidad de Compresión de Gas**

Esta unidad está conformada por un compresor reciprocante de marca Ariel con motor Waukesha y un Aeroenfriador marca Smithco, todo esto fue provisto por A.G. Equipment.

#### **a) Compresor**

El compresor es de tipo reciprocante separable marca Ariel JGD/2, esto quiere decir que es de alta potencia y velocidad media, este acoplado a un motor de gas natural, tiene las siguientes características:

**Tabla No 6: Especificaciones del Compresor**

<b>ITEM</b>	<b>Compresor</b>
<b>Marca</b>	Ariel
<b>Modelo</b>	JGD/2
<b>Potencia (hp)</b>	2070
<b>N° Cilindros</b>	2
<b>Capacidad Max. (MMscfd)</b>	20
<b>Carrera (in)</b>	5 ½
<b>Velocidad max. (rpm)</b>	1200

Fuente: (Ariel Corporation, 2018)

**Figura No 22: Compresor Reciprocante Ariel JGD2**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

**b) Motor**

El motor es de la Serie Cuatro pueden producir de forma fiable más potencia con gases de campo calientes, a grandes altitudes y en lugares remotos, a la vez que ofrecen bajas emisiones cuando se combinan con un catalizador de 3 vías (NSCR).

**Figura No 23: Compresor Waukesha tipo V**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

**Tabla No 7: Especificaciones del Motor**

ITEM	Motor
Marca	Waukesha
Modelo	L5794 GSI
Potencia (hp)	1380
Velocidad (rpm)	1200
Carrera	5 ½ in
Nº Cilindros	V12

Fuente: (Waukesha, 2019)

**c) Aeroenfriador**

Este Aeroenfriador forma parte de la unidad de compresión donde este es un modelo 132-2F marca Smithco.

**Figura No 24: Aeroenfriador**



Fuente: (Elaboración propia, 2023)

**2.2.2.8 Parámetros de Operación**

Las condiciones de operación en la estación, como la presión de descarga, succión, flujo, cromatografía, MOP, MAOP son las siguientes:

**Tabla No 8: Parámetros de Operación en Novillero**

Presión de Succión	450 – 650 psig
Temperatura de succión	80 – 110 °F
Presión de descarga	1 050 – 1 300 psig
Temperatura de descarga	≤ 120 °F
Flujo	16.2 MMpcd
MAOP (psi)	1220
MOP (psi)	1250

Fuente: (YPFB Transporte S.A., 2021)

**Tabla No 9: Cromatografía del gas en el GTC**

Componentes		%mol
Nitrógeno	N2	0.679
Dióxido de Carbono	CO2	1.422
Metano	CH4	89.950
Etano	C2H6	5.687
Propano	C3H8	1.434
i-Butano	C4H10	0.230
n-Butano	C4H10	0.348
i-Pentano	C5H12	0.101
n-Pentano	C5H12	0.070
Hexanos	C6H14	0.079

Fuente: (YPFB Transporte S.A., 2021)

### **2.2.3 Diagnostico**

La Estación de Compresión de Gas de Novillero indica que su instalación finalizó en agosto de 2022 y espera para operar una vez que la nueva fábrica de cemento en Potosí inicie su producción, aumentando así la demanda de gas en la región.

Hasta la fecha actual, la estación de Novillero funciona una vez al mes para prevenir y detectar posibles fallas. Se encuentra preparado para comenzar a operar en cualquier momento. Si bien opera esporádicamente, se prevé que, después de 2 años desde su instalación (en 2024), será necesario realizar un mantenimiento programado del compresor, lo que requerirá detener su funcionamiento. Para evitar interrupciones en el transporte de gas, se recomienda contar con una unidad de compresión adicional como respaldo.

Para evaluar diversas marcas de compresores, es esencial tener información adicional, como la cromatografía del gas y las presiones de entrada y salida. Además, se prioriza la elección de compresores con bajas emisiones de gases. El candidato ideal deberá cumplir con especificaciones similares al compresor principal, previamente detalladas en la sección anterior.

## **2.3 INFORMACION Y DATOS OBTENIDOS**

En la visita a la Estación de Compresión realizada en octubre de 2023, se pudo observar el compresor en funcionamiento. Se encontraban realizando los monitoreos ambientales, que se realizan una vez al año. Además, se encontraban cumpliendo con el arranque mensual, que se realiza temporalmente para detectar posibles fallas.

Se pudo conversar con el ingeniero a cargo de la estación. Me presenté con el respectivo documento universitario y el equipo de protección personal correspondiente y expliqué el motivo de la visita, que era conocer más sobre la estación para así realizar el trabajo de investigación. El ingeniero respondió positivamente y me acompañó en un recorrido por la estación. Así pude obtener algunos datos necesarios para realizar el presente trabajo.

También se solicitó información acerca del compresor de la Estación Novillero a YPFB Transporte S.A., adicionalmente se hizo una investigación logrando obtener material de utilidad para el desarrollo de los siguientes cálculos.

### **2.3.1 Cálculos para la Selección del Compresor**

Para realizar los cálculos se iniciará desde la cromatografía del gas que se transporta en el Gasoducto Taquiperenda- Cochabamba, con estos datos se llegará a obtener la gravedad específica, peso molecular del gas, presión pseudocrítica, temperatura pseudocrítica y la capacidad calorífica molar.

#### **2.3.1.1 Método de cálculo detallado de la potencia del compresor**

Este método permite realizar el cálculo de la potencia requerida en base a las propiedades del gas, condiciones de entrada y salida del compresor.

##### **a) Cálculo de gravedad específica**

Para obtener el peso molecular del gas se realiza una sumatoria del producto de la fracción molar y el peso molecular de cada componente, llegando a obtener 18.116 lb/lbmol. Usando como fluido de referencia el aire con un peso molecular de 28.97 lb/lbmol, la gravedad específica de 0.625 se obtuvo con la ecuación (2):

$$SGg = \frac{18.116}{28.97} = 0.625$$

**Tabla No 10: Datos para la determinación del peso molecular del gas**

COMPONENTES		% MOL	Yi	PMi	Pmi*Yi
Nitrógeno	N2	0.679	0.007	28.014	0.190
Dióxido de Carbono	CO2	1.422	0.014	44.010	0.626
Metano	CH4	89.950	0.900	16.042	14.430
Etano	C2H6	5.687	0.057	30.069	1.710
Propano	C3H8	1.434	0.014	44.096	0.632
i-Butano	C4H10	0.230	0.002	58.122	0.133
n-Butano	C4H10	0.348	0.003	58.122	0.202
i-Pentano	C5H12	0.101	0.001	72.149	0.073
n-Pentano	C5H12	0.070	0.001	72.149	0.051
Hexanos	C6H14	0.079	0.001	86.175	0.068
		<b>100</b>			<b>18.116</b>

**b) Cálculo de presión y temperatura pseudocrítica**

Continuando con los cálculos se obtendrá las propiedades pseudocríticas leyendo las propiedades pseudocríticas para cada componente, la sumatoria de la fracción molar y la propiedad leída de cada compuesto da como resultado la presión y temperatura pseudocrítica del gas.

**Tabla No 11: Propiedades Pseudocríticas**

COMPONENTES		Yi	Pci*Yi	Tci (°F)	Tci (°R)	Tci*Yi
Nitrógeno	N2	0.007	3.345	-232.530	227.470	1.545
Dióxido de Carbono	CO2	0.014	15.220	87.760	547.760	7.791
Metano	CH4	0.900	599.968	-116.660	343.340	308.835
Etano	C2H6	0.057	40.182	89.920	549.920	31.272
Propano	C3H8	0.014	8.826	205.920	665.920	9.549
i-Butano	C4H10	0.002	1.212	274.410	734.410	1.686
n-Butano	C4H10	0.003	1.915	305.550	765.550	2.662
i-Pentano	C5H12	0.001	0.496	369.000	829.000	0.839
n-Pentano	C5H12	0.001	0.343	365.800	825.800	0.579
Hexanos	C6H14	0.001	0.345	453.800	913.800	0.722
<b>Sumatoria</b>			<b>671.852</b>			<b>365.480</b>

**c) Cálculo de la capacidad calorífica molar**

Para obtener estos datos se leerán de la figura No 8 para cada componente a 150°F, la sumatoria del producto de la fracción molar y la capacidad calorífica de cada componente nos da como resultado el poder calorífico a presión constante, esto nos permitirá calcular la constante de relación de capacidades caloríficas "k".

Usando la ecuación (8) obtenemos la capacidad calorífica molar a volumen constante “MCV” de 7.541 BTU (lbmol - °F), con este último dato calculado podremos calcular K con la ecuación (9).

**Tabla No 12: Capacidad calorífica molar**

COMPONENTES		Yi	Mcpi @150°F	Yi*Mcpi @150°F
Nitrógeno	N2	0,007	6,96	0,047
Dióxido de Carbono	CO2	0,014	9,29	0,132
Metano	CH4	0,900	8,95	8,051
Etano	C2H6	0,057	13,78	0,784
Propano	C3H8	0,014	19,52	0,280
i-Butano	C4H10	0,002	25,77	0,059
n-Butano	C4H10	0,003	25,81	0,090
i-Pentano	C5H12	0,001	31,66	0,032
n-Pentano	C5H12	0,001	31,86	0,022
Hexanos	C6H14	0,001	37,93	0,030
<b>Sumatoria</b>				<b>9,527</b>

$$MC_v = 9.527 - 1.986 = 7.541 \text{ Btu (lbmol} - ^\circ\text{F)}$$

$$K = \frac{9.527}{7.541} = 1.263$$

**d) Cálculo de presión y temperatura pseudoreducidas**

Antes de calcular estas propiedades, debemos analizar las presiones de succión y descarga. Al trabajar con presiones manométricas “psig” se debe transformar a presiones absolutas usando la presión atmosférica. Calcular valores pseudocríticas con ecuaciones (5) y (6)

➤ **Condiciones de succión**

$$P_{abs} = 450 + 14.7 = 464.7 \text{ psi} = P_d$$

$$T_d = 80 + 460 = 540^\circ\text{R}$$

Obtenemos de los cálculos de tablas la Ppc y Tpc:

$$P_{pc} = 671.872 \text{ psi} \quad T_{pc} = 365.480 \text{ }^\circ\text{R}$$

$$P_{sr} = \frac{464.7}{671.872} = 0.69$$

$$T_{sr} = \frac{540}{365.480} = 1.478$$

➤ **Condiciones de descarga**

$$P_{abs} = 1\ 050 + 14.7 = 1064.7\ psi = P_s$$

$$T_s = 120 + 460 = 580\ ^\circ R$$

Obtenemos de los cálculos de tablas la  $P_{pc}$  y  $T_{pc}$ :

$$P_{pc} = 671.872\ psi \quad T_{pc} = 365.480\ ^\circ R$$

$$P_{sr} = \frac{1\ 064.7}{671.872} = 1.584$$

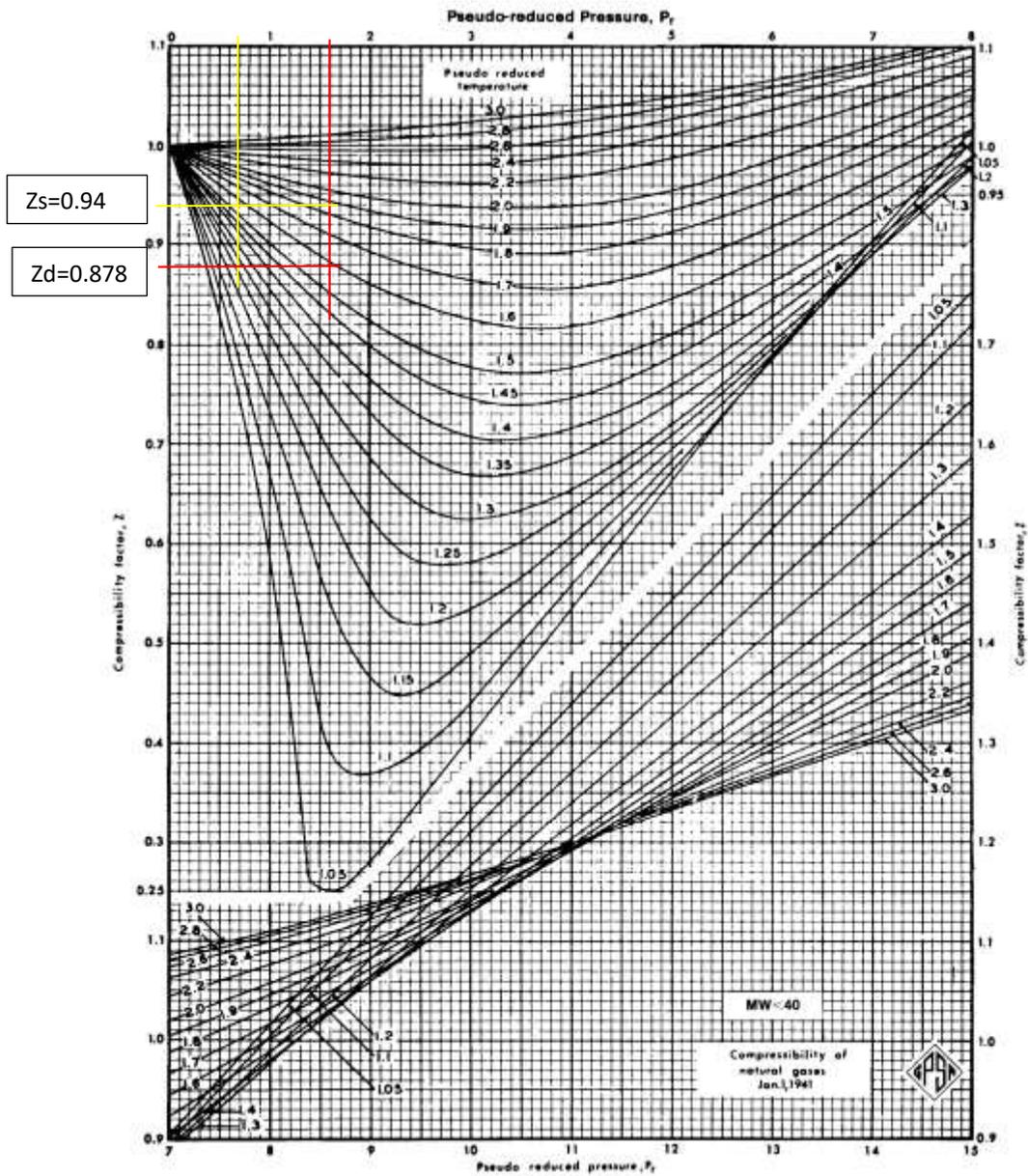
$$T_{sr} = \frac{580}{365.480} = 1.587$$

e) **Cálculo de factor de compresibilidad del gas**

Con los últimos cálculos realizado de  $P_{sr}$  y  $T_{sr}$  de succión y descarga, calculamos el factor de compresibilidad “z” por el método gráfico utilizando la Figura No 7, para ambas condiciones.

**Tabla No 13: Tabulación de resultados del factor de compresibilidad**

Condiciones	$P_{sr}$	$T_{sr}$	Met. Gráfico “z”	$Z_{prom}$
Succión	0.69	1.48	0.94	<b>0.909</b>
Descarga	1.58	1.59	0.878	



f) **Cálculo de numero de etapas requeridas**

Con los datos de presión de succión y descarga de debe ir iterando hasta aproximarse una relación entre 2 y 4, con la ecuación (9).

➤ Para 1 etapa:

$$R = \left( \frac{1064.7}{464.7} \right)^{1/1} = 2.29$$

➤ Para 2 etapas:

$$R = \left( \frac{1\ 064.7}{464.7} \right)^{1/2} = 1.51$$

**Tabla No. 14: Iteración para Numero de Etapas**

Configuración	Ps (psi)	Pd (psi)	Etapas	R est.
1 etapa	464.7	1 064.7	1	2.291
2 etapas	464.7	1 064.7	2	1.514
3 etapas	464.7	1 064.7	3	1.318

En la configuración con una etapa la relación obtenida se encuentra dentro del parámetro, por tanto, el compresor ser a de 1 etapa.

### g) Cálculo de relación de compresión

La relación de compresión es el cociente de la presión de descarga entre la presión de succión, siguiendo la ecuación (10):

$$r = \frac{1\ 064.7}{464.7} = 2.29$$

### h) Cálculo de potencia requerida

Finalmente calculamos la potencia con la ecuación (11) usando todos los datos calculados previamente, trabajando con una eficiencia de potencia de 0.75 tabla No 1 se obtiene:

$$BHP = 3.03 * 0.909 * \left( \frac{16 * 540}{0.75} \right) * \left( \frac{1.263}{1.263 - 1} \right) * \left( \frac{14.7}{520} \right) * \left[ \left( \frac{1064.7}{464.7} \right)^{\left( \frac{1.263-1}{1.263} \right)} - 1 \right]$$

$$BHP = 811.678$$

### 2.3.1.2 Selección de Compresores Candidatos

Teniendo de dato la presión de operación máxima admisible (MAOP), la potencia requerida calculada, considerando algunas características del compresor principal y basándonos en los modelos y marcas de compresores usados en Bolivia, se realizó la siguiente tabla de información:

**Tabla No 15: Modelos y Marcas de Compresores Candidatos**

<b>Características del Compresor</b>	<b>Principal</b>	<b>Opción 1</b>	<b>Opción 2</b>
<b>Marca</b>	Ariel	Ariel	Dresser Rand
<b>Modelo</b>	JGD/2	JGE/2	6DVIP2
<b>Potencia (hp)</b>	2 070	1 070	1 500
<b>N° Cilindros</b>	2	2	2
<b>Stroke S (in)</b>	5.5	5.5	6
<b>Velocidad max. N (rpm)</b>	1 200	1 500	1 200
<b>MAWP (psi)</b>	2 415	1 440	1 500
<b>Diametro de Cilindro (in)</b>	7.25	7.0 – 7.375	9.75 – 10.5
<b>Diametro del vástago del cilindro (in)</b>	2.5	2	-
<b>Tipo</b>	Separable	Separable	Integral
<b>Carga permisible de compresión (lb)</b>	60000	32000	-
<b>Carga permisible de tensión (lb)</b>	57000	30000	-

### 2.3.1.3 Cálculo de la Cantidad Volumétrica Real de Gas en la Entrada

Con los datos de presión de entrada y condiciones estándar usando la ecuación (12), se obtendrá el valor del caudal actual:

$$Q_{actual} = 16 * \left(\frac{14.7}{520}\right) * \left(\frac{540 * 0.839}{464.7 * 1}\right) = 440.978 \text{ MPCD}$$

Transformando el resultado a PC/min se tiene:

$$Q_{actual} = 306.235 \text{ PC/min}$$

### 2.3.1.4 Cálculo de eficiencia volumétrica

En este cálculo se deben hacer las siguientes consideraciones:

Como primera consideración de 20 % de Clearance, esto debido a que una vez que se termine la selección, esta información se debe solicitar al fabricante. Como segunda consideración, al haber usado el factor de compresibilidad promedio entre la entrada y salida del compresor el valor de  $Z_s/Z_d$  será igual a 1.

Utilizando la Figura No 9 para hallar  $r^{(1/k)}$ :

Compression Ratio	k, isentropic exponent Cp/Cv								
	1.10	1.14	1.18	1.22	1.26	1.30	1.34	1.38	1.42
1.2	1.180	1.173	1.167	1.161	1.156	1.151	1.146	1.141	1.137
1.4	1.358	1.343	1.330	1.318	1.306	1.295	1.285	1.276	1.267
1.6	1.533	1.510	1.489	1.470	1.452	1.436	1.420	1.406	1.392
1.8	1.706	1.675	1.646	1.619	1.594	1.572	1.551	1.531	1.513
2.0	1.878	1.837	1.799	1.765	1.733	1.704	1.677	1.652	1.629
2.2	2.048	1.997	1.951	1.908	1.870	1.834	1.801	1.771	1.742
2.4	2.216	2.155	2.100	2.050	2.003	1.961	1.922	1.886	1.852
2.6	2.384	2.312	2.247	2.188	2.135	2.086	2.040	1.999	1.960
2.8	2.550	2.467	2.393	2.326	2.264	2.208	2.156	2.109	2.065
3.0	2.715	2.621	2.537	2.461	2.391	2.328	2.270	2.217	2.168
3.2	2.879	2.774	2.680	2.595	2.517	2.447	2.382	2.323	2.269
3.4	3.042	2.926	2.821	2.727	2.641	2.563	2.492	2.427	2.367
3.6	3.204	3.076	2.961	2.857	2.764	2.679	2.601	2.530	2.465
3.8	3.366	3.225	3.100	2.987	2.885	2.792	2.708	2.631	2.560
4.0	3.526	3.374	3.238	3.115	3.005	2.905	2.814	2.731	2.655
4.2	3.686	3.521	3.374	3.242	3.124	3.016	2.918	2.829	2.747
4.4	3.846	3.668	3.510	3.368	3.241	3.126	3.021	2.926	2.839
4.6	4.004	3.814	3.645	3.493	3.357	3.235	3.123	3.022	2.929
4.8	4.162	3.959	3.779	3.617	3.473	3.342	3.224	3.116	3.018
5.0	4.319	4.103	3.912	3.740	3.587	3.449	3.324	3.210	3.106
5.2	4.476	4.247	4.044	3.863	3.700	3.554	3.422	3.303	3.193
5.4	4.632	4.390	4.175	3.984	3.813	3.659	3.520	3.394	3.279
5.6	4.788	4.532	4.306	4.105	3.925	3.763	3.617	3.485	3.364
5.8	4.943	4.674	4.436	4.224	4.035	3.866	3.713	3.574	3.448
6.0	5.098	4.815	4.565	4.343	4.146	3.968	3.808	3.663	3.532
6.2	5.252	4.955	4.694	4.462	4.255	4.069	3.902	3.751	3.614
6.4	5.406	5.095	4.822	4.579	4.363	4.170	3.996	3.839	3.696
6.6	5.560	5.235	4.949	4.696	4.471	4.270	4.089	3.925	3.777
6.8	5.713	5.374	5.076	4.813	4.578	4.369	4.181	4.011	3.857

Tabla No 16: Interpolación para determinación  $r^{(1/k)}$

Interpolando	
R	$r^{(1/k)}$
2.20	1.870
2.29	<b>1.930</b>
2.40	2.003

Valor de  $r^{(1/k)}$  calculado:

$$r^{(1/k)} = 1.930$$

$$V.E. = 96 - 2.29 - 20 * \left[ \frac{0.859}{0.859} * 1.930 - 1 \right] = 92.54\%$$

### 2.3.1.5 Cálculo del desplazamiento del pistón

Ya obtenidos el valor de la eficiencia volumétrica y el valor de la capacidad de entrada actual, usando la ecuación (14) obtenemos el desplazamiento del pistón:

$$PD = \frac{Q_{actual}}{V.E.}$$

$$PD = \frac{306.235}{0.9254} = 330.928 \text{ PC/min}$$

### 2.3.1.6 Dimensionamiento de diámetro del cilindro

Para realizar este cálculo se debe establecer las velocidades de giro del compresor, por lo que, se seleccionara el compresor ARIEL JGE-2, con una velocidad de 1500 rpm. Una vez determinado el diámetro estimado se debe verificar en el catálogo del fabricante.

Con ecuación (15) despejar Diámetro del pistón:

$$D = \sqrt{\frac{\left[ \frac{330.928 * 4.1728}{5.5 * 1500 * \pi} \right] + 2^2}{2}} = 6.718 \text{ in}$$

Verificando en catalogo se selecciona el diámetro superior y la presión de trabajo máximo admisible (MAWP), adicionalmente considerando la MAOP.

**Tabla No 17: Datos de catalogo ARIEL JGE/2**

Valores Comerciales	
Dcil (in)	MAWP (psi)
7	1440
7.375	1400

El valor seleccionado será:  $D_{cil} = 7 \text{ in}$  y  $MAWP = 1440 \text{ psi}$ .

### 2.3.1.7 Cálculo de cargas permisibles

Este cálculo finalmente definirá si el compresor estudiado será el seleccionado, las ecuaciones (17) y (18):

$$A_p = \frac{\pi}{4} * 7^2 = 38.484 \text{ in}^2$$

$$A_r = \frac{\pi}{4} * 2^2 = 3.142 \text{ in}^2$$

$$A_c = 38.484 - 3.142 = 35.343 \text{ in}^2$$

➤ Cargas de compresión

$$L_c = 38.484 * 1064.7 - 35.343 * 464.7 = 24550.604 \text{ lb}$$

➤ Cargas de tensión

$$L_T = 35.343 * 1064.7 - 38.484 * 464.7 = 19745 \text{ lb}$$

Los resultados de las cargas son muy bajos en comparación con las cargas admisibles, por lo que se deberá trabajar con un diámetro de cilindro siguiente al de 7 in.

**Tabla No 18: Resultados de cargas de compresión y de tensión.**

Dcil (in)	MAWP (psi)	Dr (in)	Ap (in <sup>2</sup> )	Ar (in <sup>2</sup> )	Ac (in <sup>2</sup> )	Lc (lb)	Lt (lb)	Carga permisible de compresión (lb)	Carga permisible de tensión (lb)
7	1440	2	38,484	3,142	35,343	24 550,6	19 745,9	32 000	30 000
7,375	1440		42,718		39,577	27 090,9	22 286,1		

Realizando el mismo procedimiento para el cálculo de las cargas de compresión y de tensión con un diámetro de cilindro de 7.375 in se obtienen resultados más aproximados a los datos de catálogo.

Por tanto, las características del compresor seleccionado serán:

**Tabla No 19: Características de compresor seleccionado**

<b>Características del Compresor</b>	
<b>Compresor</b>	Reciprocante
<b>Tipo</b>	Separable
<b>Marca</b>	Ariel
<b>Modelo</b>	JGE
<b>Clase</b>	7-3/8ET
<b>Nº cilindros</b>	2
<b>Velocidad (rpm)</b>	1500
<b>D cil (in)</b>	7,375
<b>MAWP (psi)</b>	1440

### 2.3.2 Selección de motor

Para realizar la selección del motor se usará la Figura No 6, donde se usará como base el valor la potencia requerida calculada igual a 811.7 BHP y el modelo de motor más usado en Bolivia.

Note: Figures may be approximate due to variations in engine services and are representative of new engines only. Refer to manufacturer for exact information.

ENGINE	Full Power at Full Speed (bhp)	Full Speed (rpm)	Strokes Per Cycle	BMEP (psi)	Fuel Reqmt (Btu/(bhp-hr)) LHV	Jacket Water Cooler	Heat Rejection Btu / (bhp · hr)			Exhaust rate (lb/(bhp-hr))	Exhaust temp (F)
							Cylinder Cooling	Turbo Intercooler/ Aftercooler	Atmosphere i.e. Surface Heat Loss		
<b>Waukesha</b>											
F18GL	400	1800	4	160	7524	1980	325	485	211	9.36	674
H24GL	530	1800	4	160	7800	2147	323	547	188	10.26	851
L36GL	800	1800	4	160	7129	1839	238	421	144	9.14	838
P48GL	1065	1800	4	160	7106	1892	233	422	134	9.12	836
F2895GL	807	1200	4	138	7282	1980	329	395	264	10.81	700
F3521GL	738	1200	4	138	7377	2003	306	373	253	10.90	703
F3524GSI	840	1200	4	158	7826	2435	337	148	410	6.64	1135
L5108GL	1072	1200	4	138	7295	1926	354	368	275	10.78	680
L5790GL	1215	1200	4	138	7284	1967	329	398	239	10.03	679
L5794GSI	1380	1200	4	158	7650	2275	355	110	473	6.41	1135
L7042GL	1476	1200	4	138	7274	1905	291	367	222	10.75	709
L7044GSI	1680	1200	4	158	7876	2318	337	107	432	6.73	1181
P9390GL	1963	1200	4	138	7221	1750	316	387	182	10.19	763
8LAT27GL	2090	1000	4	190	6556	1187	280	510	125	11.98	677
12VAT27GL	3130	1000	4	190	6568	1238	239	569	90	11.04	703
18VAT27GL	4500	1000	4	205	6583	719	290	539	204	12.21	776
<b>Wartsila</b>											
12V34SG-CD (1)	5.552	750	4	252	5.780	725 (2)	295	233 (3)	94	9.82	779

Revisando los catálogos de Waukesha el motor más próximo a la potencia requerida de es el modelo F3524GSI con potencia de 840 BHP y el motor convencional en Bolivia es el modelo L5794GSI Con una potencia de 1380 BHP.

Ya contando con estos datos al revisar las fichas técnicas el que cuenta con una baja emisión de gases es el modelo L5794GSI, lo cual este criterio es de mucha relevancia a la hora de hacer una selección de motor.

## 2.4 ANALISIS Y DISCUSION

### 2.4.1 Análisis

Al realizar la selección del compresor recíprocante se tuvo dos candidatos de diferentes marcas, entre ellos Ariel y Dresser Rand (marcas usadas en Bolivia), donde para realizar los cálculos se puso como ejemplo los datos del compresor de la marca Ariel esto debido a que es de tipo separable y cuenta con mayores variables a considerar.

El modelo seleccionado de la marca ARIEL fue JGE/2, basándonos en un modelo ya usado en Bolivia, la única variación que se tomo fue el número de cilindros, este número fue determinado en base al dato del compresor principal, adicionalmente considerando el cálculo de la potencia requerida, el cual fue de **811,7 BHP**.

Teniendo estas consideraciones se hizo los cálculos del número de etapas, relación de compresión, propiedades del gas, condiciones de succión y descarga, caudal actual, eficiencia volumétrica, desplazamiento del pistón, dimensionamiento del diámetro, donde en este último

punto se tuvo que hacer una selección del diámetro del cilindro, primeramente se hizo el cálculo con un diámetro de 7 in dando como resultado cargas de tensión y de compresión muy bajas en comparación a las de diseño, por lo que se optó por tomar un diámetro superior de 7.375 in dando así un resultado de cargas más próximas a las de diseño. Valores calculados (Tabla 18).

Dcil (in)	MAWP (psi)	Dr (in)	Ap (in <sup>2</sup> )	Ar (in <sup>2</sup> )	Ac (in <sup>2</sup> )	Lc (lb)	Lt (lb)	Carga permisible de compresión (lb)	Carga permisible de tensión (lb)
7	1440	2	38,484	3,142	35,343	24 550,6	19 745,9	32 000	30 000
7,375	1440		42,718		39,577	27 090,9	22 286,1		

Llegando a definir que el compresor estudiado es óptimo para una unidad de compresión de respaldo. Detalles del compresor seleccionado, (Tabla 19)

<b>Características del Compresor</b>	
<b>Compresor</b>	Reciprocante
<b>Tipo</b>	Separable
<b>Marca</b>	Ariel
<b>Modelo</b>	JGE
<b>Clase</b>	7-3/8ET
<b>Nº cilindros</b>	2
<b>Velocidad (rpm)</b>	1500
<b>D cil (in)</b>	7,375
<b>MAWP (psi)</b>	1440

En cuanto a la selección del compresor se optó por un método de selección de tablas en base a los datos previamente calculados como ser la potencia requerida, adicionalmente se consideró las características del motor convencional en Bolivia. Donde se seleccionó dos modelos de la marca Waukesha, F3524GSI motor más próximo a la potencia requerida y L5794GSI motor convencional en Bolivia.

Analizando las emisiones de gases de cada motor se llegó a determinar que el motor Waukesha L5794GSI es el que tiene una baja emisión de gas, adicionalmente de que en Bolivia cumple con todas las normas requeridas.

#### 2.4.2 Discusión

Salgado De La Guarda, E.M. (2019) en su investigación titulada "**Ingeniería Básica para construcción de una Estación Compresora**", realizó la selección de un compresor Ariel con motor Waukesha, utilizando modelos de cálculos y analizó las cargas de tensión y compresión, donde realizó comparación de sus resultados con el software de la marca de compresores ARIEL, llegando a obtener valores más exactos del compresor y el motor más óptimo.

Ariaza Gomez, J. (2019) en su investigación titulada "**Guía para la Selección, Instalación y Mantenimiento de Compresores Reciprocantes de Gas**", realizó la selección de un compresor Ariel con motor Waukesha, basándose en ecuaciones y criterios técnicos- teóricos, donde tuvo como resultado la selección de una unidad de compresión de 3 etapas, con un compresor reciprocante de marca Ariel y un motor de marca Waukesha. Como siguiente paso comparó los resultados obtenidos con el software de la marca de compresores ARIEL, llegando a corroborar sus resultados calculados.

#### 2.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Al visitar la estación de compresión se pudo conocer a detalle el estado de la estación, donde se observó que el lugar contaba con todo el equipamiento de una estación de compresión de gas natural a excepción de una unidad de compresión de respaldo, de ahí partió la investigación para realizar el estudio de un compresor de respaldo, donde se tomó en cuenta de que la estación no necesitaba un compresor para incrementar la capacidad esto debido a que la capacidad del gasoducto es de 16 MMPCD y el de la unidad de compresión es de 22.5 MMPCD, por lo que se consideró tomar en cuenta los datos del compresor principal.

Al realizar un diagnóstico de una estación de compresión se recomienda obtener los datos de diseño de cada equipo, estos datos se encuentran en las placas de diseño insertados en cada uno de ellos, esto permitirá facilitar y agilizar el trabajo de investigación.

- Para realizar una preselección se tuvo que tomar en cuenta criterios como la potencia requerida en base a datos de diseño como ser la presión y temperatura de succión y de descarga, las composiciones del gas natural, datos que fueron proporcionados en la estación. Adicionalmente se consideró los parámetros y características del compresor principal como ser la presión de operación máxima admisible,

características del compresor y del motor, datos que fueron solicitados a YPFB Transporte S.A.

En base a estos datos y adicionalmente después de haber investigado las características de las unidades de compresión para gas natural en Bolivia, se pudo realizar una selección de dos modelos de marcas distintas, los cuales fueron ARIEL y Dresser Rand, ya con estos valores se inició con los cálculos trabajando con los datos del modelo de la marca Ariel esto debido a que las ecuaciones a usar contaban con variables que se tenían de dato de este compresor.

se finalizó los cálculos obteniendo los valores de las cargas de tensión y de compresión a un determinado diámetro donde se analizó con los valores de cargas permisibles de diseño obtenidos del catálogo de ARIEL corporation. Llegando a la conclusión de que el primer diámetro de cilindro seleccionado no eran resistente a las cargas de tensión y compresión dando resultados bajos comprados con los de catálogo, por lo que se tuvo que seleccionar un diámetro de cilindro superior del mismo modelo para llegar así a obtener unas cargas de tensión y compresión más posible a las de diseño.

Para mayor precisión en la selección de un compresor se recomienda solicitar una cuenta de usuario a ARIEL corporation., para así acceder al software de la empresa y obtener resultados de mayor precisión para comprar con los calculados realizados.

- Para realizar la selección del motor de un compresor recíprocante en base a un análisis se consideró la potencia requerida, la baja emisión de gases, el modelo y marca más usado en Bolivia. Donde se seleccionó dos candidatos de la marca Waukesha el primero F3524GSI que era el más próximo al valor de la potencia requerida y el segundo L5794GSI que actualmente es el motor más usado en Bolivia. Realizando una comparativo el que contaba con una baja emisión de gases fue el segundo modelo, llegando así a determinar que el modelo a usar para esta unidad será el de Waukesha L5794GSI con una potencia de 1380 Hp.

Se recomienda contar con el software de Ariel corporation para mayor precisión en la selección y analizar las normas requeridas para una mejor selección.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Gas Processors Suppliers Association. (2004). ENGINEERING DATA BOOK. Tulsa, Oklahoma 74145: 6526 East 60th Street.
- Marys, S. D. (2019). *Inegieria Basica para construccion de una Estacion de Compresion*. Neuquén, Argentina.
- Gomez, j. N. (2016). *Guia para la Seleccion, Instalacion y Mantenimiento de compresores Reciprocantes de Gas*. Bucaramanga.
- Ariel Corporation. (s.f.). Manual Tecnico para modelos JGC y JGD
- Baralt, M. (2007). *Compresores Reciprocantes*. Maracaibo.
- TRANSIERRA /REPSOL YPF E&P Bolivia S.A. (2013). Estación de Compresion Villamontes. Obtenido de Recuperado de [www.inesco.com/proyectos/estacion-de-compresion-villamontes-20620-hp/](http://www.inesco.com/proyectos/estacion-de-compresion-villamontes-20620-hp/)
- Kimray. (2023). Obtenido de KIMRAY INC.: <https://kimray.com/training/descripcion-general-del-equipo-de-una-estacion-de-compresion-de-gas-natural>
- Waukesha. (2019). INNIO. Obtenido de <https://www.innio.com/es/productos/waukesha/vhp-seire-cinco>
- ARIEL corporation. (2018). *ARIEL corporation*. Obtenido de <https://es.arielcorp.com/compressors/compressor-landing-page.html>
- ARIEL corporation. (2018). *ARIEL corporation*. Obtenido de <https://es.arielcorp.com/compressors/compressor-landing-page/jgc-igd-igf.html>

## ANEXOS "A": Ficha técnica Compresores DRESSER-RAND

A-VIP Frames					
Model	Stroke In. (mm)	Number of Cylinders	Nominal Rated Power hp (kW)	Max. Allowable Rod Load lbs. (kN)	Rated rpm
4.5A-VIP2	4.5 (114.3)	2	540 (403)	15,400 (68)	1500
4.5A-VIP4	4.5 (114.3)	4	1080 (805)	15,400 (68)	1500
3.5A-VIP2	3.5 (88.9)	2	560 (483)	15,400 (68)	1800
3.5A-VIP4	3.5 (88.9)	4	1300 (969)	15,400 (68)	1800

B-VIP Frames					
Model	Stroke In. (mm)	Number of Cylinders	Nominal Rated Power hp (kW)	Max. Allowable Rod Load lbs. (kN)	Rated rpm
6B-VIP2	6 (152.4)	2	850 (634)	24,200 (108)	1200
6B-VIP4	6 (152.4)	4	1700 (1268)	24,200 (108)	1200
5B-VIP2	5 (127)	2	1062 (792)	24,200 (108)	1500
5B-VIP4	5 (127)	4	2125 (1585)	24,200 (108)	1500

C-VIP Frames					
Model	Stroke In. (mm)	Number of Cylinders	Nominal Rated Power hp (kW)	Max. Allowable Rod Load lbs. (kN)	Rated rpm
6C-VIP2	6 (152.4)	2	960 (716)	33,000 (147)	1200
6C-VIP4	6 (152.4)	4	1920 (1432)	33,000 (147)	1200
5C-VIP2	5 (127)	2	1200 (895)	33,000 (147)	1500
5C-VIP4	5 (127)	4	2400 (1790)	33,000 (147)	1500
4C-VIP2	4 (101.6)	2	1440 (1074)	33,000 (147)	1800
4C-VIP4	4 (101.6)	4	2880 (2148)	33,000 (147)	1800

D-VIP Frames					
Model	Stroke In. (mm)	Number of Cylinders	Nominal Rated Power hp (kW)	Max. Allowable Rod Load lbs. (kN)	Rated rpm
7D-VIP2	7 (177.8)	2	1800 (1342)	45,000 (200)	1000
7D-VIP4	7 (177.8)	4	3600 (2685)	45,000 (200)	1000
7D-VIP6	7 (177.8)	6	4800 (3580)	45,000 (200)	1000
6D-VIP2	6 (152.4)	2	1500 (1119)	45,000 (200)	1200
6D-VIP4	6 (152.4)	4	3000 (2237)	45,000 (200)	1200
6D-VIP6	6 (152.4)	6	4500 (3356)	45,000 (200)	1200
5D-VIP2	5 (127)	2	1875 (1398)	45,000 (200)	1500
5D-VIP4	5 (127)	4	3750 (2797)	45,000 (200)	1500
5D-VIP6	5 (127)	6	5625 (4195)	45,000 (200)	1500

HOS Frames					
Model	Stroke In. (mm)	Number of Cylinders	Nominal Rated Power hp (kW)	Max. Allowable Rod Load lbs. (kN)	Rated rpm
7HOS2	7 (177.8)	2	2200 (1641)	60,000 (267)	1000
7HOS4	7 (177.8)	4	4400 (3281)	60,000 (267)	1000
7HOS6	7 (177.8)	6	6600 (4921)	60,000 (267)	1000
6HOS2	6 (152.4)	2	2000 (1492)	60,000 (267)	1200
6HOS4	6 (152.4)	4	4000 (2983)	60,000 (267)	1200
6HOS6	6 (152.4)	6	6000 (4475)	60,000 (267)	1200
5HOS2	5 (127)	2	2400 (1790)	60,000 (267)	1500
5HOS4	5 (127)	4	4800 (3580)	60,000 (267)	1500
5HOS6	5 (127)	6	7200 (5370)	60,000 (267)	1500

HOSS Frames					
Model	Stroke In. (mm)	Number of Cylinders	Nominal Rated Power hp (kW)	Max. Allowable Rod Load lbs. (kN)	Rated rpm
7HOSS2	7 (177.8)	2	2800 (2088)	75,000 (337)	1000
7HOSS4	7 (177.8)	4	5600 (4176)	75,000 (337)	1000
7HOSS6	7 (177.8)	6	7800 (5816)	75,000 (337)	1000
6HOSS2	6 (152.4)	2	3100 (2312)	75,000 (337)	1200
6HOSS4	6 (152.4)	4	6200 (4623)	75,000 (337)	1200
6HOSS6	6 (152.4)	6	8700 (6488)	75,000 (337)	1200

BOS Frames					
Model	Stroke In. (mm)	Number of Cylinders	Nominal Rated Power hp (kW)	Max. Allowable Rod Load lbs. (kN)	Rated rpm
8.5 BOS 2	8.5 (215.9)	2	3650 (2722)	90,000 (400)	850
8.5 BOS 4	8.5 (215.9)	4	7300 (5444)	90,000 (400)	850
8.5 BOS 6	8.5 (215.9)	6	10,950 (8166)	90,000 (400)	850
7.25 BOS 2	7.25 (184.1)	2	3750 (2796)	90,000 (400)	1000
7.25 BOS 4	7.25 (184.1)	4	7500 (5593)	90,000 (400)	1000
7.25 BOS 6	7.25 (184.1)	6	11,250 (8389)	90,000 (400)	1000

## ANEXOS “B”: Ficha técnica Compresores ARIEL

### ARIEL CORPORATION JGC/JGD/JGF



	JGC			JGD			JGF		
Number of Throws	2	4	6	2	4	6	2	4	6
Rated Power (BHP)	2,070	4,140	6,210	2,070	4,140	6,210	2,070	4,140	6,210
Rated Power (kW)	1,544	3,087	4,631	1,544	3,087	4,631	1,544	3,087	4,631
Stroke (in)	6.5			5.5			5.0		
Stroke (mm)	165			140			127		
Maximum RPM	1,000			1,200			1,200	1,400	
Piston Speed (FPM)	1,083			1,100			1,000	1,167	
Piston Speed (m/s)	5.5			5.59			5.1	5.9	
Total Rod Load (lbs)	114,000								
Total Rod Load (kN)	507								
Rod Load Tension (lbs)	57,000								
Rod Load Tension (kN)	254								
Rod Load Compression (lbs)	60,000								
Rod Load Compression (kN)	267								
Rod Diameter (in)	2.5								
Rod Diameter (mm)	64								
Crankshaft Centerline, from bottom (in)	22								
Crankshaft Centerline, from bottom (mm)	559								

## ANEXOS “C”: Ficha técnica Compresores ARIEL



### ARIEL JGH and JGE COMPRESSORS

Frame	JGH/2	JGH/4	JGE/2	JGE/4	JGE/6
Number of throws	2	4	2	4	6
Rated Power, BHP	680	1360	1070	2140	3210
Rated Power, kW	507	1014	798	1596	2394
Stroke, inches	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Stroke, mm	114	114	114	114	114
RPM, maximum	1200	1200	1500	1500	1500
Piston speed, FPM	900	900	1125	1125	1125
Piston speed, m/s	4.57	4.57	5.72	5.72	5.72
Total Rod Load, lbs	48000	48000	60000	60000	60000
Total Rod Load, N	213515	213515	266893	266893	266893
Tension, lbs	24000	24000	30000	30000	30000
Tension, N	106757	106757	133447	133447	133447
Compression, lbs	30000	30000	32000	32000	32000
Compression, N	133447	133447	142343	142343	142343
Average Weight with cylinders, lbs	7000	14000	7000	14000	22000
Average Weight with cylinders, kg	3175	6350	3175	6350	9980
Maximum Length, inches	50	96	51	97	141
Maximum Length, mm	1270	2438	1295	2464	3581
Nominal Width, inches	139	139	139	139	139
Nominal Width, mm	3531	3531	3531	3531	3531
Crankshaft $\phi$ (from bottom), inches	17	17	17	17	17
Crankshaft $\phi$ (from bottom), mm	432	432	432	432	432

## ANEXOS “D”: Catalogo Motores Waukesha

### Waukesha\* Natural Gas Fueled Engines (Continuous Duty)

<b>275GL*+</b>				750 rpm	800 rpm	900 rpm	1000 rpm
Model	Disp.	Bore & Stroke	C.R.	bhp kWb	bhp kWb	bhp kWb	bhp kWb
16V275GL+ with ESM2	17,398 in <sup>3</sup> (285 L)	10.83 x 11.81" (275 x 300 mm)	9:1	3750 2796	4000 2983	4500 3356	5000 3729
12V275GL+ with ESM2	13,048 in <sup>3</sup> (213.9 L)	10.83 x 11.81" (275 x 300 mm)	9:1	2812 2097	3000 2237	3375 2517	3750 2796
16V275GL+ with ESM2, Fuel Flex	17,398 in <sup>3</sup> (285 L)	10.83 x 11.81" (275 x 300 mm)	8:1	3750 2796	4000 2983	4500 3356	5000 3729
12V275GL+ with ESM2, Fuel Flex	13,048 in <sup>3</sup> (213.9 L)	10.83 x 11.81" (275 x 300 mm)	8:1	2812 2097	3000 2237	3375 2517	3750 2796

<b>VHP*</b>				800 rpm	900 rpm	1000 rpm	1200 rpm
Model	Disp.	Bore & Stroke	C.R.	bhp kWb	bhp kWb	bhp kWb	bhp kWb
P9394GSI S5	9388 in <sup>3</sup> (153.9 L)	9.375 x 8.5" (238 x 216 mm)	9.7:1	-- --	1875 1398	2083 1554	2500 1864
L7044GSI S5			9.7:1	-- --	1425 1063	1583 1181	1900 1417
L7044GSI	7040 in <sup>3</sup> (115.4 L)	9.375 x 8.5" (238 x 216 mm)	8:1	1120 <sup>1</sup> 835 <sup>1</sup>	1260 <sup>1</sup> 940 <sup>1</sup>	1400 <sup>1</sup> 1044 <sup>1</sup>	1680 <sup>1</sup> 1253 <sup>1</sup>
L7042GSI S5			9.7:1	-- --	1125 839	1250 932	1500 1119
L7042GSI S4			8:1	987 <sup>1</sup> 736 <sup>1</sup>	1110 <sup>1</sup> 828 <sup>1</sup>	1233 <sup>1</sup> 920 <sup>1</sup>	1480 <sup>1</sup> 1104 <sup>1</sup>
L5794GSI			8.2:1	920 <sup>1</sup> 686 <sup>1</sup>	1035 <sup>1</sup> 772 <sup>1</sup>	1150 <sup>1</sup> 858 <sup>1</sup>	1380 <sup>1</sup> 1029 <sup>1</sup>
L5794LT	5788 in <sup>3</sup> (94.9 L)	8.5 x 8.5" (216 x 216 mm)	10.2:1	614 <sup>1</sup> 458 <sup>1</sup>	1005 <sup>1</sup> 749 <sup>1</sup>	1208 901	1450 1081
L5774LT			10.2:1	614 <sup>1</sup> 458 <sup>1</sup>	934 <sup>1</sup> 696 <sup>1</sup>	1067 795	1280 954
F3524GSI	3520 in <sup>3</sup> (57.7 L)	9.375 x 8.5" (238 x 216 mm)	8:1	560 <sup>1</sup> 418 <sup>1</sup>	630 <sup>1</sup> 470 <sup>1</sup>	700 <sup>1</sup> 522	840 <sup>1</sup> 628 <sup>1</sup>
F3514GSI			8:1	493 <sup>1</sup> 368 <sup>1</sup>	555 <sup>1</sup> 414 <sup>1</sup>	617 <sup>1</sup> 460 <sup>1</sup>	740 552 <sup>1</sup>

<b>VGF*</b>				1200 rpm	1400 rpm	1500 rpm	1600 rpm	1800 rpm
Model	Disp.	Bore & Stroke	C.R.	bhp kWb	bhp kWb	bhp kWb	bhp kWb	bhp kWb
P48GSI/GSID			8.6:1	-- --	830 620	885 660	945 705	1065 800
P48GL/GLD	2924 in <sup>3</sup> (48 L)	5.98 x 6.5" (152 x 165 mm)	11:1	710 <sup>1</sup> 530 <sup>1</sup>	830 <sup>1</sup> 620 <sup>1</sup>	885 <sup>1</sup> 660 <sup>1</sup>	945 <sup>1</sup> 705 <sup>1</sup>	1065 <sup>1</sup> 800 <sup>1</sup>
P48GL			8.7:1	-- --	830 620	885 660	945 705	1065 800
P48GL/GLD			11:1	-- --	910 <sup>1</sup> 680 <sup>1</sup>	975 <sup>1</sup> 730 <sup>1</sup>	1040 <sup>1</sup> 775 <sup>1</sup>	1175 <sup>1</sup> 880 <sup>1</sup>
L36GSI/GSID			8.6:1	-- --	620 460	670 500	710 530	800 600
L36GL/GLD	2193 in <sup>3</sup> (36 L)	5.98 x 6.5" (152 x 165 mm)	11:1	-- --	620 460	670 500	710 530	800 600
L36GL			8.7:1	-- --	620 460	670 500	710 530	800 600
L36GL/GLD			11:1	-- --	685 <sup>1</sup> 510 <sup>1</sup>	735 <sup>1</sup> 550 <sup>1</sup>	780 <sup>1</sup> 580 <sup>1</sup>	880 <sup>1</sup> 660 <sup>1</sup>
H24SE			8.6:1	-- --	415 310	445 330	475 355	530 400
H24GL/GLD	1462 in <sup>3</sup> (24 L)	5.98 x 6.5" (152 x 165 mm)	11:1	355 <sup>1</sup> 265 <sup>1</sup>	415 <sup>1</sup> 310 <sup>1</sup>	445 <sup>1</sup> 330 <sup>1</sup>	475 <sup>1</sup> 355 <sup>1</sup>	530 <sup>1</sup> 400 <sup>1</sup>
H24GL			8.7:1	-- --	415 310	445 330	475 355	530 400
H24GL/GLD			11:1	-- --	455 <sup>1</sup> 340 <sup>1</sup>	490 <sup>1</sup> 365 <sup>1</sup>	520 <sup>1</sup> 390 <sup>1</sup>	585 <sup>1</sup> 440 <sup>1</sup>
F18SE			8.6:1	-- --	310 230	335 250	355 265	400 300
F18GL/GLD	1096 in <sup>3</sup> (18 L)	5.98 x 6.5" (152 x 165 mm)	11:1	-- --	310 230	335 250	355 265	400 300
F18GL			8.7:1	-- --	310 230	335 250	355 265	400 300
F18GL/GLD			11:1	-- --	340 <sup>1</sup> 255 <sup>1</sup>	365 <sup>1</sup> 275 <sup>1</sup>	390 <sup>1</sup> 290 <sup>1</sup>	440 <sup>1</sup> 330 <sup>1</sup>
F18G			11:1	160 119	185 138	200 149	215 160	240 179

Notes:  
 \* All ratings are at an intercooler water temperature of 130°F (54.4°C).  
 \* L115 available on L5794LT engine for power generation applications only.

# ANEXOS "E": Tabla de propiedades del gas

Number	Compound	Formula	A Molar Mass (Molecular Weight)	B Boiling Point, °F @ 14.696 psia	C Vapor Pressure, psia, 100 °F	D Freezing Point, °F @ 14.696 psia(1atm)	E Refractive Index (n <sub>D</sub> 20 °F)	Critical Constants			Number
								Pressure, psia (atm)	Temperature, °F	Volume, ft <sup>3</sup> /lb	
1	Methane	CH <sub>4</sub>	16.042	-258.67	(5000) <sup>a</sup>	-286.45	1.00043	667.0	-116.63	0.0985	1
2	Ethane	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.069	-127.46	(800) <sup>b</sup>	-97.04	1.21341	706.6	89.30	0.0775	2
3	Propane	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.096	-42.72	188.7	-35.73	1.29506	615.5	205.50	0.0728	3
4	Isobutane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.122	11.08	72.44	-26.30	1.32469	527.9	274.41	0.0715	4
5	n-Butane	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58.122	31.09	51.68	-27.05	1.33593	550.9	305.55	0.0703	5
6	Isopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.149	82.11	20.46	-55.80	1.35626	490.4	369.8	0.0685	6
7	n-Pentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.149	96.98	15.78	-51.50	1.35993	488.8	385.8	0.0676	7
8	Neopentane	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72.149	49.12	36.70	1.17	1.34167	483.5	321.8	0.0680	8
9	n-Hexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.175	155.72	4.961	-99.56	1.37717	436.9	453.2	0.0668	9
10	2-Methylpentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.175	140.44	6.773	-84.60	1.37387	436.6	435.8	0.0682	10
11	3-Methylpentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.175	145.84	6.103	-81.20	1.37088	432.5	448.3	0.0682	11
12	Neohexane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.175	121.49	9.855	-67.59	1.37126	446.7	420.8	0.0667	12
13	2,3-Dimethylpentane	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86.175	136.34	7.410	-69.35	1.37730	454.0	440.2	0.0665	13
14	n-Heptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.202	209.13	1.6203	-101.01	1.39967	395.8	512.9	0.0662	14
15	2-Methylhexane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.202	194.05	2.273	-80.87	1.38717	396.0	494.3	0.0673	15
16	3-Methylhexane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.202	197.33	2.130	-	1.39091	407.8	503.7	0.0648	16
17	3-Ethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.202	200.25	2.012	-81.44	1.39568	419.2	513.2	0.0665	17
18	2,2-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.202	174.50	3.494	-60.80	1.38447	401.8	477.7	0.0665	18
19	2,3-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.202	179.82	3.221	-62.83	1.38940	397.1	470.8	0.0667	19
20	3,3-Dimethylpentane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.202	186.87	2.775	-59.99	1.39314	427.9	505.7	0.0662	20
21	Triptane	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100.202	177.54	3.376	-2.21	1.39167	427.9	496.3	0.0658	21
22	n-Octane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.229	258.21	0.5366	-70.17	1.39962	360.7	584.2	0.0673	22
23	Diisobutyl	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.229	228.39	1.102	-52.09	1.39481	361.1	530.3	0.0678	23
24	Isocane	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114.229	210.82	1.709	-51.23	1.38065	372.7	519.4	0.0655	24
25	n-Nonane	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub>	128.255	303.40	0.17003	-44.28	1.40747	330.7	610.8	0.0660	25
26	n-Decane	C <sub>10</sub> H <sub>22</sub>	142.282	345.40	0.06190	-11.39	1.41388	304.8	652.2	0.0700	26
27	Cyclopentane	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.133	120.61	9.917	-96.96	1.40896	653.8	481.2	0.0694	27
28	Methylcyclopentane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.159	161.29	4.491	-24.38	1.41210	548.8	499.4	0.0607	28
29	Cyclohexane	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	84.159	177.40	3.267	4.03	1.42863	580.7	536.6	0.0585	29
30	Methylcyclohexane	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>	98.185	213.69	1.609	-95.81	1.42534	503.4	570.3	0.0600	30
31	Ethene(Ethylene)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28.053	-154.72	-	-252.50	1.24100	731.0	48.5	0.0744	31
32	Propene(Propylene)	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	42.080	-53.85	227.9	-91.47	1.31258	676.6	198.4	0.0717	32
33	1-Butene(Butylene)	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.106	20.79	62.07	-31.55	1.35056	588.4	296.2	0.0680	33
34	cis-2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.106	16.70	45.91	-39.70	1.34688	615.4	324.7	0.0687	34
35	trans-2-Butene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.106	33.59	49.84	-58.00	1.35067	574.9	311.8	0.0679	35
36	Isobutene	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	56.106	19.56	63.17	-20.61	1.35390	580.2	292.4	0.0681	36
37	1-Pentene	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub>	70.133	85.93	19.12	-26.40	1.37426	509.5	376.9	0.0674	37
38	1,2-Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.090	51.14	37.23	-23.14	-	655.6	354.3	0.0698	38
39	1,3-Butadiene	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub>	54.090	23.85	59.46	-14.05	-	620.3	305.4	0.0654	39
40	Isoprene	C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	68.117	93.30	16.68	-20.71	1.42498	581.6	402.9	0.0665	40
41	Acetylene	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26.037	-118.87	-	-83.44	-	850.4	95.3	0.0688	41
42	Benzene	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78.114	176.10	3.282	-1.60	1.50390	710.4	552.2	0.0531	42
43	Toluene	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>	92.138	231.10	1.0322	-98.89	1.49946	695.5	605.6	0.0549	43
44	Ethylbenzene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.165	277.09	0.3705	-98.93	1.49827	623.0	651.3	0.0564	44
45	o-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.165	291.96	0.2632	-3.30	1.50767	541.8	674.9	0.0557	45
46	m-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.165	282.35	0.3291	-14.12	1.49951	512.9	651.8	0.0567	46
47	p-Xylene	C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>	106.165	290.99	0.3422	5.86	1.49810	509.2	649.5	0.0572	47
48	Styrene	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104.149	293.47	0.2467	-23.15	1.54937	687.8	703.8	0.0534	48
49	Isopropylbenzene	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub>	120.192	306.27	0.1884	-10.81	1.49072	465.4	676.3	0.0568	49
50	Methyl alcohol	CH <sub>3</sub> O	32.042	148.17	4.631	-93.79	1.33012	1174	463.	0.0590	50
51	Ethyl alcohol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	46.069	172.81	2.313	-173.28	1.36309	891.7	465.4	0.0581	51
52	Carbon monoxide	CO	28.010	-312.73	-	-37.04	1.00036	596.7	-220.63	0.0527	52
53	Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	44.010	-109.12	-	-69.81	1.00048	1070.0	87.79	0.0343	53
54	Hydrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	34.082	-76.52	395.5	-111.81	1.00060	1306.5	212.81	0.0482	54
55	Sulfur dioxide	SO <sub>2</sub>	64.065	14.04	85.31	-103.81	1.00062	1143	316.48	0.0305	55
56	Ammonia	NH <sub>3</sub>	17.0306	-27.99	212.0	-107.77	1.00036	1644	270.	0.0712	56
57	Air		28.9634	-317.64	-	-	1.00020	551.9	820.67	0.0469	57
58	Hydrogen	H <sub>2</sub>	2.0159	-422.97	-	-464.55	1.00013	190.7	-399.3	0.5319	58
59	Oxygen	O <sub>2</sub>	31.9988	-297.332	-	-311.82	1.00027	731.4	-181.43	0.0367	59
60	Nitrogen	N <sub>2</sub>	28.0135	-320.431	-	-346.00	1.00028	492.5	-232.63	0.0511	60
61	Chlorine	Cl <sub>2</sub>	70.9054	-29.25	157.3	-119.73	1.38729	1117	290.93	0.0289	61
62	Water	H <sub>2</sub> O	18.0153	211.953	0.95051	32.00	1.33342	3200.1	705.30	0.04973	62
63	Helium	He	4.0026	-452.06	-	-467.75	1.00003	33.0	-450.22	0.2300	63
64	Hydrogen chloride	HCl	36.4608	-121.00	921	-103.52	1.00042	1205	124.70	0.0354	64

## ANEXOS "F": Solicitud de Información



Santa Cruz, 07 de diciembre de 2023  
YFPBTR.GOP.GSTG.15.2023

Señora:  
Univ. Josefín Mireya Arancibia E.  
UNIVERSIDAD MAYOR REAL Y PONTIFICIA DE SAN FRANCISCO XAVIER DE CHUQUISACA  
Sucre.-

Ref.: SU SOLICITUD DE INFORMACIÓN PARA MONOGRAFÍA

De nuestra consideración:

En atención a su nota de "Solicitud de Información", para monografía en el Diplomado "Transporte, Almacenamiento y Distribución de Hidrocarburos" comunicamos lo siguiente:

La Estación Navillero, es una Estación que forma parte del Sistema GTC, cuya función principal es la compresión de Gas Natural y provisión del energético a los departamentos de Cochabamba, Chuquisaca y Potosí.

Cuenta con todas las facilidades para el cumplimiento de sus objetivos operativos como ser:

- Presión Máxima de Operación (MAOP) de 1220 psi
- Unidad de compresión con capacidad de 22.5 MMpcd
- Sala de control
- Infraestructuras
- Sistema de ductos, etc.,

Características de la Unidad de Compresión:

ITEM	MOTOR	COMPRESOR
MARCA	Waukesha	Ariel
MODELO	L5794 GSI	JGD/2
POTENCIA	1380 HP	-
N°	-	2 cilindros; Stroke 6 1/2 in.
CILINDROS		

Como referencia para su análisis de la inspección de las juntas de soldadura del Tramo Navillero – Tapirani, adjuntamos los reportes de inspección de soldadura por ultrasonido de las mismas.

Deseándole mucho éxito, saludamos a usted atentamente.

  
Carlos Caballero M.  
Gerente Sectorial de Transporte de Gasoductos

  
A. J. J. J. J.  
Gerente Operativo

E.E.: GOP - Almirante/Estacionero  
Adj. Reportes indicados.

| 200 AÑO DE LA JUVENTUD HACIA EL BICENTENARIO

Doble Vía La Guardia Km. 7 1/2 • Casilla 3137 • Telf. (591-3) 3566000 • Fax: (591-3) 3566069  
Telf. Emergencias 800-10-4005 • Santa Cruz - Bolivia • www.ypftransporte.com.bo