



# **Rediseño del sistema de lubricación forzada de un compresor reciprocante de gas natural**

**Alfredo Sarmiento Ortega  
David Ramirez González**

Universidad Antonio Nariño  
Programa Ingeniería Electromecánica  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Puerto Colombia, Colombia

2021



# **Rediseño del sistema de lubricación forzada de un compresor reciprocante de gas natural**

**Alfredo Sarmiento Ortega  
David Ramirez González**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Electromecánico**

Director (a):  
M.Sc. Jonathan Fábregas Villegas

Línea de Investigación:  
Desarrollo Tecnológico.  
Grupo de Investigación:  
GI FOURIER

Universidad Antonio Nariño  
Programa Ingeniería Electromecánica  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Ciudad, Colombia  
2021



## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

\_\_\_\_\_.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_

Firma del Tutor

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

Puerto Colombia, Día Mes Año.

*(Dedicatoria)*

*A mis padres, mi esposa y mis hijas, por esa voz de aliento, por todo el apoyo que me brindaron durante todo este tiempo. Fueron muchos sacrificios los que se hicieron para poder sacar adelante mis estudios.*

*“La educación es el arma más poderosa que puedes usar para cambiar el mundo”*

*Nelson Mandela*

*Alfredo Sarmiento Ortega*

## Contenido

	Pág.
Resumen.....	14
Abstract.....	15
INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.....	16
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	19
2. JUSTIFICACIÓN.....	21
3. OBJETIVOS. ....	22
3.1. Objetivo General.....	22
3.2. Objetivos Específicos .....	22
4. Metodologia .....	24
4.1. Tipo de metodologia.....	26
4.2. Plan de accion.....	27
5. Marco referencial.....	28
5.1. Conceptos basicos de lubricacion .....	29
5.2. Motores de combustion interna y sistemas de lubricacion.....	32
5.3. Compresores y sistemas de lubricación.....	32
6. Desarrollo y resultados para los objetivos especificos .....	434

<b>6.1. Caracterizar el actual sistema de lubricación.....</b>	<b>42</b>
<b>6.2. Rediseño del sistema de lubricación del conjunto.....</b>	<b>56</b>
<b>6.3. Análisis monetario del rediseño.....</b>	<b>60</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>63</b>
<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>80</b>



## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 5. 1. Lubricación limite .....	30
Figura 5. 2. Espesores de lubricación hidrodinámica. ....	31
Figura 5. 3. Lubricación Elastohidrodinámica (EHL) .....	32
Figura 5. 4. Tipos de compresores existentes. ....	34
Figura 5. 5. Compresor Reciprocante tipo HOS, marca Dresser-Rand .....	36
Figura 5. 6. Compresor reciprocante de doble efecto .....	36
Figura 5. 7. Compresor reciprocante para gas natural. ....	38
Figura 5. 8. Vista en corte de un motor alternativo de combustión. ....	40
Figura 6. 1. Motor operando con gas natural del conjunto en estudio.....	42
Figura 6. 2. Compresor para gas natural tipo reciprocante marca Dresser Rand.....	43
Figura 6. 3. Sistema de lubricación estándar de un compresor reciprocante.....	45
Figura 6. 4. Diagrama lubricación forzada al cabezal de gas natural. ....	47
Figura 6. 5. Esquema de distribución lubricación forzada.....	48
Figura 6. 6. Bombas lubricadoras. ....	49
Figura 6. 7. Esquema del bloque lubricador .....	50
Figura 6. 8. Interruptor de flujo de aceite (DNFT). ....	50
Figura 6. 9. Interruptor de flujo. ....	51
Figura 6. 10. Filtro de aceite .....	51
Figura 6. 11. Válvula de alivio automático.....	52
Figura 6. 12. Disco de ruptura. ....	52
Figura 6. 13. Bloque de distribución.....	53
Figura 6. 14. Válvulas de retención .....	53
Figura 6. 15. Manómetro .....	54
Figura 6. 16. esquema del sistema de reposición actual de aceite. ....	57
Figura 6. 17. Rediseño propuesto. ....	58
Figura 6. 18. Base para filtro de aceite a implementar. ....	60
Figura 6. 19. Filtro de aceite. ....	60

Figura 6. 20. Reservorio de Aceite. ....	63
Figura 6. 21. Control de nivel de la unidad compresora. ....	64
Figura 6. 22. Control de nivel para el motor estacionario. ....	64
Figura 6. 23. Sistema rediseñado para ser modelado. ....	65
Figura 6. 24. Balance de masa del tanque de reservorio. ....	67
Figura 6. 25. Balance de masa del carter del motor. ....	67
Figura 6. 26. Balance de masa del carter del compresor. ....	68
Figura 6. 27. Balance de masa de la bomba de lubricación forzada. ....	69
Figura 6. 28. Sistema completo de modelamiento de bloques del sistema. ....	69
Figura 6. 29. Caudal de lubricación forzada. ....	70
Figura 6. 30. Llenado de carter del motor. ....	70
Figura 6. 31. Llenado del carter del compresor. ....	71
Figura 6. 32. Equilibrio de caudales en el sistema en continuo. ....	71

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 5. 1. Usos de Compresores Reciprocantes .....	37
Tabla 6. 1. Datos del compresor recíprocante de gas natural Dresser Rand.....	44
Tabla 6. 2. Cuadro de gotas de alimentación de aceite por minuto (dpm) totales al cilindro. .....	55

## Resumen

La lubricación forzada en un compresor de tipo alternativo que trasiega gas natural, consiste en inyectar aceite a los cilindros, con una presión mayor a la del gas que está siendo comprimido, con el fin de lubricar la camisa, el pistón y los anillos, para así garantizar su integridad y vida útil esperada. El proyecto, tiene como fin, minimizar el consumo de aceite para la lubricación forzada de los cilindros de los compresores reciprocantes, dado que el costo anual operativo excede el presupuesto asignado por planeación. Esto se logra realizando un rediseño en el sistema de lubricación, el cual consiste en modificar el suministro de aceite de reposición al grupo motor – compresor existente, y así disminuir a la mitad los cambios programados de aceite en el motor que opera con gas natural, logrando un ahorro económico anual de 24 millones de pesos cop. El rediseño propuesto implica además la instalación de un sistema de filtración adicional para retirar del aceite partículas e impurezas, garantizando un ingreso en óptimas condiciones a los cilindros del compresor, haciendo la lubricación adecuada, evitando daños prematuros en las camisas y pistones, con lo que se espera como beneficio adicional una vida útil mayor de los componentes lubricados y menores costos de reparación, una vez cumplidas las horas de servicio determinadas. La propuesta logra, además, disminuir el impacto ambiental negativo, al reducir las emisiones de aceite degradado por el uso operativo y reducir el riesgo de los lubricadores, al minimizar el número de cambios de aceite, que implica manipular barriles con peso alrededor de los 200 kg.

Palabras clave: Lubricación, aceite, compresor, reciprocante, gas natural.

## Abstract

Forced lubrication in a reciprocating compressor that transfers natural gas, consists of injecting oil into the cylinders, with a pressure greater than that of the gas being compressed, in order to lubricate the liner, piston and rings, to thus guaranteeing its integrity and expected useful life. The purpose of the project is to minimize oil consumption for forced lubrication of reciprocating compressor cylinders, given that the annual operating cost exceeds the budget assigned by planning. This is achieved by carrying out a redesign in the lubrication system, which consists of modifying the supply of replacement oil to the engine-compressor group, and thus reducing scheduled engine oil changes by half, achieving annual economic savings of 24 million pesos cop. The proposed redesign also implies the installation of an additional filtration system to remove particles and impurities from the oil, guaranteeing an entry in optimal conditions to the cylinders, making adequate lubrication, avoiding premature damage to the liners and pistons, with which it is expected as an added benefit a longer service life of the lubricated components. The proposal also manages to reduce the negative environmental impact, by reducing emissions of oil degraded by operational use and reducing the risk of lubricators, by minimizing the number of oil changes, which implies handling barrels weighing around 200 kg .

Keywords: Lubrication, oil, compressor, reciprocating, natural gas.

## INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En países como España, Chile, Perú y Colombia, han desarrollado investigaciones relacionadas con la lubricación de máquinas, uso de tecnologías como análisis de aceites y mantenimiento de sistemas de lubricación, entre otras. (Guillén, 2007). En su estudio sobre el aceite usado en la agroindustria en Guatemala, resalta la importancia del rendimiento de los aceites en el sistema de lubricación, teniendo en cuenta las especificaciones de los equipos y las características de los aceites y la posibilidad de alargar su vida útil, lo que traería como beneficio un ahorro económico.

Por otra parte, destaca también que muchas veces la relevancia de este tipo de análisis no es lo económico, sino también conocer como están los componentes, sistema de lubricación del equipo o la calidad del lubricante. (Perico et al., 2020), considera que el análisis de aceites lubricantes usados es una técnica muy eficaz para determinar futuras fallas de los componentes evitando reparaciones y pérdidas de tiempo. Mientras que (Corrales & Lema, 2015) afirman que, en una mala reposición de aceite, un mal procedimiento al momento de hacer reposición puede hacer que en varios puntos de la maquina no se lubriquen generando problemas en el funcionamiento.

En Colombia se han diseñado sistemas de lubricación, como el elaborado por (Ruiz & Esquivel, 2019) donde optimizaron el funcionamiento operativo en servicio de los equipos de bombeo, a partir de la implementación de un sistema autónomo de lubricación. En otros estudios como los de (Mimbela, 2019) se demostró la importancia en los sistemas de lubricación y del uso de técnicas como lubricación por niebla de aceite para equipos de bajas

velocidades que operan con grasas, así como para equipos que operan con aceite a altas velocidades.

También se ha implementado mejoras en sistemas de lubricación de máquinas en empresas textiles y otros estudios en sectores productores industriales y agroindustriales, sin embargo, el sector Oil & gas ha sido investigado muy poco, ya que no se encuentran registros de investigaciones relacionadas con el sector y sus sistemas de lubricación de maquinaria y equipos.

La industria del gas natural para llevar este producto al consumidor final, sea industrial, comercial, residencial o vehicular, utiliza sistemas de tuberías. Como elemento impulsor del flujo del gas natural, se utilizan compresores alternativos y del tipo tornillos gemelos inundados de aceite. En todo caso, estos compresores requieren un sistema de lubricación especial para controlar la fricción, utilizando aceites que en operación normal se consumen durante la operación, dado que el aceite está en contacto con el flujo de gas y debe aplicarse algún medio de reposición para asegurar la permanencia del lubricante en el sitio o área donde es requerido. Esta reposición de aceite debe controlarse dado que un consumo excesivo implica un costo operativo excesivo e incluso en caso de descuidos, la reducción del nivel de aceite por el consumo normal pone en riesgo de graves daños a piezas costosas en estos equipos. En el caso del presente proyecto, se tiene en operación 6 compresores de gas natural que operan consumiendo aceite de manera excesiva lo que lleva a costos inadmisibles. Por ello, se requiere un rediseño del sistema de lubricación para asegurar el correcto nivel y la tasa de reposición correcta que controle el consumo de aceite para asegurar la permanencia de la lubricación y un consumo necesario pero controlado.

El objetivo general del proyecto es rediseñar el sistema de lubricación forzada para un compresor de gas natural, con el propósito de lograr extender los cambios de aceite a 4 motores de combustión interna tipo gas natural que impulsa a igual número de compresores alternativos que trasiegan gas natural, para reducir costos, recursos logísticos y disminuir la contaminación ambiental por el cambio de aceite.

Para el análisis de la situación a resolver, el trabajo se organiza así. En el capítulo 1 se describe el problema, sistematizando la formulación para propósitos de claridad. En el capítulo 2 se expresa la justificación haciendo énfasis en los beneficios técnicos y económicos obtenidos con el rediseño. En el capítulo 3 se presentan los objetivos del proyecto. En el capítulo 4 se muestra la metodología del proyecto, definiendo el tipo de investigación y el plan de acción necesario para el logro de los objetivos específicos. En el capítulo 5 se define el marco referencial del proyecto, haciendo énfasis en los compresores reciprocantes. En el capítulo 6 se desarrollan los objetivos específicos y los resultados obtenidos. Finalmente se expresan las conclusiones, recomendaciones y anexos del trabajo.



## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para la industria del gas natural que se encarga de la distribución de este combustible, los compresores constituyen un componente fundamental. Este, al mover el gas natural y requerir aceite para la necesaria lubricación, consume el aceite que se ubica en su depósito del compresor o Carter. En el caso del proyecto, se tienen 4 compresores de tipo alternativo que, al operar bajo los parámetros operativos definidos por el fabricante, en concreto a una presión de 830 psig, consume 3.5 galones de aceite Mobil Pegasus 805 al día por compresor. A su vez, cada compresor se impulsa con un motor a gas natural que dado el uso también de manera normal consume alguna cantidad del mismo tipo de aceite. El aceite de reposición para el motor a gas y el compresor, se suple con un sistema automático de llenado. Este sistema posee un depósito con una capacidad de aceite de 4 tambores o barriles de aceite (cada tambor equivale a 42 galones o 159 litros), que suministra el aceite que consume el compresor y el motor a gas que lo impulsa, disponiendo el sistema de reposición de sensores de nivel en el compresor y el motor propulsor para controlar los niveles correctos.

El consumo de aceite de los 4 compresores es de 14 galones al día de 24 horas, por lo que el depósito de reposición con 168 (42\*4) galones, dura en operación 12 días (168/14). Este aceite que se consume cada 12 días, teniendo en cuenta que a la fecha cada barril tiene un costo de 3.330.000 (tres millones trescientos mil pesos colombianos, m/l), representa el costo del aceite de reposición de 33 millones por mes o 396 millones al año. Esto incluye el aceite de reposición del compresor, cada uno de los cuáles operan normalmente.

Por parte del motor propulsor del compresor. El aceite del cárter se cambia cada 5000 horas o 6 meses lo que ocurra primero, representando 2 cambios al año por motor u 8 cambios de aceite para el grupo. Esto, según recomendaciones del fabricante. Cada motor requiere de 2 tambores por cambio, por lo que el grupo consume 16 barriles al año con un costo de 52.800.000.

El costo anual normal por aceite al año, asciende a \$ 448.800.000 c.o.p. dada esta alta cifra para el consumo de aceite al año, la gerencia requiere reducir este consumo y su

correspondiente cifra económica. Los autores inmersos en esta situación, vislumbran una propuesta de mejora mediante aplicar modificaciones al actual sistema de lubricación, que no afecte el desempeño del grupo motor – compresor, pero que reduzca la cantidad de aceite consumido. Esta propuesta de mejora para reducir el consumo anual de aceite en el grupo, es el origen del presente proyecto.

### **1.1. Formulación del problema.**

La pregunta a resolver es ¿Cómo asegurar técnicamente reducir el consumo de aceite y el costo correspondiente sin afectar los parámetros de operación del grupo motor – compresor?

Los interrogantes derivados son

- ¿Cuál es la estructura técnica actual del sistema de lubricación del conjunto motor - compresor?
- ¿Qué cambios se deben aplicar al actual sistema de lubricación para reducir la cantidad anual de aceite consumido, sin afectar los parámetros normales de operación del grupo motor-compresor?
- ¿Cuál es el costo estimado del rediseño para el actual sistema de lubricación y su factibilidad económica?

## 2. JUSTIFICACIÓN.

Los beneficios identificados con el desarrollo del proyecto son:

A nivel ambiental. Si se reduce la cantidad de aceite consumido se reduce la cantidad de aceite contaminado que se desecha y el correspondiente impacto ambiental negativo.

A nivel empresarial operativo. Los cambios de aceite implican manejar tambores que pesan alrededor de 220 kg son engorrosos de manejar corporalmente durante los cambios de aceite. Por esto, en la medida que puedan reducirse la cantidad de cambios de aceite, se reducen las horas -hombre correspondiente, reduciendo el tiempo y el riesgo a que se exponen los lubricadores del área. Esto también libera tiempo para realizar labores complementarias y productivas.

A nivel empresarial gerencial. Al reducir la cantidad de cambios de aceite y el costo correspondiente, se liberan recursos monetarios útiles para cualquier empresa, dado que se mejora su fluidez monetaria.

### 3. OBJETIVOS.

#### 3.1. Objetivo General

Rediseñar el sistema de lubricación forzada de un compresor recíprocante de gas natural para minimizar los costos operativos.

#### 3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar el sistema de lubricación del conjunto motor - compresor recíprocante para analizar su estructura y parámetros operativos.
- Desarrollar las fases de diseño conceptual, básico y de detalle en el sistema de lubricación del conjunto motor – compresor para reducir el consumo de aceite.
- Estimar el costo de las modificaciones a realizar al sistema de lubricación y evaluar el comportamiento a través de herramientas computacionales.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Tipo de metodología

La metodología aplicada es de tipo descriptiva – explicativa. De una parte, se describe la estructura de los sistemas de lubricación del conjunto motor – compresor, para identificar y entender sus funciones. De otro modo, se realizan modificaciones que deben explicarse para comprender que el nuevo funcionamiento no afecta los parámetros operativos del conjunto motor – compresor, soportado en algún modelo de cálculo apropiado, que entrega cifras verificables y factibles técnicamente.

### 4.2. Plan de acción.

El plan de acción propuesto se divide en tres fases, cada una correspondiendo a un objetivo específico, en el orden lógico y secuencial que se han planteado.

Fase 1.

Objetivo 1. Caracterizar el sistema de lubricación del conjunto motor - compresor reciprocante para analizar su estructura y parámetros operativos.

Las actividades que se definen para este objetivo son:

- Realización de búsqueda bibliográfica en catálogos, revistas y libros, sobre el tema de los sistemas de lubricación en motores y compresores.

- Identificación de componentes y correspondientes funciones y características técnicas dentro de la estructura de motor y compresor.
- Definición de parámetros operativos para los sistemas de lubricación en estudio, observando instrumentos y sistemas de medición de variables físicas de operación, como; temperaturas, presiones, velocidades y otras.

#### Fase 2.

- Objetivo 2. Desarrollar las fases de diseño conceptual, básico y de detalle en el sistema de lubricación del conjunto motor – compresor para reducir el consumo de aceite.

Las actividades correspondientes, son:

- Definición y justificación de las modificaciones a aplicar al sistema actual de lubricación, realizando un esquema de la estructura modificada.
- Determinación de la naturaleza de los componentes físicos, precisando su función en el sistema de lubricación modificado.
- Calcular las características de los nuevos componentes y selección de las partes comerciales correspondientes,
- Elaborar la lista de partes del sistema de lubricación propuesta.

#### Fase 3.

- Objetivo 3. Estimar el costo de las modificaciones a realizar al sistema de lubricación para evaluar sus ventajas económicas.

Las actividades definidas, son:

- Visitar almacén de partes mecánicas, eléctricas y otras, estableciendo valores unitarios, cantidades y comprobación de características técnicas correctas.
- Organización de los datos desarrollados sobre precios de las partes y consolidado del costo global estimado.
- Evaluación de los ahorros económicos del rediseño propuesto y estimación de las mejoras alcanzadas.

## 5. MARCO REFERENCIAL

### 5.1. Conceptos básicos de lubricación.

Las máquinas motoras y generadoras, al transmitir potencia mecánica transmiten fuerzas y movimientos relativos entre las partes. Esto aunado al efecto inevitable de la fricción, generan calor, altas temperaturas, ruidos, vibraciones, los cuales de no controlarse causan desgaste acelerado, golpes y bajo rendimiento operacional. Las piezas en movimiento relativo poseen superficies con algún grado de irregularidad o rugosidad, esto se visualiza como crestas y valles con algún perfil, que durante el movimiento relativo requiere interponer una película fluida, normalmente líquida que separe las superficies metálicas, logrando reducir la fricción de sólida a fluida donde es mucho menor el coeficiente friccional, reduciendo las pérdidas de potencia, el incremento de temperatura y teóricamente controlando el desgaste si se logra que las crestas no se interfieran durante el movimiento relativo, asegurando máxima vida útil de las piezas sólidas del equipo. El sistema que permite hacer llegar la sustancia lubricante al lugar requerido es lo que se denomina sistema de lubricación. Si se utiliza algún tipo de bomba para impulsar el fluido lubricante, se dice que la lubricación es forzada. La lubricación industrial es un proceso dentro de la gestión de mantenimiento que da lugar a la revisión de cierto número de indicadores para el correcto control del sistema mecánico.

Los aceites lubricantes cumplen un papel fundamental en la conservación y buen funcionamiento de la maquinaria, debido a que sus componentes están sujetos al deterioro, debido a la fricción y las cargas a las que son sometidos. (Nieto et al., 1985).

Los equipos que se utilizan en la industria no podrían funcionar, sin una adecuada lubricación. La correcta utilización de los lubricantes garantiza el buen funcionamiento de la maquinaria y le brinda los siguientes beneficios:

1. Reduce el desgaste por fricción.
2. Disminuye los costos de mantenimiento.
3. Ahorro de energía.
4. Disminución de los niveles de ruido.
5. Menor número de paros por mantenimiento.

Elementos que requieren lubricación:

Los elementos que requieren ser lubricados en una maquina son:

1. Cojinetes simples y antifricción, guías, levas, etc.
2. Engranajes rectos, helicoidales, sin fin, etc.,
3. Cilindros de compresores, bombas y motores de combustión interna.
4. Cadenas, acoples flexibles y cables.



Factores que afectan la correcta lubricación.

El desempeño de un lubricante se puede ver afectado por distintos factores. Los principales son:

- Operación de equipo:
  - a. La carga.
  - b. La temperatura.
  - c. La velocidad.
  - d. Contaminantes.
  
- Diseño del equipo:
  - a. Materiales de los componentes.
  - b. Textura y acabado de las superficies.
  - c. Construcción.
  - d. Aplicación del lubricante.

Tipos de lubricantes

Los lubricantes los podemos definir según su tipo por el estado físico en el que se encuentran y según su forma de aplicación:

Por el estado físico

- Solido

- Gaseoso
- Líquido
- Semisólido

Por su forma de aplicación.

- Lubricación de película completa
- Lubricación marginal o de película mixta
- Lubricación seca
- Lubricación por circulación forzada
- Lubricación por barboteo
- Lubricación por gravedad

Equipos utilizados a bordo y su lubricación

- Lubricación de motores a gas
- Lubricación de cilindros
- Lubricación por circulación forzada en motores a gas
- Lubricación de equipos auxiliares
- Equipos auxiliares de la sala de máquinas
- Motores generadores
- Motores eléctricos
- Reductores de engranajes
- Bombas

- Compresores de aire
- Compresores frigoríficos
- Descansos intermediarios
- Rodamientos
- Equipos auxiliares de cubierta
- Equipos para manejo de carga
- Sistemas hidráulicos

#### Tipos de lubricación

- **Lubricación Límite:** Se forma una película (capa) del fluido entre las superficies que se adhiere a las superficies metálicas evitando la fricción y el desgaste adhesivo. La lubricación límite se da siempre que un mecanismo arranque o para. En estas condiciones el espesor de la película no es para impedir el contacto de las crestas y ocurre un cierto desgaste inevitable pero paulatino. El ejemplo clásico son los bujes de los motores de arranque. La figura 5.1, ilustra el concepto.

Figura 5. 1. Lubricación limite



Fuente: (Ramón & Aguillón, 2015)

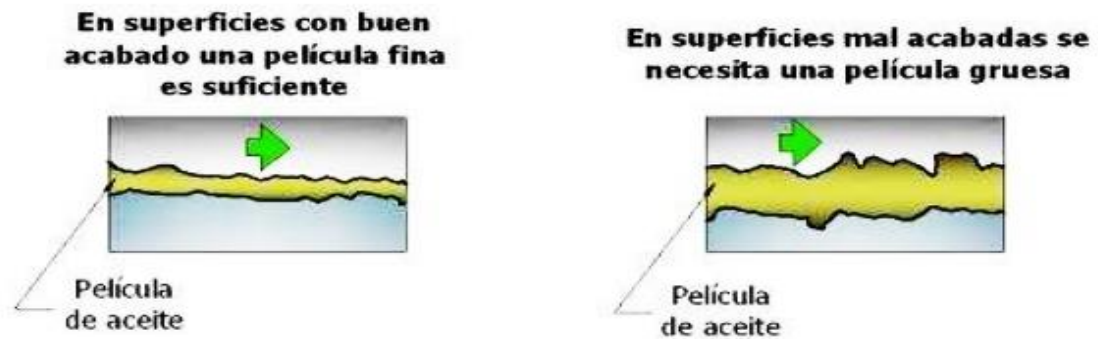
- Lubricación Mixta

Combinación entre lubricación límite e hidrodinámica, en la cual el espesor de la película es suficiente para la separación de asperezas, pero sigue habiendo contacto ocasional entre las crestas de las superficies. Ocurre desgaste esporádico, pero más lento que el caso límite.

- Lubricación Hidrodinámica

En este caso, el espesor de la película del lubricante es suficiente para lograr que las dos superficies metálicas estén separadas completamente, sin que exista contacto entre las crestas de las superficies en movimiento relativo. La carga es soportada por la resistencia de la película de lubricante y la viscosidad. En la teoría de la lubricación este es el tipo preferido porque teóricamente al no existir contacto entre las crestas de las superficies en movimiento relativo no ocurre desgaste y se logra mediante controlar los parámetros operativos inmerso en el parámetro adimensional llamado número de Sommerfeld  $S$ . La figura 5.2 muestra que el espesor de película hidrodinámica depende de la rugosidad superficial. Para que ocurra debe existir el llamado efecto cuña

Figura 5. 2. Espesores de lubricación hidrodinámica.

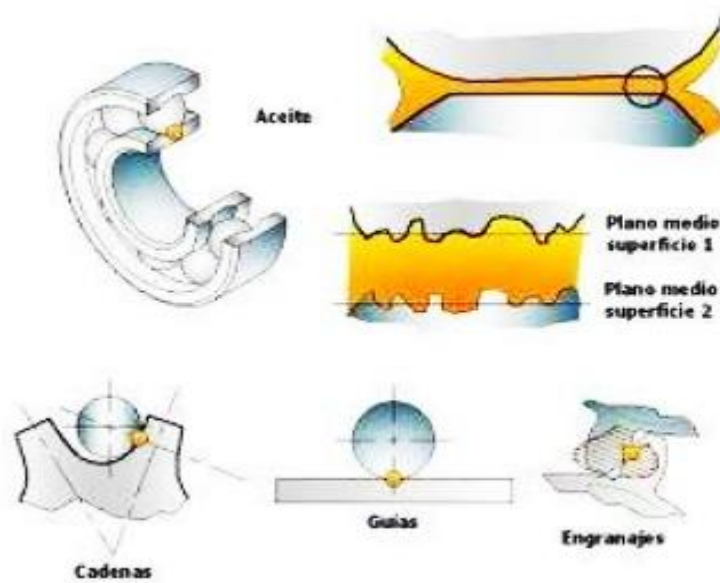


Fuente: (Ramón & Aguillón, 2015)

- Lubricación Elastohidrodinámica (EHL)

Descubierta por los profesores británicos Duncan Dawson y Gordon Higginson en la década de los años 50's dio la solución de los problemas de desgaste en mecanismos que funcionaban sometidos a condiciones de altas cargas y bajas velocidades. Este tipo de lubricación se presenta cuando la película de lubricante en la zona de carga se vuelve sólida o pierde viscosidad, ocasionando que las superficies metálicas se deformen elásticamente. La temperatura se incrementa en la zona de carga. (Ramón & Aguillón, 2015). La figura 5.3 presenta casos típicos.

Figura 5. 3. Lubricación Elastohidrodinámica (EHL)



Fuente: (Ramón & Aguillón, 2015)

Se puede decir que es una lubricación hidrodinámica, que aparece cuando ocurre el efecto cuña debido a deformación elásticas superficiales en una pequeña zona de contacto.

Compresores y sistema de lubricación forzada.

Cuando un fluido se trasiega, utilizando una bomba si es líquido y un compresor o ventilador si es un gas o vapor, se dice que existe circulación forzada.

Los compresores son máquinas cuya finalidad es aportar energía a los fluidos compresibles (aire, gas natural, nitrógeno, oxígeno etc..). La presión del fluido se incrementa mediante el trabajo realizado a través del compresor, reduciendo el volumen específico. Generalmente, los compresores son accionados por motores eléctricos o de combustión interna y así suministrar la energía necesaria para realizar el trabajo. (Toapanta, 2009).

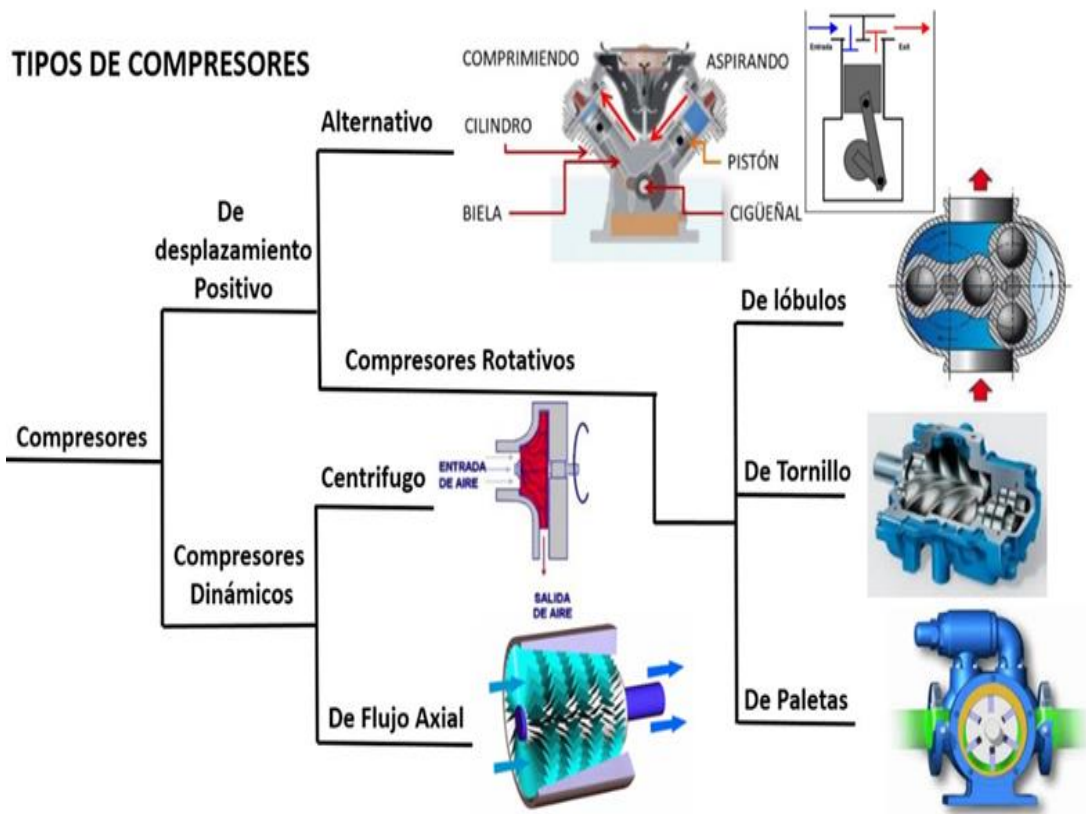
- Clasificación de los compresores

Los compresores manejan formas diferentes, tamaños y capacidades diversas y su configuración está basada dependiendo su aplicación. Los diferentes tipos de compresores se pueden catalogar en dos grupos, dependiendo el modo de compresión.

- Compresores de Desplazamiento Positivo: Son compresores de flujo intermitente, los cuales se dividen en reciprocantes y rotativos.
- Compresores Dinámicos: Son maquinas rotatorias de flujo continuo. Estos compresores, se dividen de acuerdo al flujo que manejan en centrífugo (flujo radial) y axiales (flujo axial).

La figura 5.4 presenta una clasificación típica para identificar los diversos tipos de compresores existentes. Para los intereses de este trabajo, interesan los compresores alternativos o reciprocantes de pistón.

Figura 5. 4. Tipos de compresores existentes.



Fuente: (Pérez, 2019)

### Compresores reciprocantes

Los compresores reciprocantes son máquinas de movimiento alternativo del pistón, estos pueden ser de simple efecto (comprimen el gas en un solo sentido del pistón), doble efecto (el trabajo se realiza en ambos lados del pistón) y son de etapas múltiples con Inter enfriamiento (intercooler).

El compresor reciprocante es un tipo de compresor de gas, cuyo objetivo es comprimir un volumen de gas en un cilindro cerrado, dicho volumen se reduce posteriormente mediante



una acción de desplazamiento mecánico del pistón dentro del cilindro. En estos compresores, la capacidad se ve afectada por la presión de trabajo. Esto quiere decir que una menor presión de succión implica un menor caudal; para una mayor presión de descarga, también se tiene un menor caudal.

En la industria se encuentran en una amplia variedad los compresores reciprocantes, todos estos cumplen al final con el mismo objetivo que es el de comprimir un fluido, pero su principio de funcionamiento y las cualidades requeridas para los distintos procesos hace que se clasifiquen de diferentes formas. (Toapanta, 2009).

La figura 5.5 presenta un compresor reciprocante sencillo o de simple efecto de la marca Dresser Rand con sus accesorios incluyendo el depósito de gas a presión. Simple efecto implica que se aprovecha una de las carreras del pistón para comprimir el gas. Posee varios cilindros y el flujo de gas comprimido en serie, pasando de un cilindro al otro, aumentando paulatinamente la presión. Para reducir el trabajo mecánico de compresión, se utiliza enfriamiento del gas entre cada etapa de compresión. La presión se eleva con el compresor para propósitos de almacenamiento en depósitos y transporte por tuberías diversas.

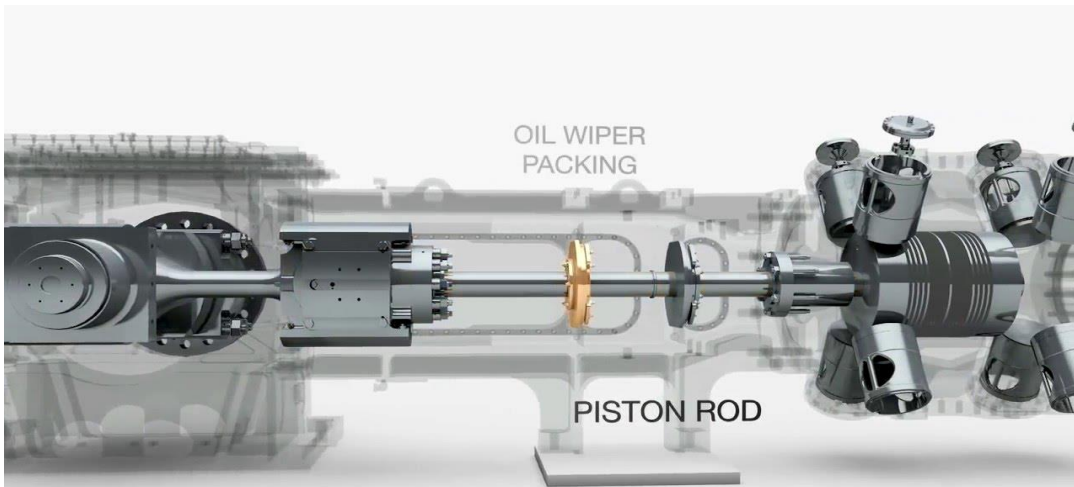
La figura 5.6 muestra un compresor de efecto doble lo que implica aprovechar las 2 carreras del pistón para comprimir el gas. En color amarillo se muestra el componente para limpiar el aceite (oil wiper packing). Se muestra que el movimiento rotacional del cigüeñal se convierte en lineal alternante por medio de un vástago y pistón conector que requiere una lubricación controlada.

Figura 5. 5. Compresor Reciprocante tipo HOS, marca Dresser-Rand



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. 6. Compresor reciprocante de doble efecto



Fuente: (RAMTOL, 2016)

La tabla 5.1 presenta aplicaciones típicas de compresores reciprocantes en la industria química, petroquímica y del gas natural.

Tabla 5. 1. Usos de Compresores Reciprocantes

<b>Refinerías y Petroquímica</b>	<b>Petroleo y Gas</b>
* Amoniaco	* Levantameinto Artificial
* Urea	* Reinyección
* Metanol	* Tratamiento de Gas
* Etileno	* Almacenamiento de Gas
* Oxido de Etileno	* Transmisión
* Polipropileno	* Gas Combustible
* Gas de Alimentación	* Booster
* Separación de Componentes de Gas Natural	* Distribución de Gas
* Almacenamiento de GNL	
* Craqueo Catalico	
* Destilación	

Fuente: (Lira, 2011)

Algunas ventajas de los compresores alternativos son:

- Son recomendados para manipular gases de bajo peso molecular como el metano principal componente del gas natural.
- Pueden manejar presiones de alta por encima de 3500 psig.
- Son menos sensibles a la composición de los gases.
- Mas eficiencia comparativa para relaciones de presión mayores a 2.
- Se adaptan muy bien a los cambios de flujo.

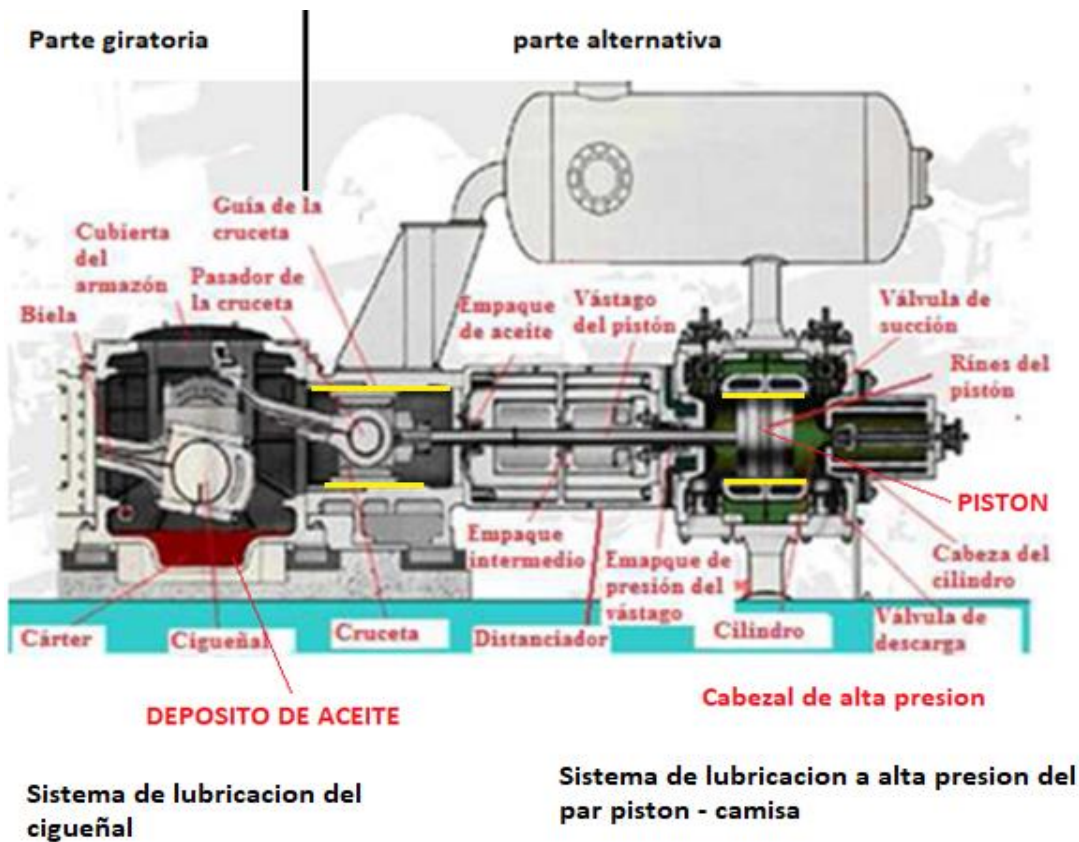
Algunas desventajas son

- Mas sensibles a la vibración
- Mayores problemas en las válvulas de flujo
- Los problemas de lubricación son mas frecuentes que en los de tipo centrifugo.
- Requieren mayor esfuerzo de mantenimiento

## 5.2. Sistema de lubricación forzada en compresores recíprocentes para gas natural.

La figura 5.7, presenta una vista en corte de un compresor recíprocante para gas natural. Son de doble efecto apropiados para maximizar el caudal para un tamaño dado y poseen una cruceta y vástago para lograr en el pistón del cabezal de alta presión que se eliminen las fuerzas normales al desplazamiento, reduciendo la fricción y extendiendo la vida útil al reducir la fricción y el desgaste de partes como pistón, anillos, cilindro, que requieren intensa lubricación. Las líneas de color amarillo indican las áreas que requieren lubricación.

Figura 5. 7. Compresor recíprocante para gas natural.



(Reyes, 2017)

Las 2 zonas amarillas requieren 2 sistemas de lubricación. Uno para alimentar de aceite los cojinetes de bancadas y bielas del cigüeñal, operando a una presión relativamente baja. El otro sistema de lubricación debe operar a una presión alta de valor mayor a la presión máxima del gas natural que se trasiega para poder ingresar a la zona a lubricar.

Algunas funciones del aceite de lubricación en estos compresores son:

- Controlan la corrosión
- Reducen la fricción
- Sirven como medio refrigerante
- Sellan espacios
- Amortiguan el impacto y las vibraciones
- Otras.

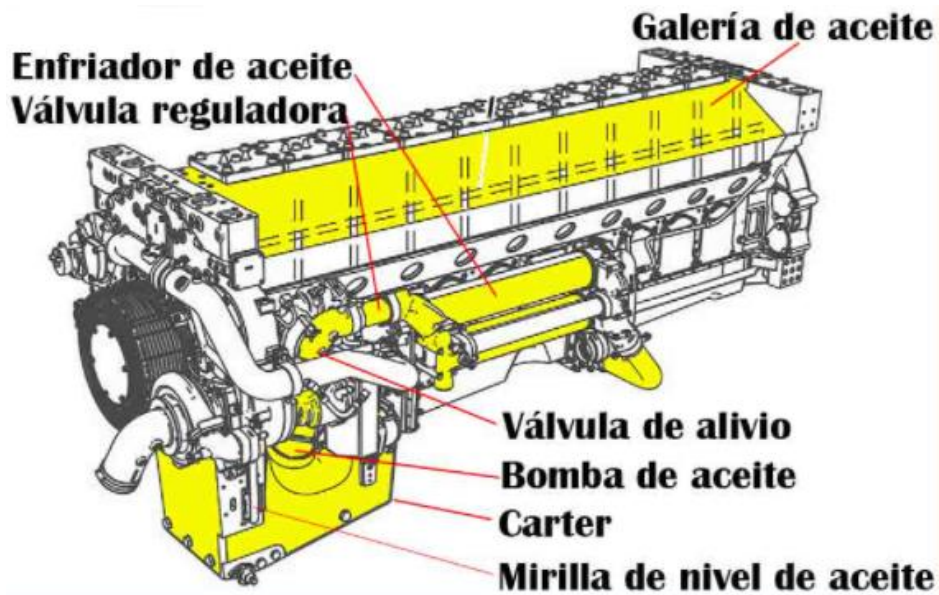
Es muy importante seleccionar el aceite lubricante correcto y su nivel aceptable, luego mantener adecuadamente el sistema de lubricación. El uso de un aceite lubricante no adecuado para la aplicación, puede acortar la vida útil del compresor y disminuir su eficiencia, al igual que un sistema de lubricación mal mantenido. Utilice sólo un aceite de alta calidad que cumpla con los requisitos generales, físicos y químicos que define el fabricante del equipo.

No se debe esperar a que aparezcan las dificultades de lubricación. Si tiene alguna duda sobre el lubricante correcto a utilizar para una aplicación en particular, consulte a un proveedor de aceite de confianza. La lubricación de las superficies de contacto está destinada no solo a reducir la fricción y el desgaste entre las piezas, sino también a eliminar el calor generado cuando se encuentran altas velocidades y cargas. Si el sistema de lubricación del compresor debe cumplir con estos propósitos, es esencial que se use el aceite correcto y que se sigan de cerca las siguientes recomendaciones para el mantenimiento del sistema de lubricación. (Ingersoll-RAND, 1984).

### **5.3. Motor de combustión interna y sistema de lubricación.**

La figura 5.8 presenta una vista en corte de un motor a gas y su sistema de lubricación forzada.

Figura 5. 8. Vista en corte de un motor alternativo de combustión.



Fuente: (CMP, 2020)

El aceite de lubricación se deposita en el cárter. Una bomba de lubricación succiona el aceite y lo trasiega a una presión de 80 psi hacia galerías taladradas en el bloque y la o las culatas según el diseño, para que el aceite llegue a los cojinetes del cigüeñal (bielas y bancadas), árbol de levas y a los balancines de válvulas. Galerías de retorno regresan por gravedad el aceite al cárter.

Para un conjunto motor de combustión – compresor, es posible utilizar el mismo tipo de aceite lubricante para los 2 módulos estructurales como es el caso típico de motor operando con gas natural y el compresor trasegando gas natural, aunque en algunos casos se definen



aceites diferentes para el motor y el compresor como es el caso típico de motor a gas y compresor de gas natural.

## 6. DESARROLLO Y RESULTADOS DE LOS OBJETIVOS ESPECIFICOS

### 6.1. Caracterizar el actual sistema de lubricación del conjunto motor - compresor recíprocante.

El conjunto a analizar que interesa a los objetivos del proyecto son el par motor a gas natural marca Caterpillar y el compresor de gas natural marca Dresser rand. La figura 6.1 presenta el motor que impulsa el compresor de gas natural en estudio. Es el motor G3608 con una potencia nominal al freno entre 1591 y 1767 kW a velocidades rotacionales entre 900 y 1000 rpm. Es turbo cargado con enfriamiento intermedio (After cooler).

Figura 6. 1. Motor operando con gas natural del conjunto en estudio.



Shown with  
Optional Equipment

**Gas  
Petroleum  
Engine**

**G3608**  
2133-2370 bhp  
1591-1767 bkW  
900-1000 rpm

**CATERPILLAR® ENGINE SPECIFICATIONS**

In-Line 8, 4-Stroke-Cycle	
Bore — in (mm) .....	11.8 (300)
Stroke — in (mm) .....	11.8 (300)
Displacement — cu in (L) .....	10,350 (169.6)
Aspiration .....	Turbocharged and Aftercooled
Capacity for Liquids — U.S. gal (L)	
Jacket Water Circuit¹ .....	124 (469)
Aftercooler Circuit¹ .....	16 (61)
Lube Oil System (refill) .....	241 (912)
Package Shipping Weight (Dry) — lb (kg) .....	41,888 (19 000)

¹Engine only

Fuente: (CATERPILLAR, 2021b)

El sistema de lubricación de este motor a temperatura normal de operación de 85 – 90 °C, trabaja a una presión de 80 psi. La capacidad de aceite del cárter es de 124 galones o 469 litros. Cada cambio de aceite requiere de 3 barriles que tienen una capacidad de 42 galones la unidad. El costo promedio de un barril es de \$ 3.300.000 cop por lo que el costo para



cambio de aceite por motor es de \$ 9.900.000. Para el grupo de 4 motores, el costo por cambio de aceite es de \$ 39.600.000. Como se realizan 2 cambios de aceite al año por motor, el costo anual para el cambio de aceite para el grupo de 4 motores es de \$ 79.200.000.

La figura 6.2 muestra el compresor del conjunto, es de la marca Dresser Rand, tipo 6Hos4.

Figura 6. 2. Compresor para gas natural tipo reciprocante marca Dresser Rand.



Fuente: (COBEY, 2021)

La tabla 6.1 presenta las principales características técnicas del compresor de gas natural. Se observa que opera a 1000 rpm, por lo cual se acopla directamente al motor a gas natural que lo propulsa. Posee 2 sistemas de lubricación, uno de baja presión para servir al Frame y otro de alta presión para suministrar el aceite lubricante al cabezal de alta presión que trasiega el gas natural. El aceite de lubricación es del mismo tipo para el motor y el compresor. Es el aceite Mobil Pegasus 805, según expresa textualmente el fabricante:

“diseñado para proporcionar una protección excepcional contra el rayado y desgaste abrasivo de los pistones y el deterioro de los anillos y camisas. Exhibe una excelente resistencia a la formación de espuma, buena demulsibilidad y protección contra la corrosión. Está formulado con niveles muy bajos de zinc y fósforo, por lo que es compatible con motores equipados con convertidores catalíticos”.

Tabla 6. 1. Datos del compresor recíprocante de gas natural Dresser Rand.

<b>G3608 / 6HOS4/3-1 PERFORMANCE – UPSIDE MAX (1000 RPM)</b>			
DRESSER-RAND GAS FIELD COMPRESSOR PERFORMANCE (DRSIZE copyright 1996-1999 V1.3)			
PACKAGER:	Caterpillar Compression Systems	DATE:	Oct 11, 1999
LOCATION:	Channelview	FILE:	UPSIDEMX.DAT " 1"
JOB/REF :	Promigas - Cartegena station	CALC BY:	Kurt Hopf
JOBSITE :	Amb T (F) : 85.	Alt. (FT) :	0. Atm ( PSIA): 14.70
Ref. Pressure ( PSIA) :	14.70	Ref. Temp.(F):	60.
COMPRESSOR: Frame	: 6 HOS 4	Stroke (IN):	6.0 Rod Dia(IN): 2.500
.....Calc RPM	: 1000.0	Max RPM	: 1200.0 Cooler (HP): 99.9
DRIVER: Type	: Gas Engine	Avail (HP) :	2220.0 Model: G3608LE
-----			
Stage Number			1
Gas		Nat. Gas	
Dry Gas Mol. Weight			16.396
Dry Gas Spec. Gravity			0.566
Cp/Cv @ 14.7/60			1.310
Avg. Temp. Expon. (K)			1.295
Avg. Vol. Expon. (N)			1.312
Gas Crit. Temperature		R	343.497
Gas Crit. Pressure		PSIA	666.993
Z Standard			0.999
Z Suction			0.963

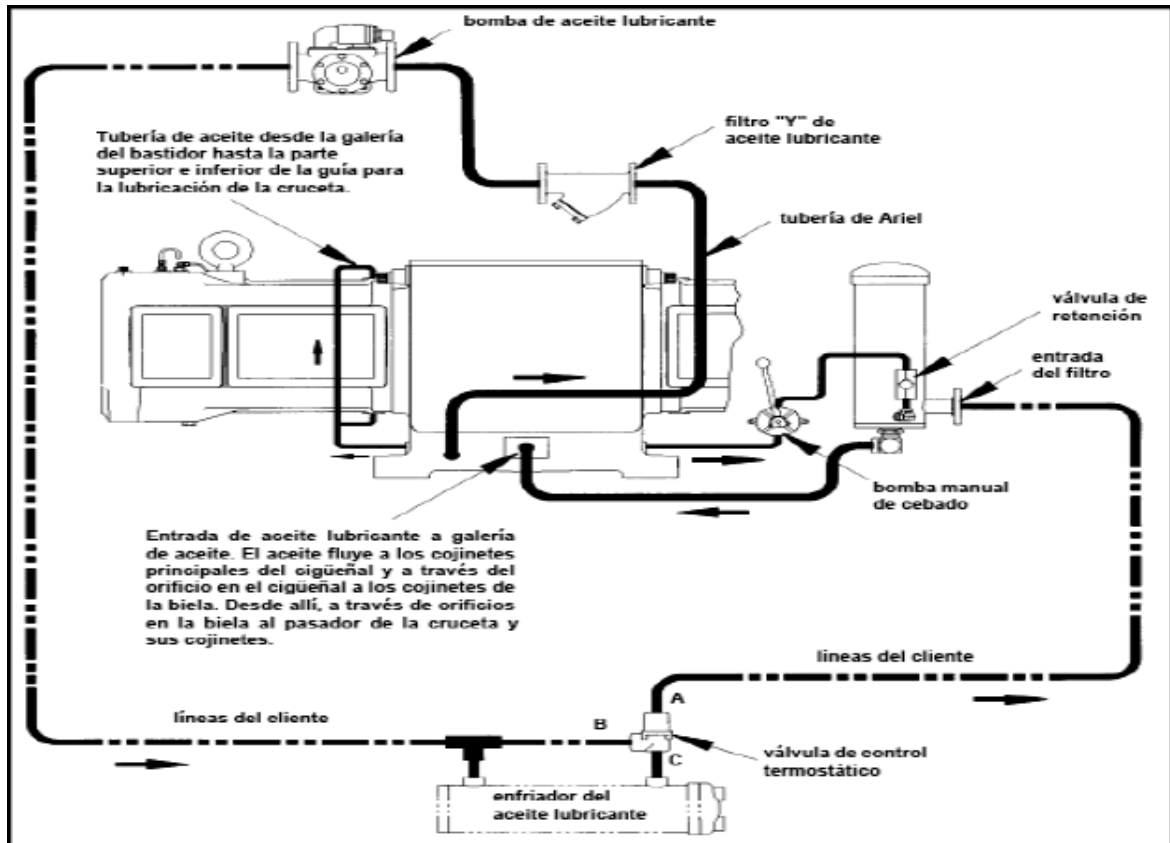
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los detalles de lubricación del compresor, para el sistema de baja presión frame soporte del cigüeñal y el sistema de lubricación de alta presión que lubrica el cabezal cilindro – pistón, que trasiega el gas natural.

- **Lubricación del Frame o bastidor del compresor.**

Este sistema de baja presión, suministra aceite de lubricación a los cojinetes de bancadas, biela, crucetas, cigüeñal y pasadores. La figura 6.3, presenta el esquema del sistema de lubricación de baja presión.

Figura 6. 3. Sistema de lubricación estándar de un compresor recíprocente.



Fuente: (Ingersoll-RAND, 1984)

En el sistema de lubricación estándar, el aceite es enviado a través de la bomba de aceite de tipo engranaje accionada por el cigüeñal desde el cárter. La bomba impulsa el aceite a través de un enfriador y luego pasa por un filtro antes de que se entregue al cabezal de aceite del cojinete principal, que es una tubería fundida en el bastidor. El aceite se envía a cada cojinete principal a través de orificios perforados en los cojinetes hasta el cabezal de aceite. Desde los cojinetes principales, el aceite pasa a través de pasajes perforados en el cigüeñal hasta el

cojinete de la muñequilla o codo. Un orificio perforado en la biela conduce el aceite desde la muñequilla hasta el pasador de la biela en el extremo pequeño de la biela. El pasador luego alimenta aceite al buje de la biela y a la cruceta, que luego alimenta aceite a las guías. Después de atravesar y lubricar las distintas partes, el aceite se drena de nuevo al área del sumidero. (Ingersoll-RAND, 1984)

Válvulas de alivio, un manómetro diferencial y un interruptor de parada por baja presión de aceite están incorporados en el sistema estándar. Además del equipo estándar, se pueden incorporar equipos opcionales al sistema para una aplicación en particular.

Se incluye una bomba de cebado manual en el sistema estándar para permitir la prepublicación de los cojinetes y generar una ligera presión en el sistema de lubricación antes de la puesta en marcha. Hay una válvula de retención incorporada en la bomba para evitar el flujo inverso de aceite a través del circuito de la bomba de cebado cuando la bomba principal está funcionando.

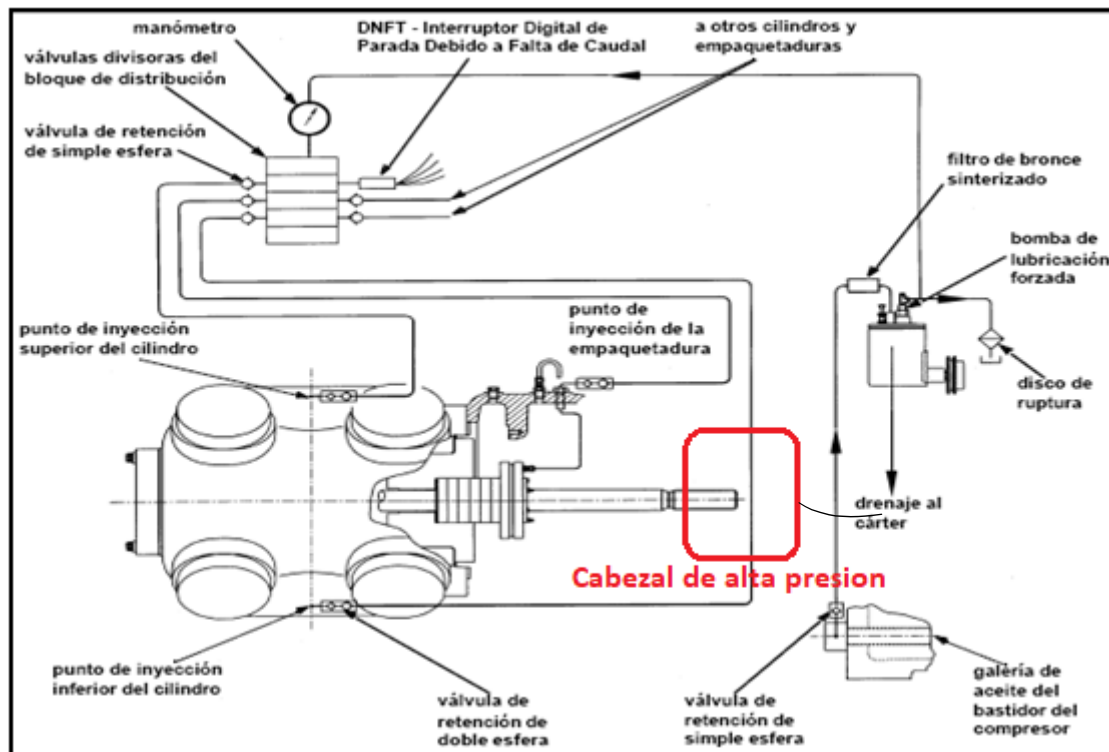
Se puede utilizar una bomba de aceite auxiliar impulsada por motor opcional en lugar de la bomba de cebado manual. Cuando se usa la bomba auxiliar, se debe ubicar una válvula de retención en la línea de descarga de la bomba de cebado hacia la descarga de la bomba de aceite principal.

Este flujo de aceite en el sistema de lubricación de baja presión recircula. Teóricamente no se requiere reposición, aunque pequeñas fugas de aceite eventualmente impliquen reponer aceite perdido.

- **Sistema de lubricación Forzada (cilindros).**

Este es el sistema de lubricación a alta presión. La figura 6.4, presenta el esquema correspondiente. El aceite a alta presión que puede ser regulada hasta 1500 psi, valor mayor a la presión de 830 psi con que se trasiega el gas natural, llega al cabezal del conjunto pistón - cilindro de doble efecto. El aceite que llega a esta zona se arrastra por el flujo de gas natural y debe reponerse continuamente para asegurar mantener el nivel correcto de aceite en el cárter del compresor y la lubricación del cabezal.

Figura 6. 4. Diagrama lubricación forzada al cabezal de gas natural.

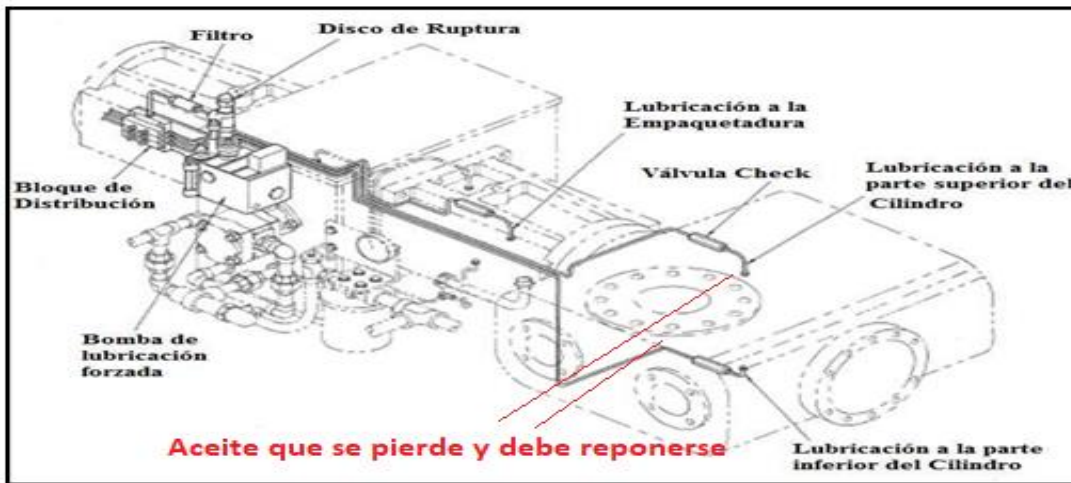


Fuente: (Ingersoll-RAND, 1984)

El aceite en el cárter del lubricador es forzado por la acción de las unidades de bombeo individuales a través de la tubería y las válvulas de retención hacia los orificios del cilindro y la empaquetadura del vástago del pistón. Cada unidad de bombeo en el lubricador es

ajustable para permitir la regulación de la alimentación de aceite a los distintos puntos. Cada unidad de bomba es accionada por un balancín o un rodillo de leva y un conjunto de leva, lo que hace que un pistón de émbolo dentro del cuerpo de la bomba se mueva alternativamente. La carrera de la bomba, y por lo tanto la salida de la bomba, se puede variar ajustando el manguito de ajuste que se muestra en el dibujo. El rendimiento máximo se logra con el manguito completamente extendido desde el cuerpo de la bomba. (Ingersoll-RAND, 1984). La figura 6.5, presenta el mismo sistema de lubricación, como parte del compresor recíprocante. Se observan las zonas dónde se pierde el aceite arrastrado por la corriente de gas natural, las que se indican en color rojo.

Figura 6. 5. Esquema de distribución lubricación forzada.

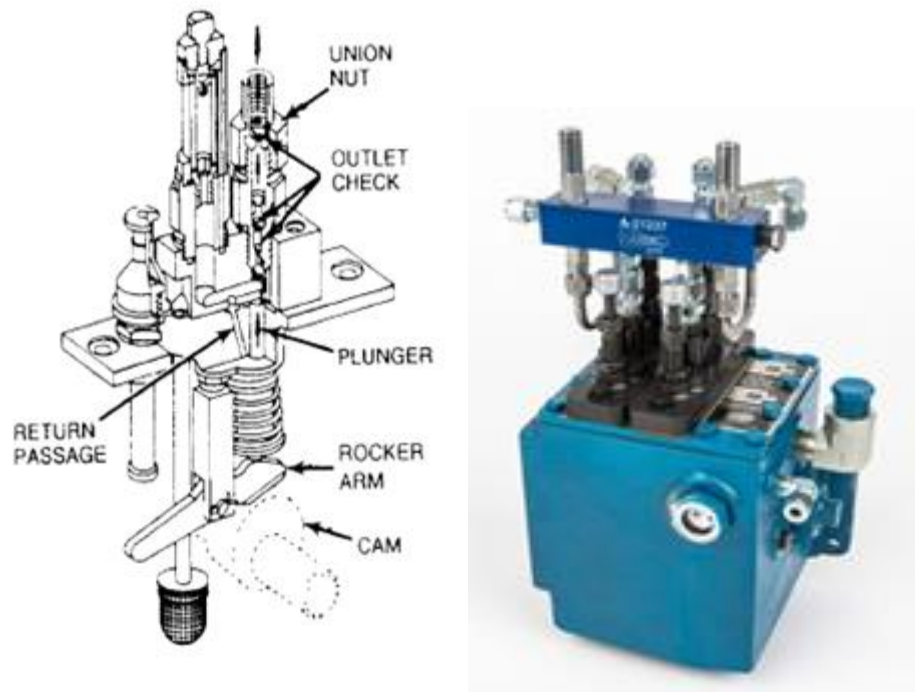


Fuente: (Ingersoll-RAND, 1984)

Los componentes principales del sistema de lubricación de alta presión son los siguientes. Las bombas de lubricación de alta presión, el bloque lubricador para pre lubricar manualmente antes de arrancar el equipo, válvulas varias, instrumentación de medición y sensores de parada rápida automática ante fallas del sistema de lubricación. Los detalles son.

La figura 6.6, muestra las bombas lubricadoras de alta presión. Se observa que son de tipo embolo accionadas por leva maquinada en el árbol de leva del eje impulsor. A la izquierda de la figura se presenta el esquema de la bomba y a mano derecha la bomba real de alta presión del sistema de lubricación de alta presión del compresor

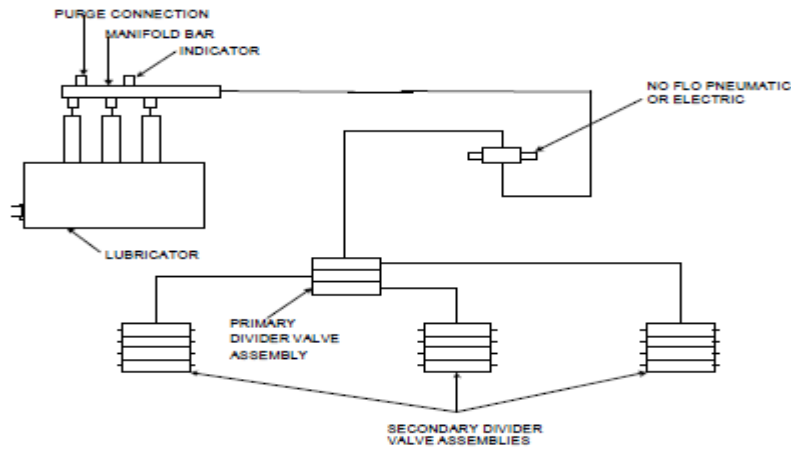
Figura 6. 6. Bombas lubricadoras.



Fuente: (Ingersoll-RAND, 1984)

La figura 6.7, muestra el esquema del bloque lubricador. este se acciona manualmente para prelubricar el sistema de alta presión cuando se arranca el conjunto motor-compresor.

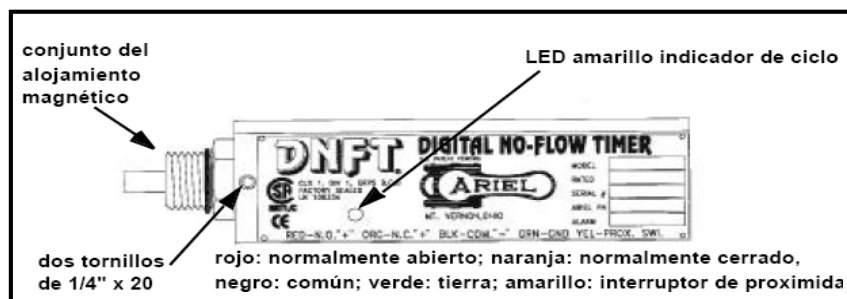
Figura 6. 7. Esquema del bloque lubricador



Fuente: (Ingersoll-RAND, 1984)

El sistema de lubricación forzada se dirige desde la galería de aceite del bastidor hacia la bomba de lubricación forzada pasando primero por un filtro de bronce, el cual se encarga de retener las impurezas del aceite y luego se dirige al bloque de distribución. El aceite lubricante se dosifica para suministrar las cantidades exactas a los cilindros y empaquetaduras. La dosificación de aceite es intermitente cada 15 segundos, esto es controlado mediante el DNFT, mostrado en la figura 6.8.

Figura 6. 8. Interruptor de flujo de aceite (DNFT).



Fuente: (Ingersoll-RAND, 1984)



La figura 6.9, presenta el interruptor de flujo. Su función es generar una alarma o enviar una señal de apagado de la máquina. Esta señal se envía a un controlador (PLC).

La figura 6.10, presenta el filtro de aceite el cual es un elemento cambiable según se llene de partículas contaminantes filtradas.

Figura 6. 9. Interruptor de flujo.



Figura 6. 10. Filtro de aceite



Fuente: (ArielCorp, 2021)

El sistema de lubricación utiliza un filtro a través del cual, el aceite fluye del bastidor hacia la bomba de lubricación forzada, con el fin de retener las impurezas del aceite y luego se dirige al bloque de distribución.

La figura 6.11, presenta la válvula de alivio automático, Es un dispositivo de reinicio automático que brinda protección contra sobrepresión al sistema de alimentación forzada.

Figura 6. 11. Válvula de alivio automático



Fuente: (ArielCorp, 2021)

La figura 6.12, presenta el disco de ruptura. Es un dispositivo diseñado para aliviar la presión en caso de una obstrucción en las líneas de lubricación.

Figura 6. 12. Disco de ruptura.



Fuente: (ArielCorp, 2021)

La figura 6.13, presenta el bloque de distribución. Los bloques de distribución o válvulas derivadoras, distribuyen el aceite a los diferentes puntos de lubricación de

los cilindros. La cantidad de bloques depende de los cilindros montados en el compresor.

Figura 6. 13. Bloque de distribución.



Fuente: (ArielCorp, 2021)

La figura 6.14, presenta las válvulas de retención. estas son instaladas en la conexión del cilindro de cada línea de aceite para evitar que el gas comprimido se regrese por el sistema de lubricación.

Figura 6. 14. Válvulas de retención



Fuente: (ArielCorp, 2021)

La figura 6.15, presenta el manómetro o medidor de presión. Se instala a la descarga de la bomba, con el fin de monitorear la presión. El valor de presión máximo es de 100 psi para el sistema de baja presión y 2000 psi para el sistema de alta presión.

Figura 6. 15. Manómetro



Fuente: (ArielCorp, 2021)

Estos componentes son claves para el funcionamiento del sistema y se debe garantizar su correcto funcionamiento. Una vez puesto en servicio el equipo, se debe hacer ajuste del lubricador (bomba). Se debe garantizar que en las líneas no quede aire. Se debe realizar un procedimiento de cebado de la bomba en caso de ser necesario.

Estando el lubricador en funcionamiento, se debe observar a través de la mirilla dispuesta para este proceso, el número de gotas por minuto que caen. En caso de ser necesario, se debe ajustar el número de gotas por minutos requerido. El número de gotas por minutos requerido en el sistema depende del diámetro del cilindro y de la presión de descarga que se maneje. La tabla 6.2, presenta los datos de gotas por minuto para propósitos de ajustes, según define el fabricante.

Tabla 6. 2. Cuadro de gotas de alimentación de aceite por minuto (dpm) totales al cilindro.

CYLINDER DISCHARGE PRESSURE (PSIG)						
Cylinder Diameter (inches)	25-150	150-300	300-600	600-1500	1500-3000	3000-7500
3 – 6						28-35 dpm
4 – 8	5-14 dpm	11-18 dpm	12-21 dpm	16-28 dpm	21-32 dpm	
8 – 10	7-16 dpm	14-21 dpm	18-26 dpm	21-35 dpm		
10 – 12	9-19 dpm	16-25 dpm	21-32 dpm			
12 – 14	11-23 dpm	19-30 dpm	25-37 dpm			
14 – 16	12-26 dpm	23-35 dpm				
16 – 18	14-30 dpm	25-37 dpm				
18 – 20	16-33 dpm					
20 – 22½	18-37 dpm					
22½ – 26	19-40 dpm					

Fuente: (Ingersoll-RAND, 1984)

Para el equipo en estudio, se cuenta con cilindros de 10 pulgadas de diámetro y una presión de descarga que oscila entre 600 y 1500 psig. Teniendo en cuenta esto, el número de gotas por minutos estaría en el orden de los 21 – 35. Lo que da un consumo de aceite aproximado de 50.400 gotas/24 horas, equivalente a 1,7 galones/ día o 51 galones al mes por conjunto. Para el consumo de aceite para el grupo de 4 equipos, se espera un consumo normal de 204 galones por mes.

Para un caso de estudio, donde las estaciones compresoras de gas natural trabajan 24 horas al día, con el fin de incrementar la presión de gas hacia los clientes (empresas, hogares, estaciones de GNC). Tienen un consumo en el sistema de lubricación forzada de los cilindros de los compresores recíprocos excesivo, aproximadamente 110 galones de aceite lubricante al mes por equipo, lo cual es el doble de lo definido por el fabricante y genera que los costos de operación sean elevados, con un valor aproximado de \$6.400.000 COP por máquina o \$ 25.600.000 para el grupo de 4 máquinas al mes.

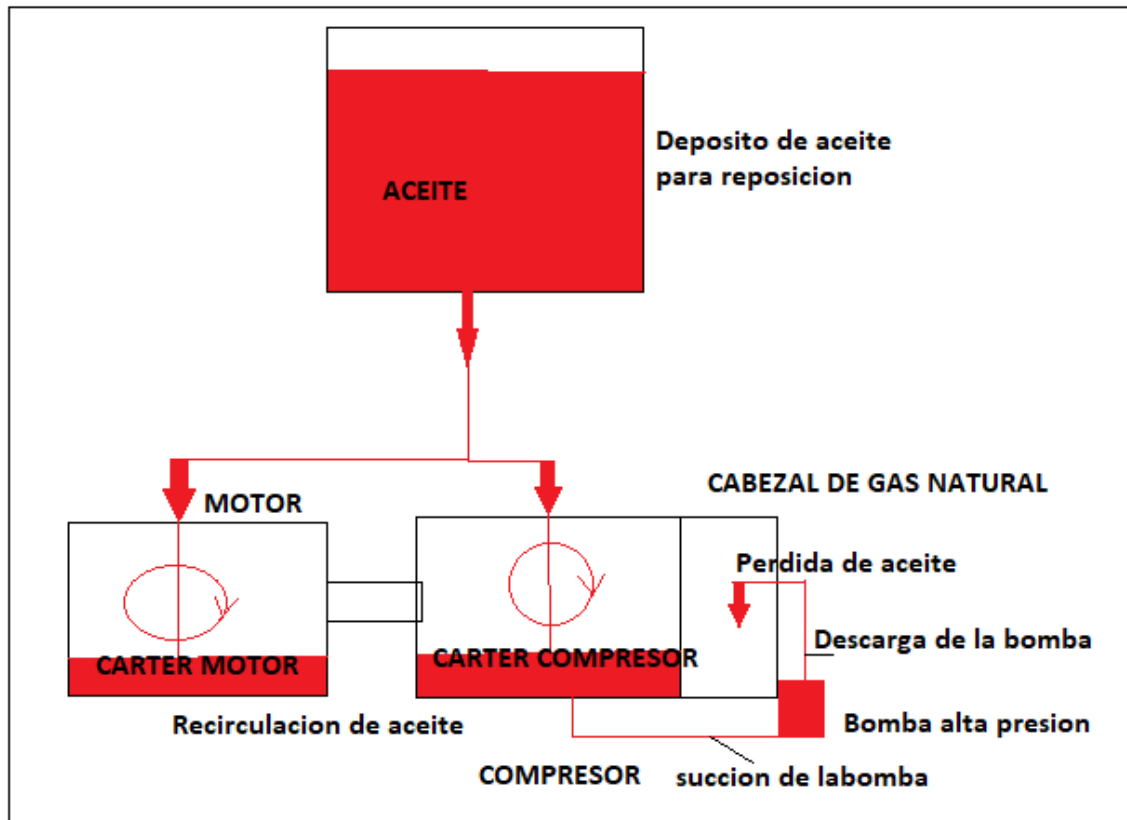
Varios componentes están involucrados en el proceso de lubricación de alimentación forzada. La parte más dura de la tarea es asumida por la bomba de aceite: esta genera la presión requerida para mover el aceite del cárter a los puntos de lubricación a través de los canales. Para que todos los componentes del circuito de lubricación funcionen de forma confiable, es esencial que el aceite sea cambiado en los intervalos pertinentes. Precaución: siempre hay que cambiar el filtro de aceite, al mismo tiempo. Sólo un filtro limpio puede eliminar los contaminantes, como polvo, abrasión metal y residuos de la combustión del aceite (Lubri-Press, 2016).

## 6.2. Rediseño del sistema de lubricación del conjunto.

Analizado el sistema actual de lubricación del compresor en la parte de alta presión que es el componente donde por naturaleza del proceso se pierde el aceite que debe reponerse, se presenta el esquema actual del sistema de reposición en la figura 6.16. se tiene un depósito elevado que permite que el aceite descienda por gravedad alimentando el cárter del motor y el compresor. Sensores del nivel de aceite en el cárter de cada unidad y válvulas eléctricas de control de flujo accionadas mediante un PLC, permiten la reposición automática del aceite. En el motor el aceite recircula y el consumo normalmente es bajo entre 1 y 2 galones diarios y es un consumo normal después de operar por más de 10 .000 horas según define el fabricante Caterpillar. Para el sistema de lubricación de baja presión en el compresor también ocurre recirculación y teóricamente no hay consumo. El consumo continuo e inevitable de aceite por la naturaleza del proceso ocurre en el cabezal del compresor.

Un rediseño implica algún grado de modificación a un equipo, desde leve a profunda. En este caso el rediseño implica reconfigurar el sistema actual de reposición de aceite según muestra la figura 6.16.

Figura 6. 16. esquema del sistema de reposición actual de aceite.



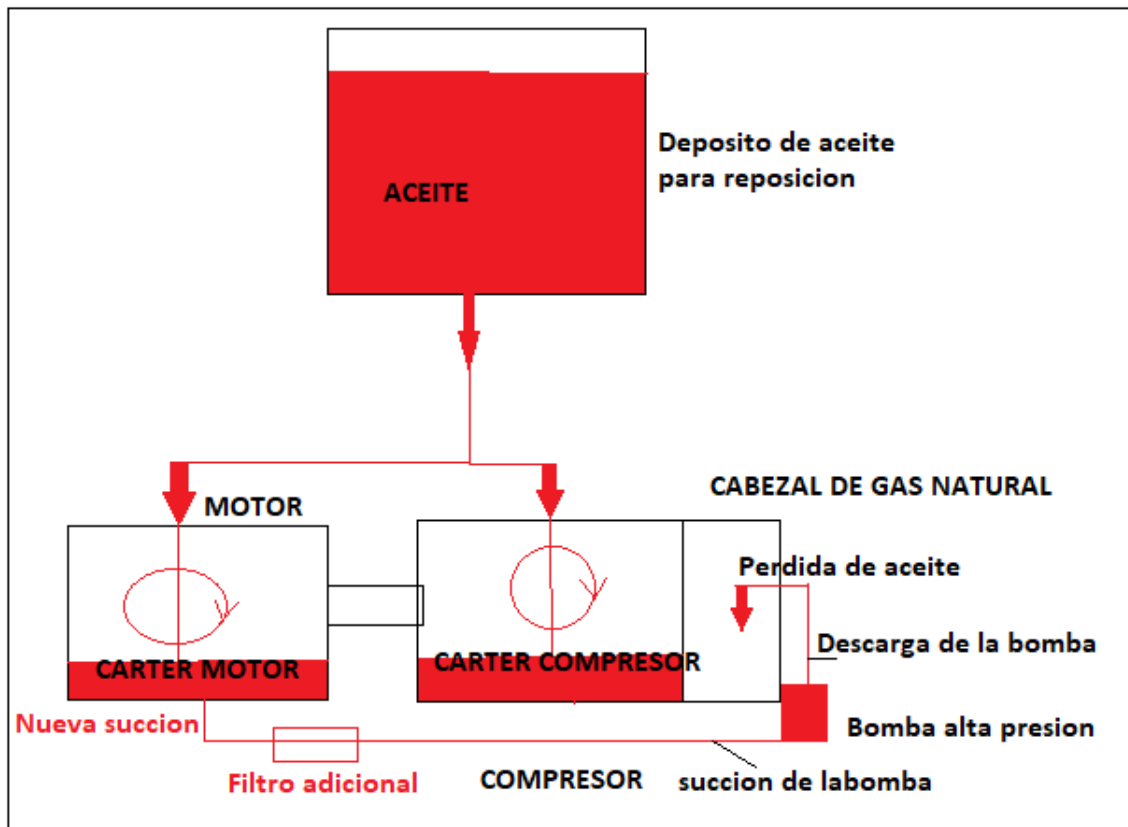
Fuente. Elaboración propia.

En el sistema actual para reponer el aceite consumido, la reposición de aceite se realiza al cárter del motor y el del compresor en el lado de baja presión. De este modo el aceite que se repone desde el cárter del compresor, básicamente posee baja contaminación. Sin embargo, el sistema de alta presión posee un componente de filtrado, siempre necesario en los sistemas de flujo. Para el aceite del motor, dado el bajo consumo y reposición, después de 5000 horas

o 6 meses de operación, lo que primero ocurra, se realiza el cambio de aceite, respetando lo definido por el fabricante en su manual de mantenimiento preventivo.

La figura 6.17, presenta la reconfiguración propuesta al sistema de reposición de aceite para lubricación. La modificación consiste en tomar la succión bomba de alta presión desde el cárter del motor eliminando la toma original desde el cárter del compresor.

Figura 6. 17. Rediseño propuesto.



Fuente. Elaboración propia.

La nueva línea de succión para la bomba de alta presión en el compresor implica los siguientes aspectos técnicos.



- Tomar aceite desde el cárter del motor para conectar el lado de succión de la bomba de alta presión en el compresor, implica utilizar aceite más contaminado dado que en el motor ocurren procesos de combustión que liberan partículas y sustancias contaminantes. Sin embargo, teniendo en cuenta que el motor opera con gas natural, el grado de contaminación del aceite del motor es mínimo respecto a operar con gasolina o acpm combustible Diesel. Ver anexo A.
- Para asegurar el control de contaminantes desde el cárter del motor se agrega un componente de filtrado.
- Los motores que operan con gas natural contaminan el aceite a una tasa aproximada de 1/3 de lo que corresponde al operar con gasolina. Esto implica extender el período de cambio de aceite por 3. Sin embargo, la verdadera vida útil en cada caso particular se define mediante realizar análisis de aceite certificada.
- La modificación no afecta los flujos requeridos de aceite para el sistema de lubricación de alta presión en el compresor, dado que se mantienen las distancias de las líneas de succión del aceite desde el cárter del motor, con los mismos diámetros de tubería.

El nuevo componente es el filtro de aceite que se muestra en la figura 6.18. Para asegurar baja caída de presión respetando mantener conexiones de diámetro  $\frac{3}{4}$  de pulgada se escoge una carcasa con diámetros correspondientes. La figura 6.18 presenta el componente a agregar siguiendo sugerencias del representante Caterpillar local. Se muestra la base de soporte del filtro, manteniendo la facilidad de filtro roscado para rápido y seguro recambio. Teniendo en cuenta que el flujo de aceite medido para la bomba de alta presión fue de 1 litro / s, se selecciona el filtro de aceite marca Partmo

A309SP de servicio pesado con un flujo de 1,5 litros/s, para una caída de presión de 0,4 psi. Para mayor detalle ver anexo B.

Figura 6. 18. Base para filtro de aceite a implementar.



Fuente: (CATERPILLAR, 2021a)

Figura 6. 19. Filtro de aceite.

	<b>A309SP</b>	
	<b>HD / PESADO</b>	
	<b>ACEITE</b>	
	<b>FLUJO COMPLETO</b>	
D. Exterior	107.8 mm	
Altura	185 mm	
Rosca	1x12 in	
V. de presión	0 psi	
V. Antidrenaje	NO	
Sello central	NO	

Fuente: (Partmo, 2021)

El costo de la carcasa y el filtro incluyendo los racores de conexión asciende a un valor de \$ 198.500 cop, tenido como referencia costos en el comercio local.

Para mantener las mismas condiciones originales de flujo de aceite en la succión de la bomba de alta presión, el filtro seleccionado mantiene las medidas nominales un poco mayor al existente que debe eliminarse.

### **6.3. Análisis monetario de la propuesta de rediseño.**

- Tomar aceite desde el cárter del motor genera un alto consumo de aceite en el mismo, el cual puede reponerse con el actual sistema de reposición. Esta renovación continua del aceite del motor, que se asume es la misma que ocurre en el compresor, permite extender los 5000 horas o 6 meses actuales definidos para el cambio periódico de aceite. Para definir las horas de vida útil del aceite para su cambio, deben realizarse análisis de aceite certificados. Teniendo en cuenta que el consumo actual de aceite es de 110 galones al mes o 3.67 galones de aceite por día, esta sería la tasa de reposición del aceite para el motor con la nueva toma para la succión. Recordando que el Carter del motor posee una capacidad de 241 galones. Se requieren 66 días para que ocurra un recambio equivalente del aceite del motor ( $241/3,67$ ). esto implica en un mes casi remplazar la mitad de aceite del cárter en el motor. Esta renovación sostenida durante 6 meses, prácticamente define realizar 3 cambios de aceite en el motor para ese periodo de tiempo, por lo cual se elimina el cambio de aceite cada 6 meses y se propone realizarlo conservativamente una vez al año teniendo en cuenta que no se realiza el cambio completo de todo el aceite en el cárter, si no un cambio gradual que implica mezcla de aceite nuevo y usado. Esto reduce a la mitad el costo por cambios de aceite al año. Este consumo de aceite es el mismo

actual que ocurre en el compresor, asumiendo que es normal para las actuales condiciones y se mantiene en la misma tendencia.

- Repitiendo el mismo proceso de cálculo teniendo como referente el consumo normal que define el fabricante de 51 galones por mes. Para un periodo de 6 meses, se ingresan 306 galones, valor mayor en 65 galones, al requerido para cambiar el aceite que es de 241 galones. Por ello, se mantiene la sugerencia de un solo cambio de aceite al año.
- Lo expresado permite decir que, con la modificación propuesta, se mantiene el mismo consumo de aceite en el compresor, con lo que no se afecta el actual desempeño ni la confiabilidad del equipo, pero se logra reducir la cantidad de aceite correspondiente al cambio periódico de aceite a los motores a la mitad de lo que se realiza actualmente, pasando de dos cambios anuales a uno. En valores monetarios, el costo promedio de un barril es de \$ 3.300.000 cop, por lo que el costo para un cambio de aceite por motor al año es de \$ 9.900.000 cop. Para el grupo de 4 motores, el costo por cambio de aceite es de \$ 39.600.000. Como para el caso original se realizan 2 cambios de aceite al año por motor, el costo anual para el cambio de aceite para el grupo de 4 motores es de \$ 79.200.000. Por esto, el ahorro anual por la propuesta de diseño es de \$ 39.600.000.

Tomando todos los factores mencionados y la estrategia de rediseño presentada en la figura 6.17 se plantea la modelación dinámica de dicho sistema para la elaboración de un sistema en algebra de bloques que permita la modelación del mismo a través de herramientas computacionales como el software Scilab utilizado como motor de cálculo matemático para sistemas dinámicos.

Recapitulando los componentes principales para establecer el modelado dinámico se tiene en la figura 6.20 al reservorio de aceite:

Figura 6. 20. Reservorio de Aceite.



Fuente: Elaboración propia

Este reservorio de aceite como se mencionó en el desarrollo de los objetivos anteriores se encuentra a una altura de 12 metros y provee lubricación tanto para el motor estacionario como para los elementos del compresor recíprocante. Además, se tienen como instrumentos de control los sistemas de nivel tanto para el compresor como para el motor como se observan en las figuras 6.21 y 6.22.

Figura 6. 21. Control de nivel de la unidad compresora.



Fuente: Elaboración propia

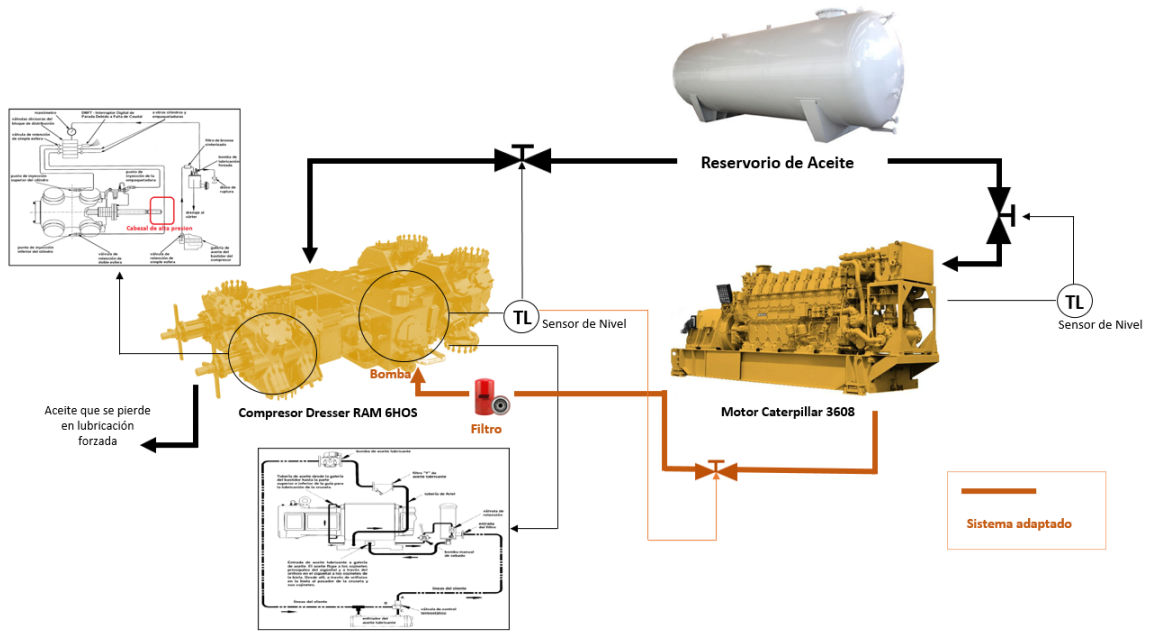
Figura 6. 22. Control de nivel para el motor estacionario.



Fuente: Elaboración propia

Partiendo de estos elementos se dispone a recrear la modelación por sistemas dinámicos y álgebra de bloques, a través de la representación esquemática inicial presentada en la figura 6.23 modificada de la figura 6.17 a continuación.

Figura 6. 23. Sistema rediseñado para ser modelado.



Fuente: Elaboración propia

Se presenta a continuación el modelamiento dinámico:

Balance de masa del tanque de reservorio.

$$-\rho_{oil}f_{1s}(t) = \rho_{oil}A_T \frac{\partial H_r(t)}{\partial t} \quad (1)$$

Donde  $\rho_{oil}$  es la densidad del aceite,  $f_{1s}(t)$  es el caudal de salida del tanque de reservorio hacia los demás equipos, siendo este variable en el tiempo,  $A_T$  es el área del fondo del tanque de reservorio,  $H_r(t)$  es la altura de nivel variable de aceite en el reservorio,  $t$  es el tiempo transcurrido.

A partir de esta ecuación se obtiene el caudal de salida.

$$f_{1s}(t) = f_m(t) + f_c(t) \quad (2)$$

$$f_m(t) = cv \sqrt{\frac{P_{atm} + \rho_{oil}gH_r(t) + \rho_{oil}gH_{tubo} - P_m}{\rho_{oil}g}} \quad (3)$$

$$f_c(t) = cv \sqrt{\frac{P_{atm} + \rho_{oil}gH_r(t) + \rho_{oil}gH_{tubo} - P_c}{\rho_{oil}g}} \quad (4)$$

Donde  $f_m(t)$  y  $f_c(t)$  son los caudales de ingreso de lubricación al del motor y al compresor,  $P_{atm}$  es la presión atmosférica,  $P_m$  es la presión al interior del carter del motor,  $P_c$  es la presión al interior del carter del compresor,  $H_{tubo}$  es la altura fija de tubería desde los equipos hasta el tanque reservorio, y  $cv$  es la constante de válvulas.

A continuación, se presenta el balance de masa para el motor estacionario.

$$\rho_{oil}f_m(t) - \rho_{oil}f_{msuc}(t) = \rho_{oil}A_m \frac{\partial H_m(t)}{\partial t} \quad (5)$$

Donde  $\rho_{oil}$  es la densidad del aceite que sale del carter del motor hacia la línea de succión del bombeo de lubricación forzada del compresor reciprocante,  $f_{msuc}(t)$  caudal del motor hacia la línea de succión del bombeo de lubricación forzada del compresor reciprocante,  $A_m$  área de fondo del carter del motor, y  $H_m(t)$  la altura de nivel del lubricante en el motor. Entonces.

$$f_{msuc}(t) = cv \sqrt{\frac{P_m + \rho_{oil}gH_m(t) - P_{suc}}{\rho_{oil}g}} \quad (6)$$

Donde  $P_{suc}$  es la presión en la línea de succión del bombeo hacia la lubricación forzada del compresor reciprocante.

El balance de masa hacia el carter del compresor está comprendido por la siguiente ecuación.

$$\rho_{oil}f_c(t) - \rho_{oil}f_{csuc}(t) = \rho_{oil}A_c \frac{\partial H_c(t)}{\partial t} \quad (7)$$

Donde  $\rho_{oil}$  es la densidad del aceite que sale del carter del compresor hacia la línea de succión del bombeo de lubricación forzada,  $f_{csuc}(t)$  caudal del compresor hacia la línea de succión del bombeo de lubricación forzada,  $A_c$  área de fondo del carter del compresor, y  $H_c(t)$  la altura de nivel del lubricante en el compresor.

Para la lubricación forzada estarían entrando además de la corriente normal del carter del compresor hacia el sistema de bombeo, entra a su vez el lubricante reposado en el carter del motor con el objetivo de renovar este de manera más constante, y así prolongar las paradas de reemplazo del lubricante reposado en el carter del motor, ya que este estaría siendo renovado. Se presenta el respectivo balance de masa de la lubricación forzada. Cabe destacar que la lubricación se hace hacia 3 cilindros.

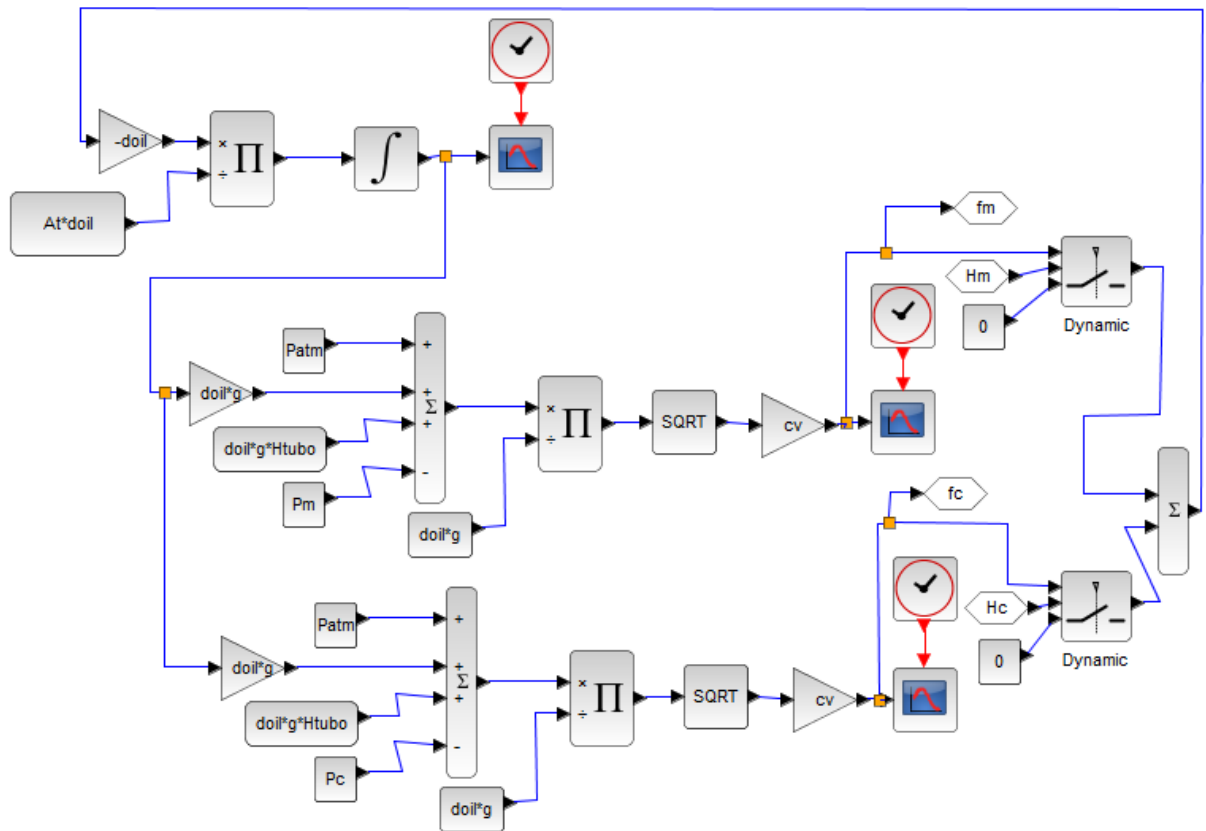
$$\rho_{oil}f_{csuc}(t) + \rho_{oil}f_{msuc}(t) - \rho_{oil}f_{psuc}(t) = 0 \quad (8)$$



La variable  $f_{psuc}(t)$  corresponde al caudal total perdido luego de la lubricación forzada de los pistones en los cilindros.

De la figura 6.24 a la figura 6.28 se presentan el sistema de bloques en modelado dinámico del sistema.

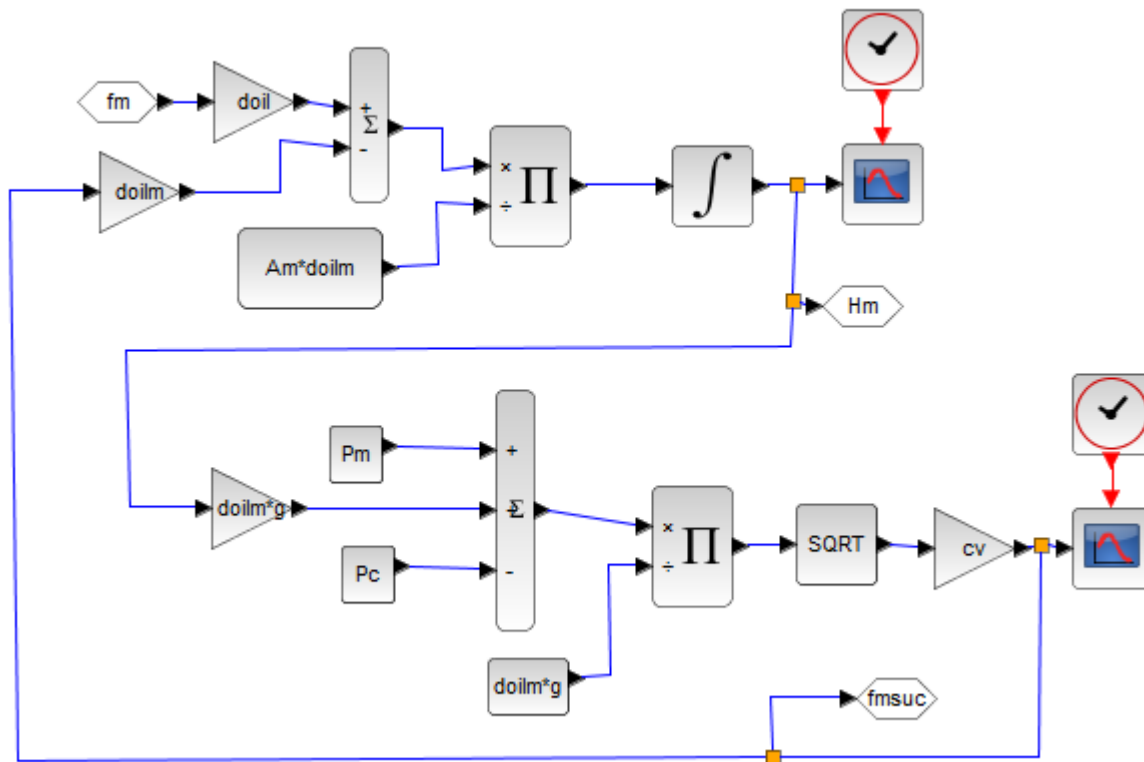
Figura 6. 24. Balance de masa del tanque de reservorio.



Fuente: Elaboración propia

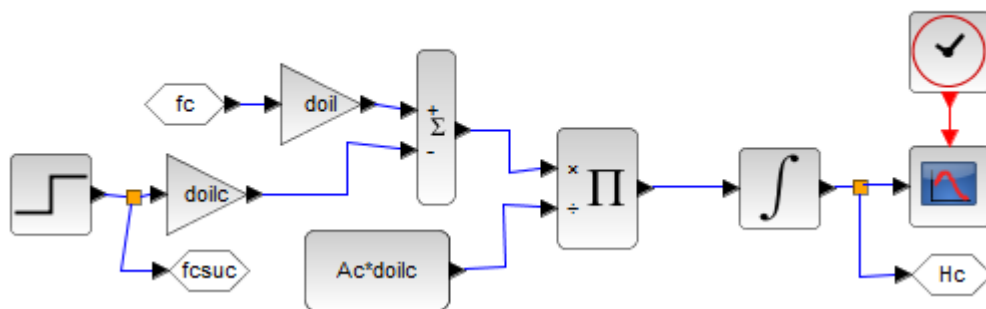
Como se puede observar en el esquema de la figura anterior se utilizan switches dinámicos para simular el comportamiento de apertura y cierre de válvulas con respecto a la altura de control tanto para el carter del compresor como para el motor.

Figura 6. 25. Balance de masa del carter del motor.



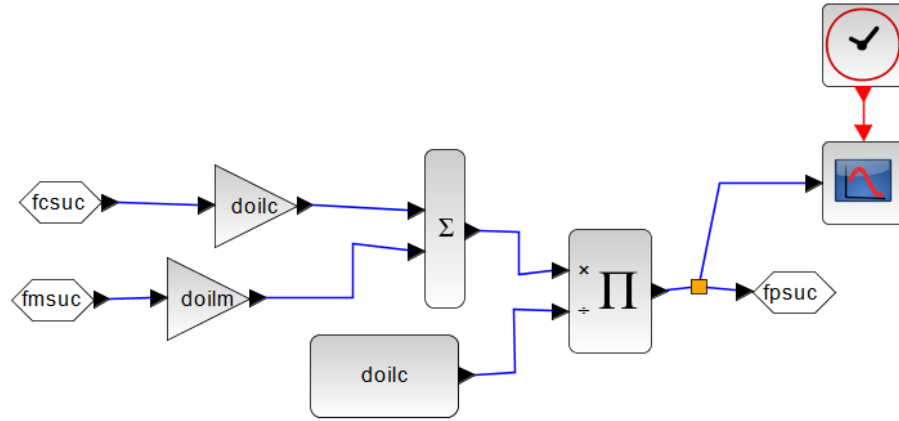
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. 26. Balance de masa del carter del compresor.



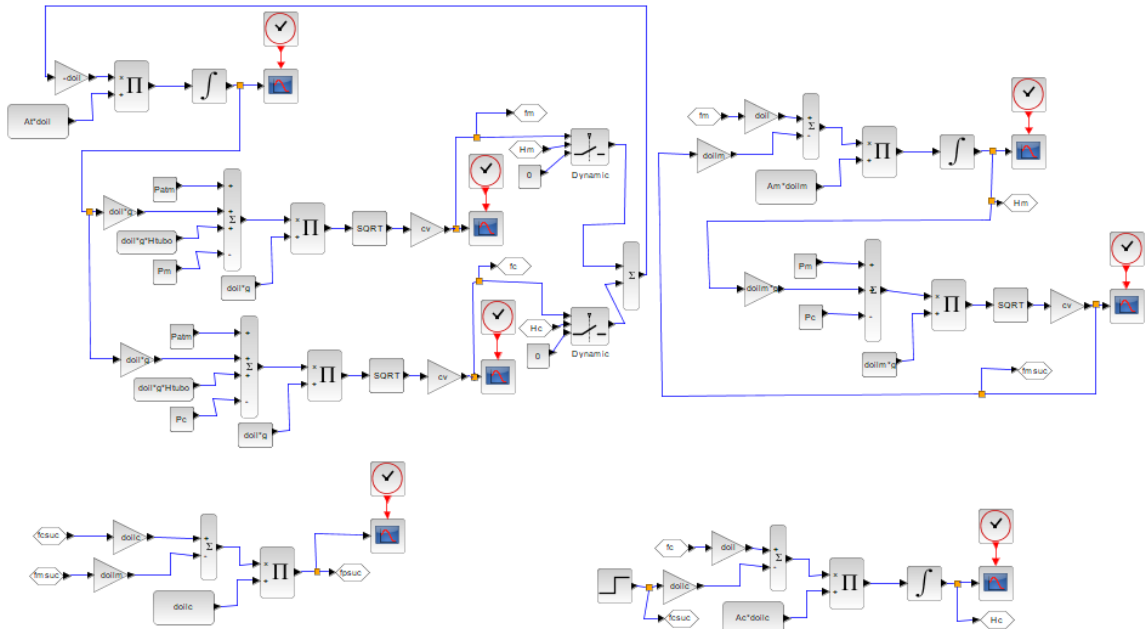
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. 27. Balance de masa de la bomba de lubricación forzada.



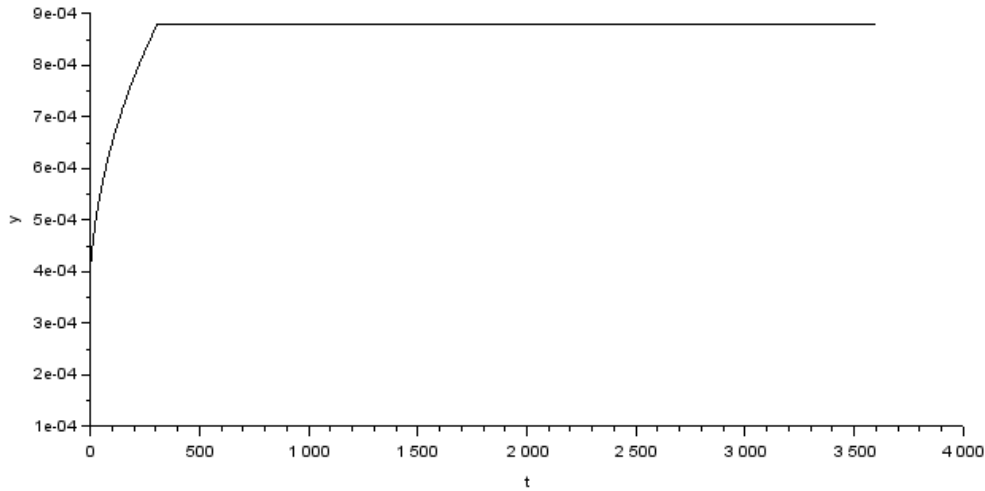
Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. 28. Sistema completo de modelamiento de bloques del sistema.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. 29. Caudal de lubricación forzada.

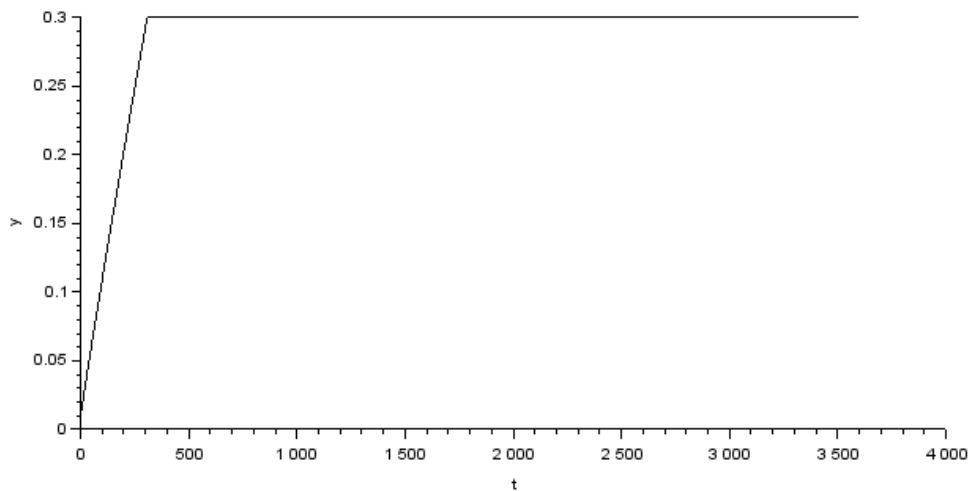


Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6.29 se muestra el caudal en el eje Y en unidades de  $m^3/s$ , utilizado en la lubricación forzada desde un inicio en el que el carter del compresor se encuentra en llenado hasta lograr la estabilidad de llenado en el mismo. Cabe destacar que este valor permanecerá constante dado a las condiciones de diseño de auto llenado de los sistemas de lubricación y el tiempo presentado en la figura se encuentra en unidades de segundos.

En la figura 6.30 se muestra el llenado del carter del motor hasta su estabilidad de la misma en continua operación. La altura presentada en el eje Y se encuentra en unidades de m.

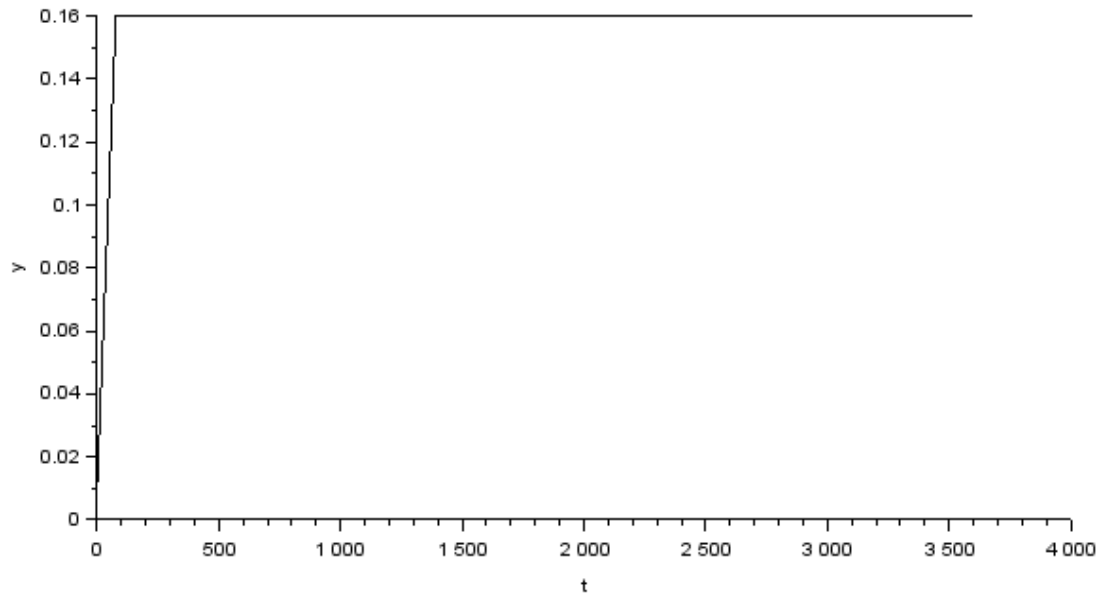
Figura 6. 30. Llenado de carter del motor



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6.31 se muestra el llenado del carter del compresor.

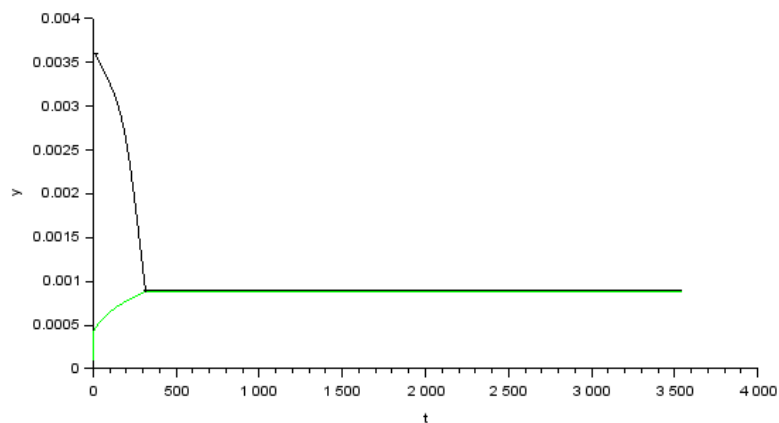
Figura 6. 31. Llenado del carter del compresor.



Fuente: Elaboración propia.

Este requiere menos tiempo el llenado de este componente dado que posee menos capacidad de almacenamiento y altura de control en comparación a la del carter del motor estacionario.

Figura 6. 32. Equilibrio de caudales en el sistema en continuo.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 6.32 se presenta la comparativa de caudales de reposición en color negro con respecto al desechado en la lubricación forzada en color verde, como se puede observar en

la figura para un proceso de relleno continuo y estable, al llenarse el carter del compresor hasta la altura de control el caudal de reposición sería equivalente al desechado en la lubricación forzada.

## CONCLUSIONES

- Se Realizó una caracterización del actual sistema de lubricación al grupo motor a gas natural – compresor de gas natural. Tomando como referencia el consumo normal estimado según datos del fabricante se espera un consumo de 51 galones al mes por equipo. En realidad, el consumo se duplica a 110 galones al mes por equipo. La posible explicación para esa diferencia, es que las condiciones operativas en la región son excesivas en relación las condiciones estándar que corresponden a lo definido por el fabricante. El exceso de consumo de 59 galones (110 – 51) al mes por equipo, representa 236 galones al mes para el grupo, valor aproximado a un barril al mes, equivalente a \$3.30.000 al mes en sobre costo.
- El rediseño se aplica al sistema de reposición de aceite al grupo motor – compresor. Básicamente, se reconfigura la succión de aceite de la bomba de alta presión, pasándola del cárter del compresor al cárter del motor. Para asegurar no afectar la vida útil por posible aumento de contaminantes al compresor se adiciona un sistema de filtrado.
- Al modificarse el sistema de reabastecimiento del aceite al conjunto motor – compresor, se logra reducir la cantidad de cambios anual de aceite del motor pasando de 8 a 4 cambios (reducción la mitad), logrando un ahorro anual real de

\$39.600.000 con una inversión de \$ 198.500, necesarios para agregar el componente de filtrado de aceite.

- Se realizó el modelado dinámico del sistema para una configuración rediseñada que cuenta con el uso de lubricante succionado directamente del carter del motor para el sistema de lubricación forzada, ajustando los complementos de control que permitan una operación continua sin afectar los niveles de control de lubricante en los equipos.

#### RECOMENDACIONES

- 1. es necesario al implementar la modificación propuesta, operar el sistema durante 5000 horas o 6 meses, lo que ocurra primero y extraer el aceite de los 4 conjuntos para establecer el real deterioro respecto a límites referenciados de contaminantes y definir los periodos para el cambio de aceite a los motores propulsores de las unidades compresoras de gas natural.



# ANEXOS

## **ANEXO A**

### **DESGASTE EN MOTOR OPERANDO CON GNV VERSUS GASOLINA.**

Fuente. Maussa A y Ortega L.

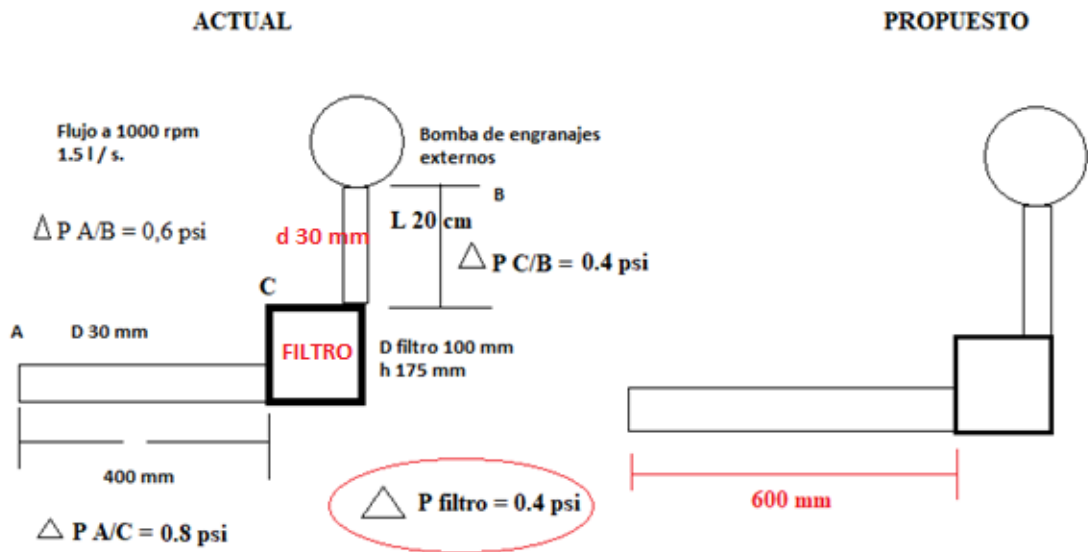
Los análisis de EAA se realizan en las muestras de aceite para determinar la concentración de los elementos hierro, aluminio, cobre, cinc, sodio, potasio y silicio. Los resultados demuestran que la velocidad de desgaste en términos generales es menor para la concentración de metales de desgaste en el motor funcionando a GNV en comparación con el que utiliza gasolina, la tasa de desgaste de los elementos aluminio, hierro y cobre es mayor en los vehículos que utilizan combustible tradicional con razones de 102 %, 107 % y 104 % respectivamente.

## ANEXO B

### SELECCIÓN DEL FILTRO DE ACEITE PARA NUEVA SUCCION

Para cambiar el punto de succión de la bomba del sistema de lubricación del compresor, primero se definen las características del actual sistema de succión, lo cual se muestra en la figura B1. Se ha medido el flujo en la salida del filtro con valor 1.5 L/s. La caída de presión entre C y B de 0.4 psi.

Figura B1. Sistema de bombeo y filtrado



Para la entrada al filtro, entre los puntos A y B, se tienen los siguientes cálculos:

$$A \text{ actual de flujo} = \frac{\pi}{4} D i^2 = \frac{\pi}{4} 30^2 = 706,85 \text{ mm}^2$$

$$Q = V * A$$

$$V = Q / A = (1000.000 \frac{\text{mm}^3}{\text{s}}) / 706,85 \text{ mm}^2 = 1415 \text{ mm} / \text{s} \text{ o } 1,415 \text{ m/s}$$

La viscosidad cinemática del aceite  $\nu = 17.8 \text{ cst} = 17.8 \frac{\text{mm}^2}{\text{s}}$

La viscosidad dinámica de  $0.3 \text{ kg/m.s}$

$$\text{Re} = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{1415 \cdot 30}{17.8} = 2384 \text{ se considera flujo laminar } < \text{Re} = 2300$$

Se aplica la ecuación de Poiseuille para flujo laminar, para estimar la caída de presión.

$$\Delta P = \frac{32 \cdot V \cdot L \cdot \mu}{D^2 \cdot g} = \frac{32 \cdot 1.415 \cdot 0.4 \cdot 0.3}{0.03^2 \cdot 9.81} = 615 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \text{ equivalente a } 0.875 \text{ psi}$$

Para la salida del filtro hasta la entrada la bomba, entre los puntos C y B. El cálculo de la caída de presión es.

$$\Delta P = \frac{32 \cdot V \cdot L \cdot \mu}{D^2 \cdot g} = \frac{32 \cdot 1.415 \cdot 0.2 \cdot 0.3}{0.03^2 \cdot 9.81} = 307.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \text{ equivalente a } 0.43 \text{ psi}$$

El valor medido de  $0.4 \text{ psi}$  define la validez del modelo de cálculo utilizado.

Para la opción propuesta el cambio es en la entrada al filtro, dónde la longitud requerida es de  $600 \text{ mm}$  o  $20 \text{ mm}$  adicionales. Ahora para mantener la misma caída de presión, se define calcular el diámetro del tubo nuevo que cumpla el requerimiento.

$$D = \frac{32 \cdot V \cdot L \cdot \mu}{\Delta P^2 \cdot g} = \frac{32 \cdot 1.415 \cdot 0.6 \cdot 0.3}{615^2 \cdot 9.8} = 34.2 \text{ mm. Se redondea valor comercial de } 34 \text{ mm.}$$

$$\text{El nuevo Re} = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{1415 \cdot 34}{17.8} = 2701. \text{ Aunque es mayor } \text{Re} = 2300, \text{ se considera}$$

valido el modelo porque aun es menor a  $4000$ , valor limite para iniciar flujo turbulento.

Se ha medido la caída de presión entre los puntos de entrada y salida del filtro, con valor de  $0.4 \text{ psi}$ . Teniendo en cuenta que el flujo de aceite medido para la bomba de alta presión fue de  $1 \text{ L/s}$ , se selecciona el filtro de aceite marca Partmo A309SP de servicio pesado con un flujo de  $1.5 \text{ L/s}$ , para una caída de presión de  $0.4 \text{ psi}$ . Observe

que la caída de presión del filtro recomendado en la figura B2 por el proveedor de lubricantes posee nuevo una caída de 0.2 psi, valor menor al medido, lo que implica largo tiempo en servicio antes que la suciedad incremente la presión hasta 0.4 psi. Las especificaciones técnicas son.

Figura B2. Filtro de aceite seleccionado



**A309SP**

Segmento:  
**TRANSPORTE PESADO /  
HEAVY DUTY**

**FILTRO DE ACEITE FLUJO  
COMPLETO, SPIN-ON**

Atributos del producto

Rosca	1x12 in
Rosca Racor	0
Altura	185 mm
Orificio de control de flujo	0 mm
Draing	NO
Sello central integrado	NO
Válvula de presión	0 psi
Válvula antidrenaje	NO
Tipo	SPIN-ON
Diámetro externo	107,8 mm
Tamaño Poro Nominal (Micras):	22
Flujo maximo	2 l/s
Caída de presión	0.2 psi

## Referencias Bibliográficas

- ArielCorp. (2021). *World standard Compressors*. <https://es.arielcorp.com/>
- CATERPILLAR. (2021a). *Base filtro de aceite*.  
[https://www.cat.com/es\\_MX/products.html](https://www.cat.com/es_MX/products.html)
- CATERPILLAR. (2021b). *Gas petroleum engine G3608*.  
[https://www.cat.com/es\\_MX/products/new/power-systems/oil-and-gas.html](https://www.cat.com/es_MX/products/new/power-systems/oil-and-gas.html)
- CMP. (2020). *Sistema de lubricación del motor Diesel*.  
<https://cursodeequipopesado.online/motor-diesel/sistema-de-lubricacion/>
- COBEY. (2021). *Hoss Compressors - Dresser-Rand*.  
[http://www.cobey.com/public/files/Authorized Compressor Brochures/HOSS \(Super Heavy Oilfield Separable Compressor\) Brochure.pdf](http://www.cobey.com/public/files/Authorized Compressor Brochures/HOSS (Super Heavy Oilfield Separable Compressor) Brochure.pdf)
- Corrales, J., & Lema, A. (2015). *Rediseño y construcción de un sistema de supervisión y control de lubricación centralizada, para los sistemas Reel, chumaceras y reductor Yankee, en la máquina de papel 5 (mp5), perteneciente a la empresa productos Familia del Ecuador*. (Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE).
- Guillén, L. (2007). *Procedimiento para el análisis de muestras de aceite usado en la agroindustria*. Tesis de maestría, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Ingersoll-RAND. (1984). *Instructions for operation and maintenance 5-1/2 inch Stroke RDS Compressors*.
- Lira, R. (2011). *DISEÑO DEL SISTEMA DE ALIVIO Y VENTEO DE LA PLANTA COMPRESORADE GAS LED-6 DE LA UNIDAD DE EXPLOTACIÓN ORITUPANO LEONA*. (Tesis de maestría, Universidad del Zulia).
- Lubri-Press. (2016). *Sistema de lubricación de alimentación forzada*.
- Mimbela, L. (2019). *Sistema de lubricación a base de niebla de aceite para rodamientos en equipos dinámicos (bombas centrifugas) en la refinería La Pampilla ubicado en la provincia del Callao*.
- Nieto, C., López, R., & Galvis, O. (1985). *Desmontaje de elementos de máquinas*.
- Partmo. (2021). *Filtro de Aceite Flujo Completo*.  
[https://partmo.com/catalog/filterquery.php?filter=A309SP&table=attributes\\_selladoenroscable](https://partmo.com/catalog/filterquery.php?filter=A309SP&table=attributes_selladoenroscable)
- Pérez, J. (2019). *CURSO DE MAQUINAS MECANICAS: Tema 5 Compresores*.
- Perico, N., Galarza, E., Díaz, M., & Arévalo, H. (2020). *Guía práctica de investigación en*

- ingeniería*. Corporación Universitaria Minuto de Dios.
- Ramón, P., & Aguillón, A. (2015). *Tribología y Lubricación*.
- RAMTOL. (2016). *Compresor Reciprocante API 618*.
- Reyes, G. (2017). *Compresores reciprocantes*.  
<https://es.slideshare.net/WillherPerozo/compresores-reciprocantes-79338354>
- Ruiz, J., & Esquivel, F. (2019). *Implementación sistema de lubricación por niebla en casa bomba*. (Tesis de especialización, Universidad Piloto De Colombia).
- Toapanta, O. (2009). *IMPLEMENTACIÓN DE UN ANÁLISIS DE MANTENIMIENTO BASADO EN CONDICIÓN DE LOS COMPRESORES RECIPROCANTES Y DE TORNILLO*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.