

Modelo de análisis de causa raíz (rca) aplicado al grupo electrógeno G3412 marca Caterpillar de  
la empresa Petroleum Blending International SAS ESP

Wisner Jiménez Maestre

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

Daniel Ortiz Plata

Magister en Gerencia de Mantenimiento

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico Químicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Programa Académico Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga

2023

### **Dedicatoria**

A mis padres por ser el pilar de mi vida, mi ayuda en todo momento y mi soporte incondicional.

A mis hermanos por brindarme el mejor ejemplo de lucha incansable, perseverancia y confianza en sí mismo.

A mis sobrinos que llenan mis días de amor, cariño y muchas sonrisas.

### **Agradecimientos**

Al Dios de la vida por brindarme la oportunidad de continuar formándome académica y técnicamente, a mi familia por entregarme todo su apoyo moral, ético y religioso, a la empresa Petroleum Blending International SAS ESP por hacerme parte de su equipo de trabajo y brindarme su apoyo económico para el desarrollo de la especialización, a mis compañeros de estudio con quienes se ha hecho un grupo responsable en pro del bien común y del cumplimiento de los objetivos y a todo el personal docente y administrativo de la Universidad Industrial de Santander quienes han brindado una formación profesional de posgrado de calidad.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
1. Problemática de investigación .....	16
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.2 Justificación del proyecto .....	17
1.3 Contexto organizacional .....	18
1.3.1 Petroleum blending international sas esp.....	18
1.4 Objetivo.....	18
1.4.1 Misión .....	18
1.4.2 Visión.....	18
1.5 Líneas de negociosas petroleum blending international sas esp.....	19
1.5.1 Energía eléctrica.....	19
1.5.2 Operación de plantas de generación .....	20
1.5.3 Gas natural comprimido.....	20
1.5.4 Condensados inestables .....	21
2.Contextualización del problema .....	22
3.Objetivos .....	25
3.1 Objetivo general.....	25
3.2 Objetivos Específicos.....	25
4.Ubicación geográfica de campo la punta .....	26
5.Marco referencial .....	33
5.1 Indicadores de gestión de mantenimiento.....	33

MODELO DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (RCA) APLICADO AL GRUPO ELECTRÓGENO G3412 MARCA CATERPILLAR	5
5.1.1 Disponibilidad.....	34
5.1.2 Mantenibilidad.....	35
5.1.3 Confiabilidad.....	35
5.1.4 Mean Time Between Shutdowns (MTBS).....	35
5.1.5 Mean Time To Repair (MTTR).....	36
5.2 Grupo electrógeno g3412.....	37
5.2.1 Tipos de potencia según el régimen de trabajo de los generadores.....	37
5.2.2 ESP (Emergency Standby Power).....	38
5.2.3 PRP (Prime Rated Power).....	38
5.2.4 LTP (Limited-Time Power).....	39
5.2.5 COP (Continuos Operating Power).....	39
5.3 Selección de potencia de grupos electrógenos.....	39
5.4 Factores ambientales y pérdida de potencia (derating).....	41
5.5 Modos de entrega de potencia de los grupos electrógenos.....	42
5.5.1 Modo isla independiente.....	42
5.5.2 Modo isla síncrona o gestión de energía.....	43
5.5.3 Modo red síncrona/potencia fija/carga base.....	43
5.5.4 Modo red síncrona: AMF (Automatic Mains Fault)/toma de carga.....	44
5.5.5 Sistema de admisión de aire.....	45
5.5.6 Sistema de escape.....	46
5.5.7 Sistema de refrigeración.....	46
5.5.8 Sistema de lubricación.....	48
5.5.9 Sistema de combustible.....	49

MODELO DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (RCA) APLICADO AL GRUPO ELECTRÓGENO G3412 MARCA CATERPILLAR	6
5.5.10 Sistema de arranque .....	49
5.5.11 Sistema de encendido.....	50
5.5.12 Sistema de control.....	51
5.5.13 Sistema de control CAT EMCP 4.2.....	51
5.5.14 Generador.....	52
5.5.15 Conjunto del volante .....	53
5.5.16 Sistema de control y sincronismo DEIF GPU .....	53
5.6 Relación entre la deformación térmica por temperatura de trabajo, dureza y metalografía del material .....	58
5.6.1 Deformación térmica por temperatura .....	58
5.6.2 Dureza .....	61
5.6.3 Metalografía.....	64
6.Desarrollo de la metodología de análisis de causa raíz.....	67
6.1 Registro de los equipos .....	68
6.2 Definir el fenómeno .....	72
6.3 Descripción del fenómeno .....	73
6.4 Desarrollo de la matriz Modo – Falla – Componente.....	73
6.5 Análisis de modo de falla y efectos (FMEA).....	74
6.6 Criticidad de equipos .....	75
6.7 Análisis por qué - porque .....	77
7.Conclusiones .....	83
Referencias bibliográficas.....	87
Apéndices.....	89

### Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Porcentaje de descuento del valor de la factura por incumplimiento de disponibilidad..	16
Tabla 2 Listado de componentes para reparación de culatas .....	56
Tabla 3 Listado de componentes para reparación de culatas .....	57
Tabla 4 Resultado de durezas en diferentes partes de la válvula .....	62
Tabla 5 Órdenes de servicio ejecutadas durante el período 2018 - 2023.....	69
Tabla 6 Histórico de mantenimiento por averías G3412 .....	70
Tabla 7 Las 5G's del TPM.....	72
Tabla 8 Formato 5W + 1H.....	73
Tabla 9 Matriz modo – falla – Componente .....	74
Tabla 10 Análisis de modos de falla y efectos G3412.....	75
Tabla 11 Matriz de Criticidad G3412 .....	76
Tabla 12 Cronograma 5W+2H .....	79

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Grupos electrógeno G3412.....	20
Figura 2 Sistema de distribución de potencia .....	20
Figura 3 Módulo de compresión y transporte de gas GNC .....	21
Figura 4 Tanques de almacenamiento de condensados inestables.....	21
Figura 5 Coordenadas de ubicación Campo La Punta 4.81397, -72.08053.....	26
Figura 6 Vista aérea Campo La Punta .....	27
Figura 7 Campos operados por el grupo empresarial Omega Energy .....	27
Figura 8 Datos de producción y estadísticas de reserva Campo La Punta.....	28
Figura 9 Producción total por bloque.....	29
Figura 10 Volumen de producción promedio diario Campo La Punta.....	30
Figura 11 Cargadero Campo La Punta.....	30
Figura 12 Pozos de producción Campo La Punta y locación Santo Domingo Maní – Casanare, Colombia.....	31
Figura 13 Facilidades Campo La Punta y pozos de producción Santo Domino Norte 1 y Santo Domingo Centro.....	32
Figura 14 Selección de potencia del grupo electrógeno según su uso .....	39
Figura 15 Reducción de potencia de grupos electrógenos dependiendo de la altitud de instalación .....	41
Figura 16 Sistema de admisión de aire G3412 .....	45

MODELO DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (RCA) APLICADO AL GRUPO  
ELECTRÓGENO G3412 MARCA CATERPILLAR

9

Figura 17 Sistema de escape .....	46
Figura 18 Cooler y silenciador de escape G3412 .....	47
Figura 19 Bomba de succión de aceite del cárter del motor .....	48
Figura 20 Postenfriador aceite cilíndrico horizontal en parte superior de los filtros de aceite 1R-1808 CAT.....	48
Figura 21 Válvula manual, electroválvula, válvula de diafragma de admisión de gas, cárter y válvula manual de bola para drenado de aceite del cárter .....	49
Figura 22 Sistema de arranque G3412.....	50
Figura 23 Control de ignición CAT .....	50
Figura 24 Sistema de control de velocidad.....	51
Figura 25 Panel de control CAT EMCP 4.2 .....	51
Figura 26 Generador CAT SR4B.....	52
Figura 27 Volante y carcasa del volante del motor.....	53
Figura 28 Grupo electrógeno G3412 .....	54
Figura 29 Descripción del grupo electrógeno serie G3400 .....	55
Figura 30 Culata.....	56
Figura 31 Culata repuestos 3 y 5.....	57
Figura 32 Lugar y dirección del perfil de durezas en la válvula en estudio .....	61
Figura 33 Perfil de durezas en la cabeza de la válvula .....	62
Figura 34. Microestructura de la cabeza de la válvula.....	64
Figura 35 Microestructura de la cabeza de la válvula.....	64
Figura 36 Microestructura en la parte central de la válvula.....	65
Figura 37 Dos tipos de técnicas para resolver los problemas .....	68

MODELO DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (RCA) APLICADO AL GRUPO ELECTRÓGENO G3412 MARCA CATERPILLAR	10
Figura 38 Generador Caterpillar modelo G3412 .....	68
Figura 39 Especificaciones planta eléctrica a gas natural modelo G3412.....	69
Figura 40 Gráfica comparativa de las órdenes de servicio ejecutadas con respecto a los cambios de culata .....	71
Figura 41 Las 5G's del TPM .....	72
Figura 42 Criticidad de equipos.....	75
Figura 43 Clasificación de averías.....	76
Figura 44 Análisis cinco por qué – porque .....	77
Figura 45 Causas raíz y los 5 modos de falla.....	78
Figura 46 Cinco modos de falla.....	78

### Lista de Apéndices

	<b>pág.</b>
Apéndice A Cromatografía gas de proceso – Campo la Repunta.....	89
Apéndice B Cotización de repuestos .....	90
Apéndice C Cotización de repuestos .....	91
Apéndice D Norma española UNE-EN-62740 .....	92

## Glosario

**Análisis de la criticidad de los equipos.** el análisis de la criticidad de los equipos de una empresa nos sirve para poder jerarquizar, por importancia, los elementos (sistemas) sobre los cuales vale la pena dirigir recursos (humanos, económicos y tecnológicos) (Pesantez, 2007).

**Actividades de un departamento de mantenimiento.** las actividades que se desarrollan en un departamento de Mantenimiento son diferentes en cada compañía, institución o empresa; tomando en consideración aspectos tales como: Número, tipo o tamaño de las edificaciones que utiliza en sus procesos productivos (Pesantez, 2007).

**Categorías consecuencias de fallas.** la valoración de las consecuencias de falla se debe llevar a cabo como si ninguna tarea específica se esté llevando a cabo actualmente para anticipar, prevenir o detectar la falla. (SAE-1011, 1999)

**Compromisos del área de mantenimiento.** dar más autonomía a los especialistas de cada una de las unidades técnicas de mantenimiento, permitiéndoles intervenir en las decisiones generales del área de mantenimiento y en las decisiones específicas del día a día (Pesantez, 2007).

**Modos de fallas.** el método utilizado para decidir que constituye un modo de falla es probable que debe ser aceptado por el encargado de la labor o usuario del activo. Las listas de los modos de falla (SAE-1011, 1999).

**Proceso de mantenimiento.** mantener en perfecto estado de conservación y operatividad todas las instalaciones mediante una organización adecuada de todas las labores de mantenimiento preventivo y predictivo (Pesantez, 2007).

### Resumen

**Título:** Modelo de análisis de causa raíz (RCA) aplicado al grupo electrógeno G3412 marca Caterpillar de la empresa Petroleum Blending International SAS ESP

**Autor:** Wisner Jiménez Maestre

**Palabras Clave:** Mantenimiento, falla, grupo electrógeno, producción, disponibilidad, confiabilidad, costos.

**Descripción:** La monografía muestra el desarrollo de un modelo de análisis de causa raíz (RCA) basado en la investigación de las múltiples fallas de la flota de motogeneradores CAT G3412 de la empresa PBI SAS ESP, realizada como plan de acción en vista de la necesidad de eliminar los impactos negativos en la producción de los campos petroleros y plantas de procesamiento de gas causados por la indisponibilidad de los grupos electrógenos que operan en los diferentes campos de la compañía, para mejorar las tendencias de los indicadores de disponibilidad, confiabilidad, tiempo medio entre fallas y costos de mantenimiento que permitan aumentar la utilidad de la organización. Este estudio está soportado por la información técnica que reposa en las hojas de vida de los equipos, complementado por el conocimiento y la experiencia del personal técnico y profesional de operaciones y mantenimiento de la compañía en el desarrollo de cada una de las etapas de la metodología, logrando proponer las recomendaciones necesarias con las cuales se puedan solucionar las fallas de los equipos de los centros de generación.

El plan de acción y sus recomendaciones será entregado a la gerencia, quien trabajando conjuntamente con los departamentos de operaciones y mantenimiento buscarán la mejor manera de romper los paradigmas y la cultura organizacional que nos afecta en la actualidad, mejorando el seguimiento y el análisis de todas las variables estudiadas con el objetivo de eliminar las fallas potenciales identificadas y encaminar todas las operaciones al ciclo de mejora continua.

### **Abstract**

**Title:** Root cause analysis model (rca) applied to the caterpillar brand g3412 generator set of petroleum blending international sas esp

**Author(s):** Wisner Jiménez Maestre

**Key Words:** production, availability, reliability, costs, generating set, trends, indicators, mean time between failures, maintenance.

**Description:** This monograph shows the development of a root cause analysis model (RCA) based in the research of multiple failures of fleet of motor generators CAT G3412 of the company PBI SAS ESP, done as an action plan to remove the negative impacts in production in oil fields and gas processing plant caused because of unavailability of generator sets which work in the different fields of the company, to improve the trends of availability, reliability, mean time between failures, and maintenance costs indicators, that could enhance utility of the company.

This investigation is supported by the technical information which is in the equipment CVs, supplemented with the knowledge of every stage of the methodology, achieving to propose needed recommendations helping to solve the equipment failures of generation sets.

The action plan and its recommendations will be delivered to the general management, who works jointly with the operation and maintenance área to look for the best way to break paradigms and organizational culture which is failing nowadays, improving the analysis and follow-up of all studied variables with the aim of erase identified potencial failures and lead the operation to continuous improvement cycle.

## **Introducción**

Los procesos productivos en los campos petroleros y plantas de tratamiento de gas donde opera la compañía dependen del servicio de energía eléctrica, por lo tanto, la disponibilidad y confiabilidad en la prestación del suministro son críticas para dar cumplimiento a los objetivos de utilidad y rentabilidad de los negocios de la empresa. Los grupos electrógenos G3412 son imprescindibles dentro del eslabón de la cadena del suministro eléctrico transformando la energía química y mecánica del motor en tensión por medio del alternador y transportándola hasta cada una de las facilidades con las cuales se extrae crudo y gas por medio de las líneas de distribución de las subestaciones eléctricas.

Cualquier falla en los motogeneradores afectará directamente los procesos productivos. La falla más representativa en los costos de mantenimiento de estos equipos está relacionada con los cambios frecuentes de culata, en la actualidad no existe en la compañía un estudio que permita encontrar las causas raíces asociadas a los múltiples fallos de las mismas y debido a esto surge la necesidad de desarrollar una metodología estructurada de análisis de causa raíz que permita encontrar el plan de acción y las recomendaciones para gestionar ante la gerencia las soluciones de las fallas asociadas y así garantizar mayor desempeño y efectividad de los equipos de generación.

## 1. Problemática de investigación

### 1.1 Planteamiento del problema

La falla más representativa dentro del costo de mantenimiento de la compañía son las fallas de los elementos de las culatas (rotocoil, resortes, válvulas de admisión, válvulas de escape, arandelas de chamber's y O-rings de chamber's) de los generadores G3412 marca CAT. Cada vez que uno de estos elementos falla, ocasiona la salida del motor y a su vez la indisponibilidad del equipo generando la pérdida de utilidad por el uso de los generadores diésel para respaldar la operación con el fin de mantener la carga contractual del campo (1200 Kw/h) y las bombas del sistema de inyección a la frecuencia máxima de trabajo (60 Hz). Si no se cumple la condición de carga contractual, además de la pérdida de utilidad por el pago del combustible diésel que a su vez es más costoso que el gas natural comprimido (GNC), la utilidad de la operación también se afecta al ejecutarse las penalidades de las cláusulas contractuales debido al incumplimiento de disponibilidad y confiabilidad que al momento de realizar el cierre de facturación se descuentan del valor total de la factura de generación de energía eléctrica de la operación del campo.

**Tabla 1**

*Porcentaje de descuento del valor de la factura por incumplimiento de disponibilidad*

Rango de incumplimiento	Disponibilidad Mes	% de Descuento
1	<98.5% y ≥95%	5
2	<98.5% y ≥90%	10
3	<98.5% y ≥85%	20
4	<98.5% y ≥50%	50
5	<=50%	60

*Nota.* Porcentaje de descuento por incumplimiento de disponibilidad. Tomado de Contrato de generación de energía eléctrica Campo La Punta. Sección 29.1 IDPM.

## **1.2 Justificación del proyecto**

Debido al impacto económico generado por las diversas fallas asociadas al sistema de generación, las pérdidas de producción del cliente y la reducción de utilidad de la empresa contratista encargada de la energía de los procesos productivos, la compañía se ve en la constante necesidad de implementar estrategias de mantenimiento que nos permitan mejorar la gestión de activos, aumentar la disponibilidad y la confiabilidad operacional de los proyectos haciendo uso eficiente del talento humano, las máquinas herramientas y el capital invertido.

La investigación en curso pretende proponer un modelo de RCA cuyo objetivo sea identificar los malos actores dentro de los diferentes procesos de generación de energía para reducir al máximo las fallas en los equipos y con ello aumentar los tiempos de disponibilidad de los grupos electrógenos.

Actualmente la empresa Petroleum Blending International no cuenta con una metodología estructurada que permita realizar el estudio de las fallas en sus equipos y debido a la pérdida de utilidad ocasionada por las mismas se hace necesario desarrollar una metodología de investigación a las fallas funcionales que aquejan a la compañía de manera reactiva y llevarlo a un enfoque preventivo – proactivo, donde además de documentarse la falla, se tabulen los datos, se realice tratamiento a la información haciendo uso de las nuevas tecnologías, se mejore la toma de decisiones con base a la información tratada y nos permita medir los resultados obtenidos de la gestión gerencial del departamento de mantenimiento y dar cumplimiento a los indicadores de disponibilidad y confiabilidad contractuales.

### **1.3 Contexto organizacional**

#### **1.3.1 Petroleum blending international sas esp**

Es una empresa pionera en el aprovechamiento de los gases producidos por medio de la extracción de crudo. Por ello nos hemos especializado en la recuperación de los gases excedentes generados en los procesos de operación de los campos petroleros contribuyendo con la preservación del medio ambiente evitando las quemaduras de estos gases los cuales afectan el entorno, así mismo trabajamos de la mano con las comunidades del área de la influencia.

Generamos gracias al proceso de limpieza realizado al gas natural subproductos líquidos a través de adecuadas prácticas operacionales. PBI (2022) las cuales son encaminadas a producir de manera eficiente reduciendo y mitigando el impacto que estas puedan ocasionar al entorno.

### **1.4 Objetivo**

Aprovechamiento de los recursos naturales y las nuevas oportunidades que surgen en el mercado.

#### **1.4.1 Misión**

Mover el mundo a través de la transformación de energía, el aprovechamiento de recursos naturales, el óptimo uso de nuevas tecnologías y el cuidado del ambiente. Generando impacto positivo en los seres humanos y nuestro entorno. PBI (2022).

#### **1.4.2 Visión**

Consolidarse durante el periodo de 2020 – 2030 como una organización líder en las Américas en transformación de energía, soportada por una matriz energética diversificada, orientada a la generación de valor y sostenibilidad (PBI, 2022).

### **1.5 Líneas de negocios petroleum blending international sas esp**

Las líneas de negocio con las que contamos están encaminadas a suplir las necesidades, el mercado nacional, garantizando así la evolución de la economía de la región.

- Gasolina natural
- Gas licuado de petróleo
- Gas natural
- Gas natural comprimido
- Energía eléctrica
- Condensados inestables
- Operación de plantas de generación
- Plantas de tratamiento de gas natural
- Renta de equipos

Somos parte del grupo empresarial “Omega Energy Colombia” conformado por la empresa Nikoil Energy Suc Colombia, unión temporal omega energy (utoe) y petroleum Blending International SAS ESP (PBI SAS ESP)”. (PBI, 2022).

A continuación, se realiza una breve descripción de los procesos en los cuales impacta el estudio de caso del análisis de monografía

#### **1.5.1 Energía eléctrica**

Contamos con una flota de equipos de generación con diferentes tipos de combustible, entre ellos: Diesel, Glp, Gas Natural y Sistema By Fuel. Con capacidad de entrega entre 250 kw a 750 kw de diferentes marcas del mercado. Lo anterior como solución aislada a fin de satisfacer las necesidades de los campos petroleros.

### Figura 1

*Grupos electrógeno G3412*



*Nota.* Sistema de sincronismo G3412. Tomado de PBI. 2022

#### 1.5.2 Operación de plantas de generación

Operamos plantas de generación a Diesel y GNC desde 300 kilovatios hasta 1 mega por equipo las cuales mediante un sistema de transferencia de energía producen electricidad por la conversión de energía mecánica en energía eléctrica. Los generadores para el uso industrial trabajan con corriente para la transformación en energía como fuente de solución aislada. (PBI, 2022)

### Figura 2

*Sistema de distribución de potencia*



*Nota.* Sistema de distribución de potencia. Tomado de PBI. 2022.

#### 1.5.3 Gas natural comprimido

Se reconoce como GNC (Gas Natural Comprimido) a un tipo de combustible destinado al uso en vehículos, el cual se destaca por ser económico y tener un menor impacto ambiental en

comparación con los combustibles líquidos. Debido a estas características favorables, se considera una opción sostenible para reemplazar los combustibles convencionales. El GNC se almacena a presiones elevadas. (PBI, 2022) cómo se observa en la figura 3.

### Figura 3

*Módulo de compresión y transporte de gas GNC*



*Nota.* Módulo de compresión de gas y transporte GNC. Tomado de PBI. 2022

#### 1.5.4 Condensados inestables

Es una etapa en la cual se encuentra un líquido de hidrocarburos con una gravedad API alta y una baja densidad, generalmente asociado al gas natural. La existencia de esta fase líquida depende de las condiciones de temperatura y presión presentes en el yacimiento, las cuales permiten que el vapor se condense en forma de líquido. (PBI, 2022).

### Figura 4

*Tanques de almacenamiento de condensados inestables*



*Nota.* Tanques de almacenamiento de condensados inestables. Tomado de PBI. 2022

## **2.Contextualización del problema**

En los entornos administrativos de las empresas dedicadas a la producción o prestación de servicios, es crucial contar con una estructura de gestión del área de mantenimiento que se ajuste a los lineamientos organizacionales y garantice el cumplimiento de los compromisos adquiridos con los clientes en términos de manufactura, producción, infraestructura, calidad, entre otros aspectos. La planificación desempeña un papel fundamental en cualquier área de la empresa, ya que previene y clarifica los alcances internos. Por lo tanto, cada proceso empresarial debe contar con una planificación especializada basada en las actividades generales de la empresa, fomentando así la calidad interna y una buena gestión.

Para el caso específico del mantenimiento, se recomienda llevar a cabo un análisis de la gestión de activos, compras, proveedores, personal, técnicas de mantenimiento e indicadores de seguimiento. Esto permite desarrollar los planes de acción necesarios para cumplir con las políticas y niveles de servicio establecidos, así como lograr un uso eficiente de los recursos y obtener resultados oportunos y adecuados. En línea con lo mencionado, la empresa Petroleum Blending International SAS ESP realizó un diagnóstico del estado actual de sus equipos e infraestructura, con el objetivo de comprender el alcance y la responsabilidad del área de mantenimiento. También se registraron los procesos generales y complementarios de mantenimiento para identificar las capacidades y mediciones aplicadas, así como los componentes externos involucrados.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis de las estrategias de gestión existentes para comprender el enfoque de trabajo antes de implementar los nuevos procedimientos. Otra consideración importante es identificar quiénes son los clientes internos y los proveedores de equipos. Por último, es crucial conocer los diferentes tipos de mantenimiento que se realizan para comprender cómo se distribuye la atención a los requerimientos y cómo se previenen y pronostican posibles fallos.

Todo esto tiene como objetivo determinar el modelo de gestión más adecuado, reconociendo que se requiere un profundo conocimiento de la empresa, su contexto y la actividad que se busca gestionar. Así, se puede llevar a cabo una intervención enfocada en las fallas reales y aprovechar las fortalezas existentes, permitiendo que las áreas que funcionan correctamente continúen su curso mientras se realizan las correcciones necesarias. Como resultado del diagnóstico, se ha identificado que las fallas más significativas en términos de costos de mantenimiento de la compañía están relacionadas con los componentes de las culatas (rotocoil, resortes, válvulas de admisión, válvulas de escape, arandelas de chamber's y O-rings de chamber's) de los generadores G3412 de la marca CAT.

Desde la fundación de la empresa hace aproximadamente 12 años, el área de mantenimiento ha carecido de suficiente personal administrativo y técnico. Esto ha resultado en la ausencia de una estructura definida para el área y la falta de directrices claras para llevar a cabo las actividades de mantenimiento. Como consecuencia, se han observado deficiencias en las actividades a altos costos, una baja credibilidad en el área y un deterioro cada vez más evidente en el rendimiento de los equipos y la infraestructura. Por lo tanto, es necesario comenzar a

desarrollar un análisis técnico de las fallas que permita mejorar el estudio y la planificación organizada y programada de las fallas actuales. Esto contribuirá a lograr el mantenimiento de las instalaciones y equipos, basándose en los principios de disponibilidad de equipos, eficiencia y eficacia del área, en el marco del proceso administrativo y respondiendo a las necesidades administrativas, normativas, técnicas y de comunicación de la compañía. El objetivo es encontrar las soluciones más adecuadas para abordar los problemas en el seguimiento de las operaciones y el mantenimiento, al tiempo que se busca reducir los tiempos y optimizar los flujos de materiales e información de acuerdo con los requisitos organizacionales.

La empresa Petroleum Blending Intenational SAS ESP dentro de su reestructuración e inversión en los departamento de operaciones y mantenimiento contrató a 3 operadores de generación y 3 mecánicos para distribuirlos en los centros de trabajo bajo la supervisión de operaciones con el objetivo de aumentar el personal idóneo en los proyectos, asignar responsabilidades y brindar apoyo al personal existente en la consecución de los objetivos, inició a brindar capacitaciones a sus empleados en el manejo de herramientas y realizó la compra del software Fracttal para mejorar la gestión de mantenimiento Esto permitirá una mejor estimación de los gastos periódicos, lo cual resultará útil para la gerencia financiera alineando los gastos con los objetivos corporativos. También se logrará optimizar la utilización de los recursos disponibles, coordinar y planificar las intervenciones en equipos y ubicaciones, así como contratar proveedores y mejorar el rendimiento general del área de mantenimiento. Para este caso, nos centraremos en realizar el estudio a los grupos electrógenos ubicados en el campo La Punta del municipio de Maní – Casanare.

### **3.Objetivos**

#### **3.1 Objetivo general**

Desarrollar una metodología de análisis de causa raíz (RCA) y aplicarlo al grupo electrógeno G3412 marca Caterpillar de la empresa Petroleum Blending International SAS ESP para aumentar la disponibilidad y confiabilidad operacional

#### **3.2 Objetivos Específicos**

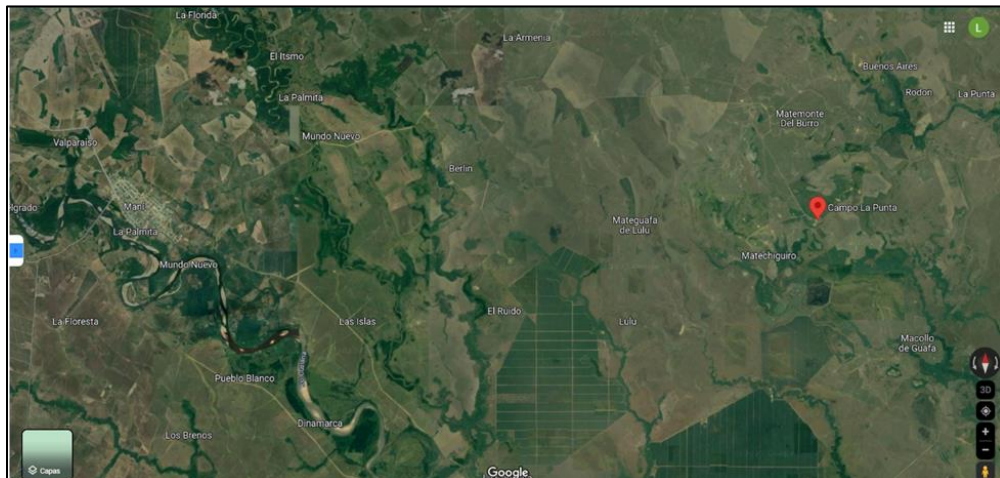
- Realizar el estudio del arte del tema propuesto para la monografía
- Recopilar el histórico de fallas del grupo electrógeno G3412
- Identificar las fallas presentadas del grupo electrógeno G3412
- Proponer un procedimiento de análisis de causa raíz (RCA) para la empresa Petroleum Blending International
- Aplicar los pasos del análisis de causas raíz en el grupo electrógeno G3412
- Establecer el plan de acción para eliminar los malos actores que producen las fallas repetitivas en los equipos

#### 4. Ubicación geográfica de campo la punta

Bloque La Punta está ubicado en la cuenca de los Llanos Orientales como se observa en la figura 5, la más prolífica en el país. Amplia experiencia en la Cuenca y en la operación del Bloque. Contrato de servicios de Operación y Mantenimiento de Producción con Hocol Facilidades pertenecientes al Grupo Omega Energy. Esta sección se subdivide en dos zonas: el Campo de Exploración de La Punta (ver figura 6), actualmente en fase de exploración y evaluación, y el Campo de Desarrollo La Punta, en fase de producción y desarrollo. Omega Energy Colombia y Nikoil Energy Corp., como miembros de la Unión Temporal Omega (UTO), tienen la responsabilidad de llevar a cabo la exploración delegada en este bloque dentro del Volumen Exploratorio (Omegaenergy, 2023).

#### Figura 5

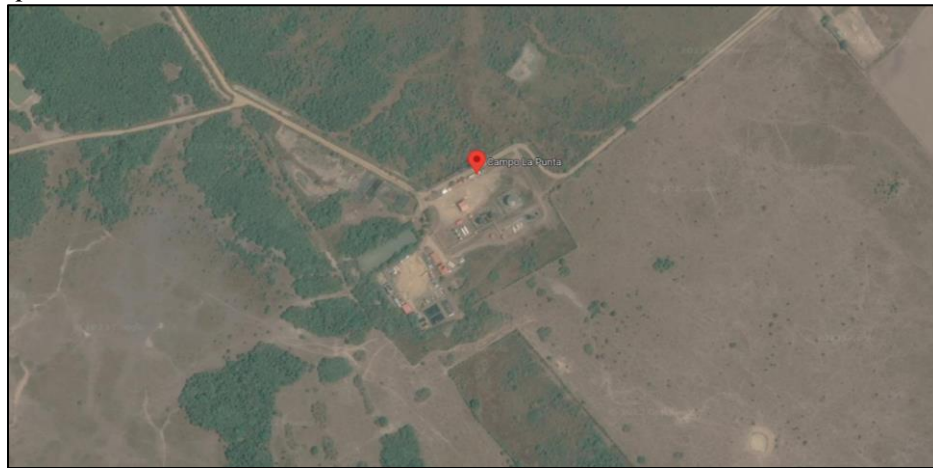
*Coordenadas de ubicación Campo La Punta 4.81397, -72.08053*



*Nota.* Coordenadas de ubicación campo La Punta. Tomado de <https://www.google.com/maps/>

**Figura 6**

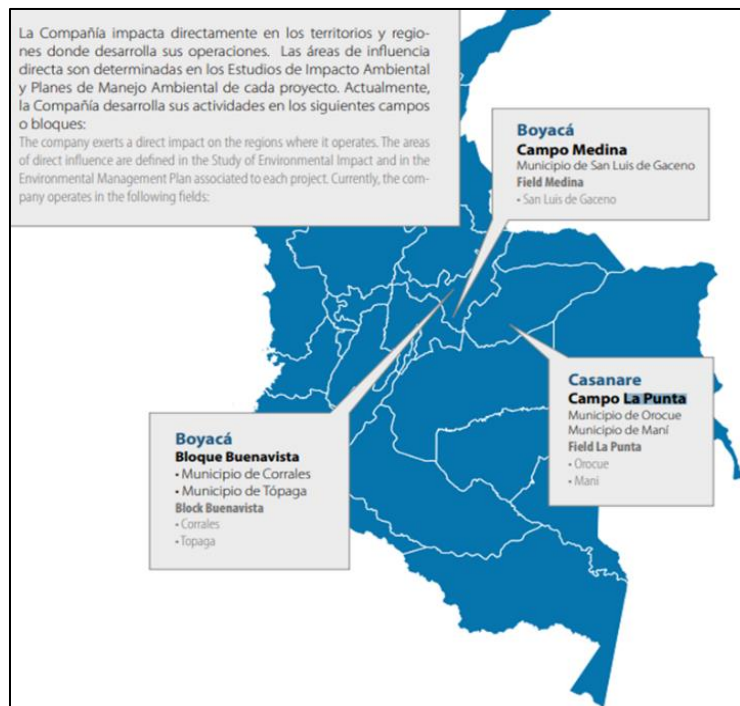
*Vista aérea Campo La Punta*



*Nota.* Vista aérea Campo La Punta. Tomado de <https://www.google.com/maps/place/Campo+La+Punta/@4.8094816,-72.0923358,3761m/data=!3m1!1e3!4m6>.

**Figura 7**

*Campos operados por el grupo empresarial Omega Energy*



*Nota.* Distribución de operaciones a nivel nacional del Grupo empresarial Omega Energy. Tomado de reporte de sostenibilidad Omega Energy Group 2018 – 2019 página 21.

En 2011 se perforó un pozo y durante 2012 se perforaron tres pozos adicionales, lo que resultó en un aumento en la producción del campo. A partir de 2013 hasta 2014, se llevaron a cabo interpretaciones sísmicas que permitieron la identificación y perforación de dos pozos exitosos. Es importante destacar que el mapeo obtenido a partir de estas interpretaciones sísmicas, combinado con la información de los pozos existentes, condujo a un incremento significativo en las reservas de crudo en el Campo Santo Domingo. Las reservas P1 aumentaron en un 805.0%, las P2 en un 636.8%, y las P3 en un 408.9%. En cuanto al gas, las reservas estimadas fueron de P1 en un 519.4%, P2 en un 693.9% y P3 en un 324.3%. Esta operación es compartida entre Vetra y Unión Temporal Omega Energy (Energy, 2014, pág. 14).

Para el año 2015 estos son los datos de producción que se tienen se pueden observar en la figura 8:

### Figura 8

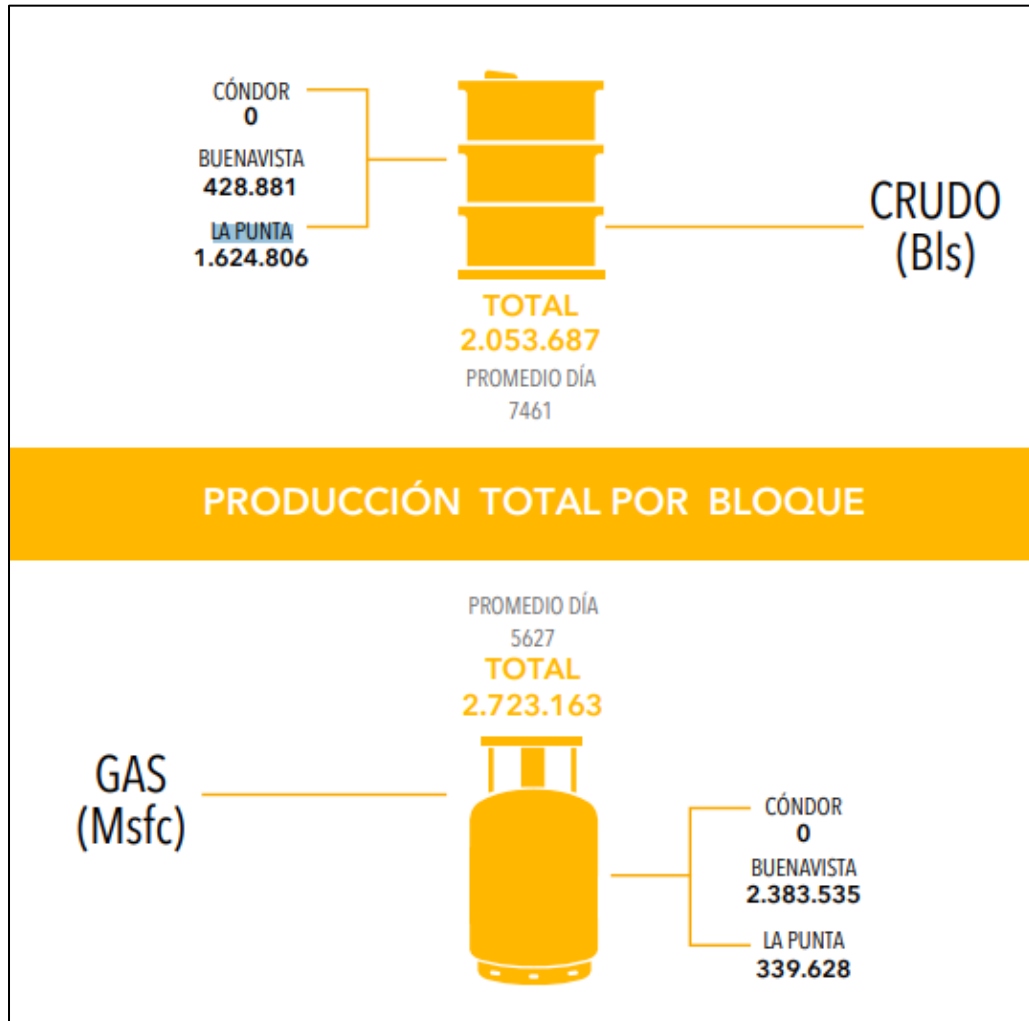
*Datos de producción y estadísticas de reserva Campo La Punta*



*Nota.* Datos de producción y estadísticas de reserva Campo La Punta. Tomado de Reporte de sostenibilidad 2015, página 22.

**Figura 9**

*Producción total por bloque*

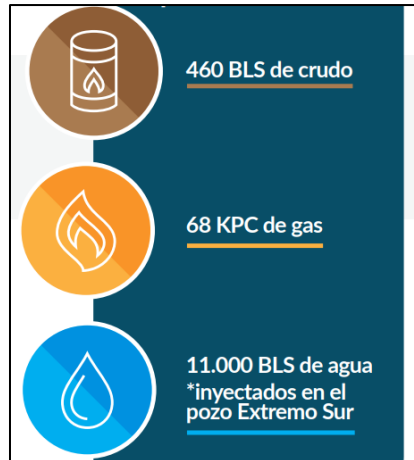


*Nota.* Producción total por bloque. Tomado de Reporte de sostenibilidad 2015, página 93.

De acuerdo a la figura 9 para el año 2016 En el Bloque La Punta se dio inicio de la recolección del gas y producción de gasolina natural y LPG, como insumo para nuestras operaciones. (Energy, 2014, pág. 40).

**Figura 10**

*Volumen de producción promedio diario Campo La Punta*



*Nota.* volumen de producción promedio diario Campo La Punta. Tomado de reporte de sostenibilidad 2016 Omega Energy Group página 40.

En el campo La Punta, entre los años 2016 y 2019, se ha utilizado aproximadamente 9.721 m<sup>3</sup> de gas al día para fines de cogeneración y aprovechamiento de condensados inestables, como se muestra en la figura 10. Esta utilización ha evitado la emisión de alrededor de 20 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente al día. (Energy, 2014, pág. 20).

**Figura 11**

*Cargadero Campo La Punta*



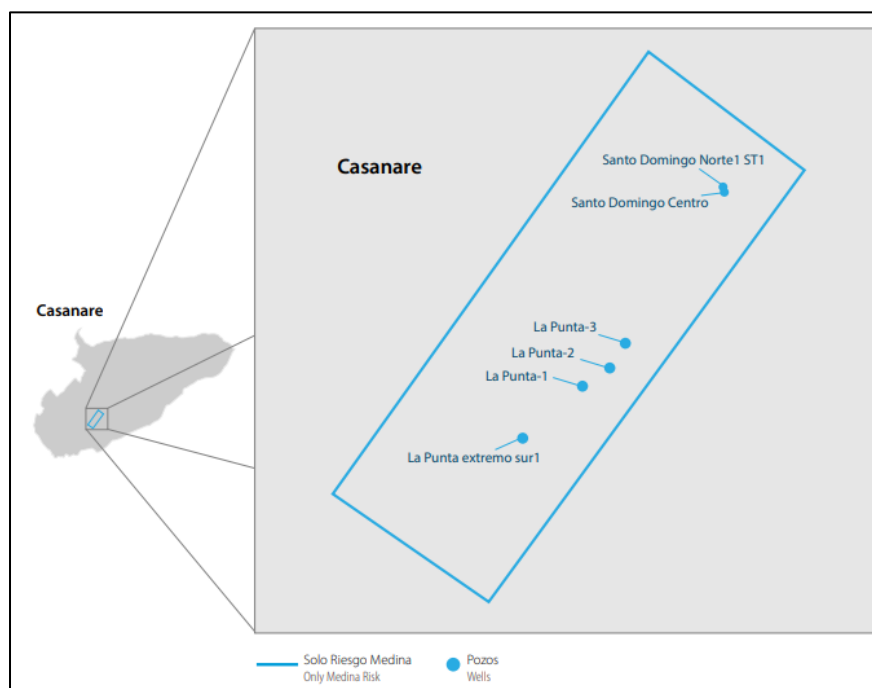
*Nota.* Cargadero Campo La Punta. Tomado de reporte de sostenibilidad 2020 Omega Energy Group página 21

Es una entidad colombiana dedicada al sector de la energía que trabaja en colaboración con otras empresas asociadas para lograr altos estándares de calidad y seguridad operativa. Nuestro objetivo principal es generar y preservar valor tanto para nuestros clientes como para todas las partes interesadas involucradas. Para lograrlo, nos comprometemos a adoptar nuevas y mejores prácticas que contribuyan a la sostenibilidad de nuestra compañía y de los entornos en los que llevamos a cabo nuestras operaciones. (Energy, 2019, pág. 21).

Desde el 2021 hasta la fecha, prestamos servicios de operación y mantenimiento de los campos Santo Domingo y La Punta para una de las filiales del grupo Ecopetrol, a través de la empresa aliada Nikoil Energy Colombia (Energy, 2019, pág. 17) .

### Figura 12

*Pozos de producción Campo La Punta y locación Santo Domingo Maní – Casanare, Colombia*



*Nota.* Pozos de producción Campo La Punta y locación Santo Domingo Maní – Casanare,  
Colombia. Tomado de reporte de sostenibilidad 2018-2019 Omega Energy Group Página 23

**Figura 13**

*Facilidades Campo La Punta y pozos de producción Santo Domingo Norte 1 y Santo Domingo  
Centro*



*Nota.* Facilidades Campo La Punta y pozos de producción Santo Domingo Norte 1 y Santo  
Domingo Centro. Tomado de Reporte de sostenibilidad 2018-2019 Omega Energy Group Página

## **5.Marco referencial**

### **5.1 Indicadores de gestión de mantenimiento**

El objetivo principal y la responsabilidad fundamental del departamento de mantenimiento consiste en mantener el equipo en condiciones óptimas para evitar fallos. La eficacia y la máxima calidad son elementos esenciales en el trabajo de mantenimiento. Una de las herramientas clave para lograrlo es la medición del rendimiento. Para ser efectivas, las métricas de rendimiento deben brindarnos una imagen precisa de nuestro desempeño en relación con metas establecidas o en comparación con un punto de referencia global. Además, estas métricas deben proporcionarnos una predicción o proyección de cómo esperamos que sea nuestro rendimiento en el futuro. (Drummond, 2015, pág. 34).

Los indicadores de rendimiento se refieren al conjunto de actividades que involucran la recopilación, análisis, interpretación y presentación de datos de manera cuantitativa. Estos indicadores nos permiten medir y comparar nuestro desempeño con respecto a metas establecidas o a un punto de referencia, como un benchmark relacionado con métricas de clase mundial. (Drummond, 2015).

El rendimiento de cualquier equipo se ve afectado por tres factores críticos: el diseño del producto, la aplicación en la que se utiliza y el mantenimiento realizado a lo largo de su vida útil. El mantenimiento, en particular, brinda la mejor oportunidad para influir y controlar el rendimiento de los equipos, ya que los fabricantes diseñan los equipos para condiciones de operación específicas y proporcionan recomendaciones generales para las tareas de mantenimiento. Además, la aplicación de los equipos puede variar considerablemente y las condiciones de operación pueden cambiar con el tiempo. Por lo general, estas condiciones se

vuelven más exigentes a medida que la mina se adentra en profundidad. Por lo tanto, es el usuario final quien tiene un gran poder para influir en el rendimiento de los equipos. (Flores & Mccaherty, 2007, pág. 13).

### 5.1.1 Disponibilidad

La disponibilidad de un equipo se refiere al tiempo total en el que el equipo opera de manera satisfactoria, incluyendo el tiempo en el que puede trabajar sin problemas durante un período de inactividad. El principal objetivo del mantenimiento científico es lograr la máxima disponibilidad de todos los equipos. La disponibilidad se define como la probabilidad de que un equipo o sistema sea capaz de funcionar satisfactoriamente durante un período de tiempo determinado. La disponibilidad depende tanto de la confiabilidad como de la facilidad de mantenimiento. Establecer una alta disponibilidad implica minimizar al máximo el número de paradas para lograr una operación exitosa, eficiente y rentable. En la mayoría de los casos, mejorar la confiabilidad y la facilidad de mantenimiento conlleva una mayor inversión inicial, pero resulta en una mayor disponibilidad del equipo a lo largo de su vida útil y, como resultado, en un menor costo total del ciclo de vida. (Flores & Mccaherty, 2007, pág. 15).

Es la relación entre el MTBS entre la suma del MTBS y MTTR y se expresa en porcentaje:

$$A(\%) = \frac{MTBS}{MTBS + MTTR} * 100$$

Caterpillar define la disponibilidad como la proporción del tiempo en el que una máquina puede operar eficientemente (horas disponibles) en relación con el total de horas en un período determinado (horas calendario o programadas).

$$A(\%) = \frac{\text{Total Tours (calendar or scheduled)} * \text{Downtime hours}}{\text{Total Hours (calendar or scheduled)}} * 100$$

### 5.1.2 Mantenibilidad

La mantenibilidad se refiere a la probabilidad de que un equipo pueda ser restaurado a condiciones operativas dentro de un período de tiempo determinado, cuando se realiza el mantenimiento siguiendo procedimientos predefinidos. También implica la probabilidad de que un equipo que ha experimentado una falla pueda ser reparado en un período de tiempo específico. La mantenibilidad se caracteriza por el "tiempo promedio de reparación". (Flores & Mccaherty, 2007, pág. 16)

### 5.1.3 Confiabilidad

La confiabilidad se refiere a la probabilidad de que un equipo no experimente fallas durante un período de tiempo específico. El tiempo promedio entre fallas (TPEF) es un indicador de confiabilidad, donde un valor más alto de TPEF indica una mayor confiabilidad. La confiabilidad se incorpora desde el diseño inicial del equipo o sistema. (Flores & Mccaherty, 2007, pág. 16).

### 5.1.4 Mean Time Between Shutdowns (MTBS)

El tiempo promedio entre paradas es el tiempo promedio que transcurre entre cada interrupción de una máquina o función, y se expresa en horas. Este indicador combina la confiabilidad inherente de la máquina con la eficacia del equipo de mantenimiento para prevenir o evitar problemas.

$$MTBS = \frac{\text{Operating Hours}}{\# \text{ Shutdowns}}$$

El tiempo promedio entre paradas es el intervalo de tiempo más probable entre el inicio de la operación de un equipo y la ocurrencia de una falla. Es el tiempo promedio que transcurre hasta que se produce la falla. A medida que este valor aumenta, se incrementa la confiabilidad del equipo.

Caterpillar lo considera como uno de los parámetros de medición más importantes para evaluar equipos. Se calcula dividiendo el total de horas de operación entre el número de paradas. Las horas de operación se obtienen del medidor de la máquina, mientras que el número de paradas se registra en el historial de las órdenes de trabajo. (Flores & Mccaherty, 2007, pág. 17).

#### 5.1.5 Mean Time To Repair (MTTR)

El tiempo promedio de reparación es el promedio de tiempo en el que una máquina permanece inoperativa debido a una falla, expresado en horas. Es una medida de desempeño que evalúa la rapidez con la que una máquina es devuelta a su estado operativo después de una parada. Este indicador combina los efectos de la mantenibilidad/servicio del equipo y la eficiencia de la organización de mantenimiento al realizar las reparaciones necesarias de manera oportuna. Es una medida de la duración de las reparaciones de un equipo o sistema. Este indicador evalúa la eficacia en restaurar la unidad a condiciones óptimas de operación una vez que ha sufrido una falla, dentro de un periodo de tiempo determinado. El Tiempo Promedio para Reparar es un parámetro de medición que está asociado con la ejecución del mantenimiento. (Flores & Mccaherty, 2007, pág. 20).

$$MTTR = \frac{\text{Total downtime hours}}{\# \text{ Shutdowns}}$$

## 5.2 Grupo electrógeno g3412

Los grupos electrógenos se utilizan principalmente para suministrar energía en caso de cortes de corriente o como solución aislada en lugares donde no hay acceso a conexión del sistema de distribución de energía eléctrica nacional.

Un grupo electrógeno está compuesto por un motor diésel, gas o gasolina y un alternador. Gracias a su configuración, el motor quema el combustible a través de su ciclo de combustión convirtiendo la rotación del cigüeñal a través del alternador en energía eléctrica.

En el mercado se pueden conseguir los grupos electrógenos dependiendo de su capacidad de KW y KVA y de acuerdo a la aplicación que se requiera. La gran diferencia entre estas dos medidas es el factor de potencia. kW (kilovatio) es la unidad potencia real, (es decir, se trata de la cantidad de potencia que realmente ejecuta el trabajo eléctrico) mientras que kVA (kilovatio amperios) es la unidad de potencia total (potencia real + potencia reactiva) en este caso se presta atención a la cantidad total de potencia que consume un sistema ya que no se utiliza toda para realizar un trabajo. El valor estándar del factor de potencia para un generador eléctrico trifásico es de 0,8, aunque puede fluctuar entre 0 y 1. Es importante tener en cuenta que el valor en kVA siempre será mayor que el valor en kW, ya que incluye la potencia reactiva.

### 5.2.1 Tipos de potencia según el régimen de trabajo de los generadores

La norma ISO 8528-1 establece los parámetros de potencia en los que un generador eléctrico puede funcionar según su régimen de trabajo. En esta norma se especifica la aplicación, las categorías y el rendimiento de los generadores de corriente alterna que son impulsados por motores de combustión interna recíproca (RIC). Según indica la regulación, se entiende por potencia de un grupo electrógeno, aquella potencia eléctrica disponible en la conexión del grupo

para alimentar las cargas, excluyendo la necesaria para los trabajos auxiliares del grupo (bombas de prelubricación y alimentación de servicios auxiliares) (Algrain, 2019).

Según la finalidad deseada para un generador eléctrico, la norma establece cuatro categorías diferentes.

#### 5.2.2 ESP (Emergency Standby Power)

Se refiere a la situación en la que el generador se utilizará como fuente de energía de respaldo en caso de cortes de electricidad. En esta categoría, el generador puede soportar una carga variable de hasta 200 horas al año, y el promedio de carga durante un período de 24 horas no debe exceder el 70% de la capacidad máxima nominal del equipo. (ISO8528, 2019).

#### 5.2.3 PRP (Prime Rated Power)

La potencia Prime (PRP) se refiere a la máxima capacidad de generación que puede proporcionar el grupo electrógeno durante un período prolongado de tiempo, bajo las condiciones especificadas por el fabricante. Esta clasificación permite que el generador opere con cargas variables durante un número ilimitado de horas al año. Además, se permite una sobrecarga de aproximadamente el 10% durante una hora. Es importante destacar que el promedio de carga durante un período de 24 horas no debe exceder el 70% de la potencia PRP declarada. (Algrain, 2019).

#### 5.2.4 LTP (Limited-Time Power)

La potencia por tiempo limitado (LTP) se refiere a la máxima capacidad de generación que un grupo electrógeno puede entregar durante un período específico de 500 horas al año, según las condiciones establecidas por el fabricante. Esta clasificación se utiliza cuando se requiere una carga constante y es comúnmente aplicada a grupos electrógenos que operan en paralelo con la red eléctrica principal para cubrir picos puntuales de demanda de carga. (Algrain, 2019)

#### 5.2.5 COP (Continuous Operating Power)

La potencia continua (COP) se refiere a la capacidad de generación de un grupo electrógeno para suministrar una carga constante durante un número ilimitado de horas al año, de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Los grupos electrógenos con esta clasificación están diseñados para funcionar de manera intensiva, en un formato de operación continua las 24 horas del día, los 7 días de la semana. (ISO8528, 2019).

Esta clasificación, por lo general, aplica a grupos electrógenos en paralelo o en cogeneración. En la práctica, son muchas las distribuidoras eléctricas que fortalecen sus líneas de suministro con grupos electrógenos cuando su demanda de consumo sobrepasa la capacidad de la red de transporte de energía eléctrica, en esos casos, el aporte de los grupos electrógenos es imprescindible (ISO8528, 2019).

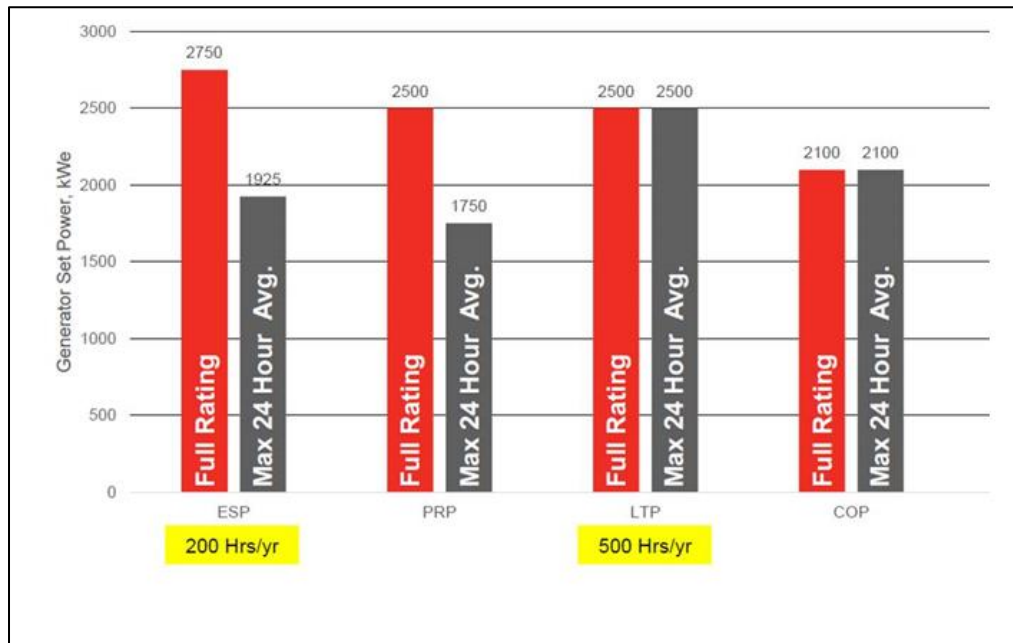
### **5.3 Selección de potencia de grupos electrógenos**

En instalaciones de emergencia con interrupciones de servicio que no superen las 200 o 500 horas acumuladas en el año, tanto la potencia LTP como la ESP pueden ser apropiadas. Sin embargo, en situaciones donde los cortes sean más prolongados, y los generadores deban estar en funcionamiento durante más horas, es recomendable optar por las potencias de carga constante

PRP o COP. Estas potencias permiten un suministro continuo y sostenido de energía en períodos prolongados de tiempo.

**Figura 14**

*Selección de potencia del grupo electrógeno según su uso*



*Nota.* Selección de potencia del grupo electrógeno según su uso. Tomado de CAT Inc.

En instalaciones de emergencia con interrupciones de servicio de duración limitada, es decir, por debajo de 200 o 500 horas acumuladas en el año, las potencias LTP y ESP pueden ser adecuadas. Sin embargo, en situaciones donde los cortes sean más prolongados, lo cual resultaría en un mayor tiempo de funcionamiento de los generadores, se recomienda optar por las potencias de carga constante PRP o COP. Estas potencias proporcionan un suministro continuo y constante de energía durante períodos prolongados, lo que las hace más adecuadas en tales circunstancias. (ISO8528, 2019).

#### **5.4 Factores ambientales y pérdida de potencia (derating)**

A la hora elegir un grupo electrógeno no es suficiente con conocer el uso y la potencia nominal de las cargas a alimentar. La valoración correcta de otros factores nos ayudara a determinar qué grupo electrógeno es el más adecuado para nuestra instalación. La ubicación, la presencia de cargas no lineales, las necesidades de aislamiento acústico o las condiciones ambientales del lugar, también serán agentes que considerar (Caterpillar, 2013).

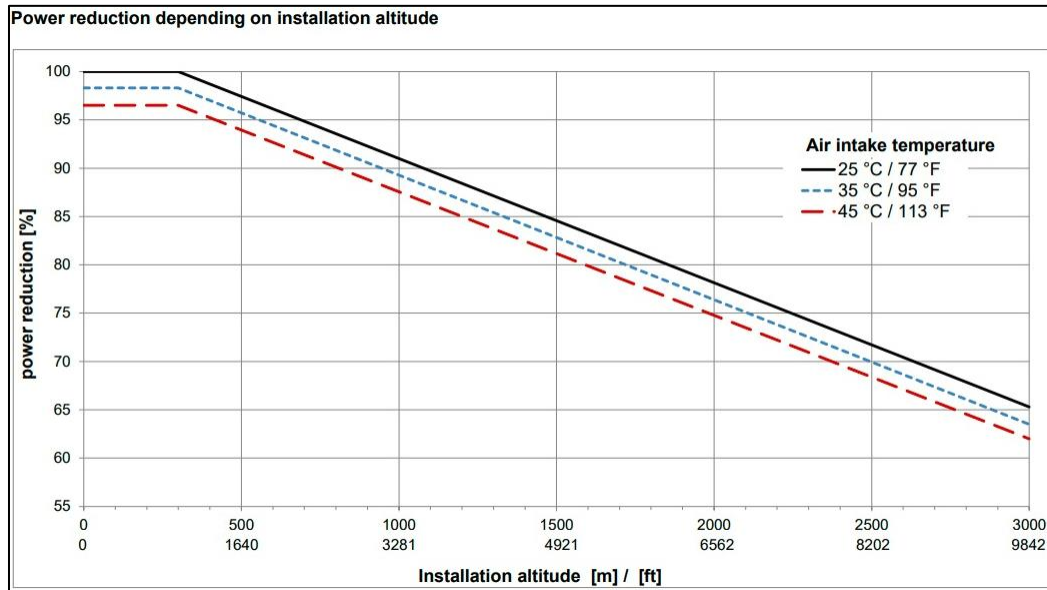
Todos los motores y alternadores de los grupos electrógenos alcanzan su rendimiento máximo cuando operan en condiciones ambientales estándar o poco exigentes. Sin embargo, en entornos con temperaturas ambientales elevadas o a gran altitud sobre el nivel del mar, es posible que sus capacidades se vean reducidas. (Caterpillar, 2013).

Los fabricantes de motores emiten certificaciones de rendimiento que se aplican dentro de ciertos límites. Por lo general, estos límites se establecen en una temperatura de 25°C y una altitud de 400 metros sobre el nivel del mar. Si se superan estos valores, es posible que el motor de un grupo electrógeno experimente una reducción en su potencia, conocida como "derating". (Caterpillar, 2013).

Por este motivo, es crucial conocer bien las condiciones ambientales en las que el grupo va a operar para hacer una selección correcta del activo

#### **Figura 15**

*Reducción de potencia de grupos electrógenos dependiendo de la altitud de instalación*



*Nota.* Tabla de derrateo standard para motores de combustión turbocargados. Tomado de manual de operaciones y mantenimiento G3412

## 5.5 Modos de entrega de potencia de los grupos electrógenos

Los grupos electrógenos son altamente versátiles debido a las diversas opciones de configuración ofrecidas por los fabricantes, quienes consideran diferentes necesidades al diseñarlos. Esto permite que cada equipo pueda adaptarse de manera única a diferentes situaciones y aplicaciones. Además, es posible utilizar un mismo equipo para diferentes propósitos simplemente ajustando un parámetro específico. Según las necesidades de la operación y el tipo de instalación (serie o paralelo), se pueden configurar los equipos para trabajar en un modo u otro. A continuación, se brinda una breve explicación de los modos de entrega de potencia:

### 5.5.1 Modo isla independiente

Un generador que funciona en modo isla o independiente se utiliza para suministrar energía a diferentes aplicaciones sin conexiones externas. Es decir, en aquellos lugares que se

encuentran aislados de la red de distribución, los generadores son la única fuente de energía. Aunque estos también pueden ofrecer soluciones a necesidades de déficit energético de eventos e industrias. En este caso, las facilidades a las cuales se suministra la energía van conectadas directamente aguas arriba de la salida de potencia del interruptor, si las facilidades no trabajan con el voltaje del generador que por lo general es de 480 Voltios, hay la necesidad de conectar transformadores de voltaje para lograr el voltaje final requerido con el cual trabajan las facilidades (Copower, 2019).

#### 5.5.2 Modo isla síncrona o gestión de energía

En esta aplicación, la carga es compartida por varios generadores en modo isla que están sincronizados entre sí, es una aplicación donde pueden trabajar en instalaciones configuradas en serie o en paralelo de manera conjunta asumiendo cada uno de ellos el reparto de cargas establecido, arrancando y parando en función de la demanda de la carga. Para ello, se configura un sistema automático en el que se programan más o menos generadores para alternar su servicio en función de la potencia requerida, transportando la energía eléctrica producida por medio de subestaciones a través de líneas eléctricas de baja, media o alta tensión (Copower, 2019).

#### 5.5.3 Modo red síncrona/potencia fija/carga base

En este caso, el generador se instala sincrónicamente con la red eléctrica (frecuencia y voltaje del grupo electrógeno iguales a la frecuencia y voltaje de la red). La finalidad de esta aplicación no es otra que administrar energía fija en el sistema del cliente. De modo que, el equipo transfiere siempre la misma potencia ininterrumpidamente 24/7. Este modo de entrega se utiliza cuando el suministro de red es insuficiente o para ampliar la carga de un sistema (Copower, 2019)

#### 5.5.4 Modo red síncrona: AMF (Automatic Mains Fault)/toma de carga

Las instalaciones en modo automático y en espera (AMF) de los grupos electrógenos tienen como objetivo satisfacer de manera automática e independiente las necesidades puntuales de energía eléctrica. Estas instalaciones pueden ser permanentes o temporales, y su capacidad varía dependiendo del tipo de servicio al que están destinadas. Es crucial realizar un cálculo preciso de las cargas que serán alimentadas por el generador, para seleccionar el grupo electrógeno más adecuado para la aplicación. (Copower, 2019).

En este caso, el grupo electrógeno permanece trabajando para la operación en modo automático aun estando fuera de línea en estado disponible (apagado o encendido), vigilando el comportamiento de voltaje y frecuencia de la red por medio del Power Management (Aplicación que detecta las fallas del sistema), ante un fallo de red, arranca el generador de manera inmediata, asume la carga entregada por la red y ocasionada por la falla antes de que ocurra la caída del sistema (Shutdown). Al retorno de la red existen dos posibilidades:

- Transferir la carga a red con paso por 0 (Shutdown).
- Sincronizar el generador con la red y después desconectar el generador, quedándose toda la instalación asistida por red (Es la opción más usual en la industria).

Los grupos electrógenos en trabajo AMF están principalmente destinadas para los siguientes fines:

- Proporcionar suministro eléctrico de respaldo en puntos críticos de una instalación en caso de fallo de red, cumpliendo así con la función de seguridad requerida para instalaciones de concurrencia pública (AMF).

- Llevar a cabo la función de apoyo a una red eléctrica de una instalación en aquellas situaciones en que se produce un pico de demanda y la red no tiene capacidad de suministro. En el sector industrial, en ocasiones puntuales, frecuentemente se requiere de una potencia más elevada que la contratada por la compañía eléctrica.

Apoyo a una instalación temporal con un grupo electrógeno, para asegurar el buen desarrollo del evento (Copower, 2019).

#### 5.5.5 Sistema de admisión de aire

El sistema está compuesto por varios componentes, como un filtro de aire, un tambor autocentrable para mejorar la eficiencia de filtrado, una carcasa metálica que alberga los componentes y un indicador de servicio que indica cuándo es necesario cambiar el filtro. Este sistema proporciona alimentación al postenfriador y al turbocompresor del motor. (ver figura 16).

#### **Figura 16**

*Sistema de admisión de aire G3412*



*Nota.* Sistema de admisión de aire G3412

#### 5.5.6 Sistema de escape

Colector de escape bridado, aislado con acero inoxidable y silenciador de escape. En algunos modelos el colector de escape lleva instalado una junta flexible bridada para la conducción de los gases de escape del motor hasta el silenciador (ver figura 17).

#### **Figura 17**

*Sistema de escape*



Nota: Sistema de escape G3412

#### 5.5.7 Sistema de refrigeración

Compuesto por dos sistemas:

- **Sistema de refrigeración de alta temperatura (AT)**

Grupo que consta del sistema de refrigeración del motor (incluye los circuitos de enfriamiento de las 12 camisas y el circuito de refrigeración del aceite); cuenta con 6 válvulas termostáticas (3 del lado derecho y 3 del lado izquierdo) a la salida del circuito de refrigeración del motor que permite el cierre y el paso del refrigerante al cooler, bomba de agua principal centrífuga accionada por el motor mediante engranajes, 40 galones de refrigerante, anticongelante y anticorrosivo para llenado del sistema, conexiones flexibles en manquera siliconada de alta temperatura para entrada y salida de motor.

- **Sistema de refrigeración de baja temperatura (BT)**

Incluye la refrigeración del postenfriador (refrigera el aire que viene del turbo hasta una temperatura de 40 °C antes de ingresar a las válvulas de admisión e iniciar el ciclo de combustión), cuenta con una bomba de agua auxiliar centrífuga accionada por el motor mediante engranajes, 15 galones de refrigerante, anticongelante y anticorrosivo para llenado del sistema, juntas flexibles con abrazaderas metálicas para entrada y salida de motor (ver figura 18).

**Nota:** Ambos circuitos están conectados al cooler donde se realiza el proceso de transferencia de calor para realizar el enfriamiento del líquido refrigerante con el que trabajan los sistemas

**Figura 18**

*Cooler y silenciador de escape G3412*



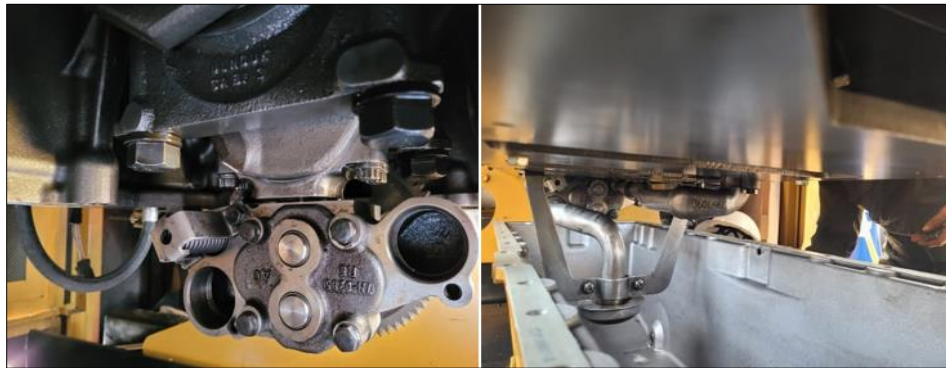
*Nota.* Cooler y silenciador de escape

### 5.5.8 Sistema de lubricación

Se basa en una bomba de succión que transporta el aceite desde el cárter hasta la bomba de recirculación de aceite que termina de transportar el fluido por todo el sistema de lubricación, ambas bombas son accionadas mediante engranajes por el motor, cuenta con un sistema de filtración, enfriador y cárter de aceite, válvula de drenaje manual, conexión para venteo de gases del cárter, varilla de nivel de aceite y 45 galones de aceite lubricante (Ver figura 19).

#### **Figura 19**

*Bomba de succión de aceite del cárter del motor*



*Nota.* El gráfico representa la bomba de succión de aceite del cárter del motor G3412.

#### **Figura 20**

*Postenfriador aceite cilíndrico horizontal en parte superior de los filtros de aceite 1R-1808 CAT*



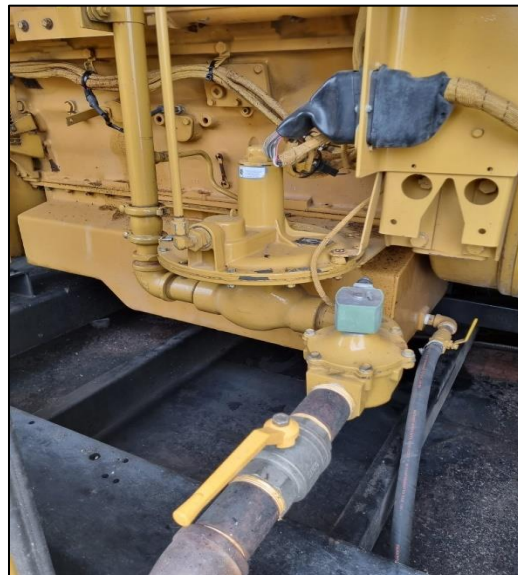
*Nota.* El gráfico representa el sistema postenfriador de aceite y filtros de aceite G3412.

### 5.5.9 Sistema de combustible

Conformado por un regulador de presión de gas de 5 Psi a 2 InH<sub>2</sub>O, líneas de admisión y gas natural que cumpla con las condiciones RUT, es decir, que sea un gas seco, que no contenga hidrocarburos en estado líquido (propano, butano, etc.), con un número de metano mínimo 70 para asegurar la combustión completa del combustible, esta condición, se pueda verificar a partir de un análisis de cromatografía (Ver figura 21).

#### **Figura 21**

*Válvula manual, electroválvula, válvula de diafragma de admisión de gas, cárter y válvula manual de bola para drenado de aceite del cárter*



*Nota.* El gráfico representa el sistema de admisión de gas G3412.

### 5.5.10 Sistema de arranque

Máster o interruptor, motor de arranque de 24 Vcc, juego de 2 baterías de arranque 4D con soporte y cableado de conexión (ver figura 22).

**Figura 22**

*Sistema de arranque G3412.*



*Nota.* El gráfico representa el sistema de arranque G3412.

5.5.11 Sistema de encendido

Sistema de ignición electrónico CATERPILLAR EIS y sistema de detección de detonación en los cilindros (ver figura 23).

**Figura 23**

*Control de ignición CAT*



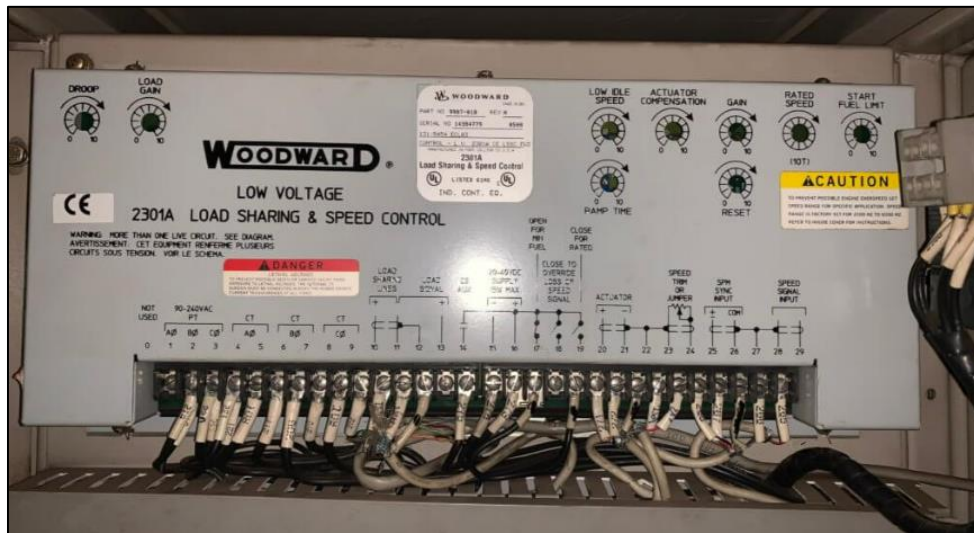
*Nota.* El gráfico representa el módulo de control del sistema de ignición.

### 5.5.12 Sistema de control

El sistema se conforma por un actuador EG3P y una tarjeta de control de velocidad Load Sharing & Speed Control 2301A como se observa en la figura 24.

**Figura 24**

*Sistema de control de velocidad*



*Nota.* El gráfico representa la tarjeta de Sistema de control de velocidad.

### 5.5.13 Sistema de control CAT EMCP 4.2

El cuadro de control mostrado en la figura 25 supervisa las condiciones de funcionamiento del motor. Incluye una pantalla digital que indica la velocidad de rotación del motor, las horas de servicio del equipo, la presión del aceite, la temperatura del refrigerante y el voltaje de la batería. Además, permite la programación de códigos de diagnóstico o alarmas de parada, como baja presión de aceite, alta temperatura del refrigerante, sobrevelocidad, parada de emergencia, fallo de arranque, bajo nivel de refrigerante, alta temperatura de entrada de aire, interruptor de arranque/parada manual, lógica de arranque/parada y ciclo de purga, y un potenciómetro para ajustar la tensión. También cuenta con una función de parada de emergencia.

**Figura 25**

*Panel de control CAT EMCP 4.2*



*Nota.* El gráfico representa el panel de control CAT EMCP 4.2.

#### 5.5.14 Generador

Marca Caterpillar de imán permanente 480 V, con regulador digital de voltaje y resistencias anticondensación como se evidencia en la figura 26.

**Figura 26**

*Generador CAT SR4B*



*Nota:* El gráfico representa el generador CAT SR4B

#### 5.5.15 Conjunto del volante

Volante y carcasa de volante, con sentido de rotación estándar SAE en contra de las manecillas del reloj y amortiguador de vibraciones torsionales (Ver figura 27).

#### **Figura 27**

*Volante y carcasa del volante del motor*



*Nota.* El gráfico representa el volante y carcasa.

#### 5.5.16 Sistema de control y sincronismo DEIF GPU

Está basado en un PLC con protección GPU de DEIF referencia GENSET AGC-4 y una pantalla táctil de control y regulación, así como una unidad de control. Sus funciones están basadas en:

- Arranque en modo automático y modo manual del grupo electrógeno en función de la programación horaria.
- Control y protección continuo del motor y del generador.

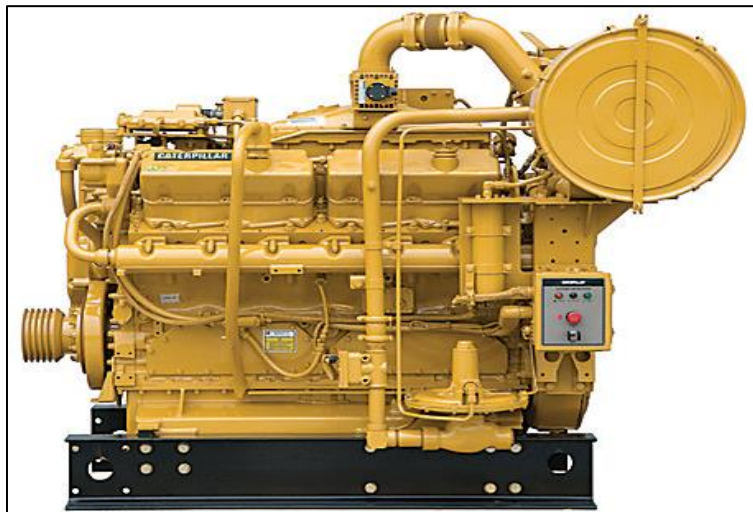
- Visualización de las alarmas y parámetros de generación y sincronismo (tensiones entre fases, intensidades entre fase, potencia activa total (KW) , potencia activa aparente (KVA), factor de potencia (adimensional entre 0 – 1) y frecuencia (HZ)).
- Regulación de carga del grupo, sincronización y control del regulador de tensión del alternador (Voltaje del Bus 480 Voltios) (DEIF, 2019).

Asimismo, las protecciones son:

- Protección fallo de red mínima tensión
- Protección fallo de red máxima frecuencia
- Protección fallo de red mínima frecuencia
- Protección microcorte red por salto de vector
- Protección de potencia inversa (DEIF, 2019).

### Figura 28

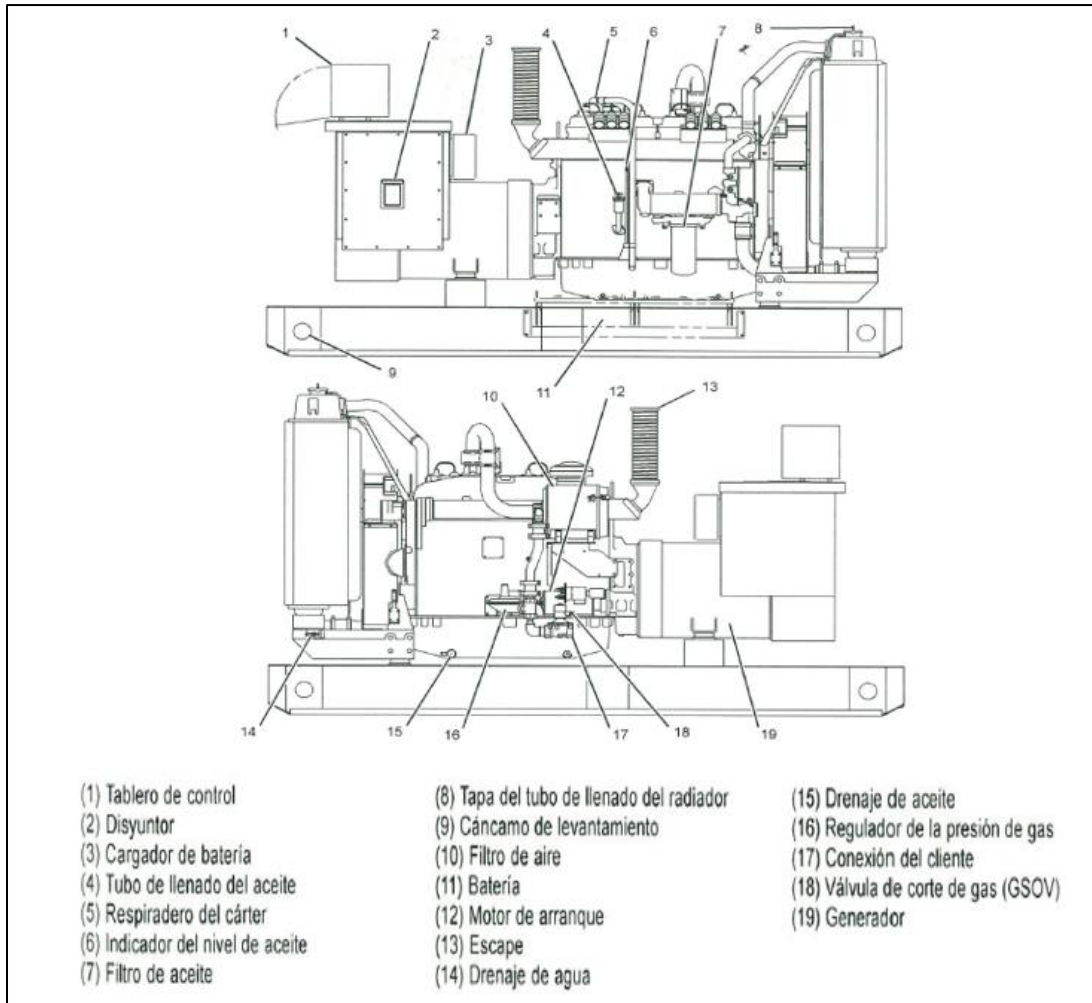
*Grupo eléctrico G3412*



*Nota.* El gráfico representa el grupo eléctrico G3412. Tomado de manual de operaciones y mantenimiento G3412.

**Figura 29**

*Descripción del grupo electrógeno serie G3400*



*Nota.* El gráfico representa la descripción del grupo electrógeno serie G3400. Tomada de Manual de operaciones y Mantenimiento G3412.

**Tabla 2**

*Listado de componentes para reparación de culatas*

<b>206-7745 CYLINDER HEAD GP*R</b>						
S/N: CTP1-2673						
PART OF 216-8339 CYLINDER HEAD GP						
SMCS-1100					i02834192	
NOTE	REF NO	GRAPHIC REF	PART NUMBER	QTY	PART NAME 1 2 3 4 5 6 (PRODUCT LEVEL)	SEE PAGE
	1	1	2A-4429	48	LOCK-RETAINER	
	2	1	4N-5906	24	SPRING-VALVE	
	3	1	6N-7154	24	ROTCOIL AS	
Y	4	1	206-7744	1	CYLINDER HEAD AS	40
	5	1	212-0932	12	VALVE-INLET	
	6	1	212-0933	12	VALVE-EXHAUST	
	7	1	213-7536	12	GUIDE-VALVE (INLET) (STANDARD)	
AB		1	293-6535		GUIDE-VALVE (INLET 0.127-MM OS OD)	
AB		1	293-6536		GUIDE-VALVE (INLET 0.254-MM OS OD)	
AB		1	293-6537		GUIDE-VALVE (INLET 0.508-MM OS OD)	
	8	1	213-7537	12	GUIDE-VALVE (EXHAUST) (STANDARD)	
AB		1	293-5841		GUIDE-VALVE (EXHAUST 0.127-MM OS OD)	
AB		1	293-5842		GUIDE-VALVE (EXHAUST 0.254-MM OS OD)	
AB		1	293-5843		GUIDE-VALVE (EXHAUST 0.508-MM OS OD)	
	9	1	250-3044	12	SEAL-VALVE STEM	
	10	1	2N-5775	12	DOWEL	
	11	1	7X-7731	1	PLUG-PIPE	
	12	1	8T-6762	3	PLUG-PIPE	
	13	1	8T-6764	1	PLUG-PIPE	

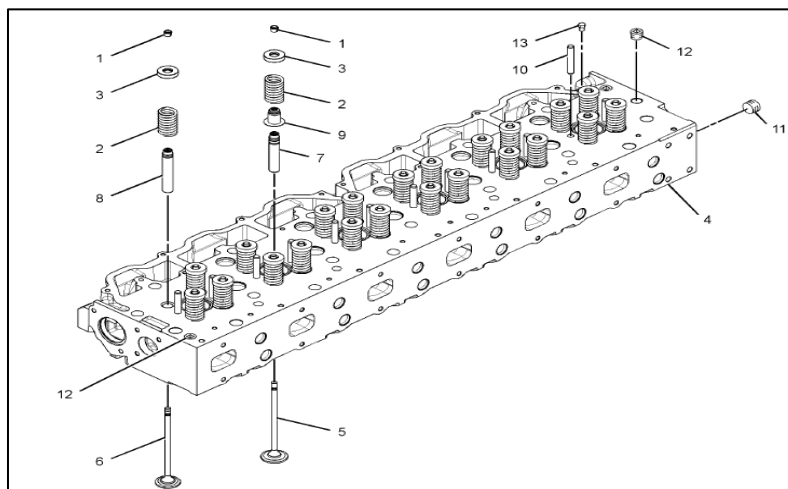
A-NOT PART OF THIS GROUP  
B-USE AS REQUIRED  
Y-SEPARATE ILLUSTRATION

*Nota:* Listado de repuestos para reparación de culatas. Tomado de manual de partes G3412.

Caterpillar. Industrial Engine, 2013, p.45.

**Figura 30**

*Culata*



*Nota:* Representación gráfica de culata. Usualmente se cambian repuestos 5, 6, 7, 8 y 9. Los

demás son reutilizados hasta el fallo por fatiga, generando pérdidas. Tomado de manual de partes

G3412. Caterpillar. Industrial Engine, 2013, p.46.

**Tabla 3**

*Listado de componentes para reparación de culatas*

<b>206-7744 CYLINDER HEAD AS</b>						<b>102834190</b>
S/N: CTP1-UP PART OF 206-7745, 300-5527 CYLINDER HEAD GP						
SMCS-1100, 1101						
NOTE	REF NO	GRAPHIC REF	PART NUMBER	QTY	PART NAME 1 2 3 4 5 6 (PRODUCT LEVEL)	SEE PAGE
	1	1	<b>2N-7174</b>	6	GASKET	
	3	1	<b>212-0936</b>	12	SEAT-VALVE (EXHAUST) (STANDARD)	
AB		1	<b>293-4801</b>		SEAT-VALVE (EXHAUST 0.127-MM OS OD)	
AB		1	<b>293-4802</b>		SEAT-VALVE (EXHAUST 0.254-MM OS OD)	
AB		1	<b>293-4803</b>		SEAT-VALVE (EXHAUST 0.381-MM OS OD)	
AB		1	<b>293-4804</b>		SEAT-VALVE (EXHAUST 0.508-MM OS OD)	
AB		1	<b>293-4805</b>		SEAT-VALVE (EXHAUST 0.762-MM OS OD)	
	4	1	<b>213-7539</b>	6	ADAPTER	
	5	1	<b>214-3286</b>	12	SEAT-VALVE (INLET) (STANDARD)	
AB		1	<b>293-4632</b>		SEAT-VALVE (INLET 0.127-MM OS OD)	
AB		1	<b>293-4633</b>		SEAT-VALVE (INLET 0.254-MM OS OD)	
AB		1	<b>293-4634</b>		SEAT-VALVE (INLET 0.381-MM OS OD)	
AB		1	<b>293-4635</b>		SEAT-VALVE (INLET 0.508-MM OS OD)	
AB		1	<b>293-4636</b>		SEAT-VALVE (INLET 0.762-MM OS OD)	
	6	1	<b>109-0073</b>	6	SEAL-O-RING	
	7	1	<b>3B-0623</b>	12	PLUG-CUP	
	8	1	<b>3B-0645</b>	10	PLUG-CUP	

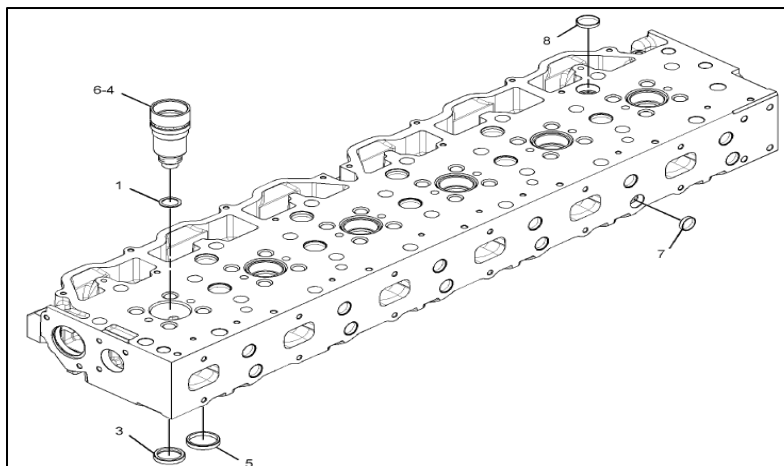
A - NOT PART OF THIS GROUP  
B - USE AS REQUIRED

Nota: Listado de repuestos para reparación de culatas. Tomado de manual de partes G3412.

Caterpillar. Industrial Engine, 2013, p.40.

**Figura 31**

*Culata repuestos 3 y 5*



Nota: La representación gráfica, usualmente solo se cambian repuestos 3 y 5. Los demás componentes se reutilizan hasta el fallo por fatiga, generando pérdidas por producción, disponibilidad y confiabilidad. Tomado de manual de partes G3412. Caterpillar. Industrial Engine, 2013, p.40.

## **5.6 Relación entre la deformación térmica por temperatura de trabajo, dureza y metalografía del material**

### 5.6.1 Deformación térmica por temperatura

La deformación térmica se produce como resultado de los cambios de temperatura experimentados por un material. Cuando se calienta, el material tiende a expandirse, mientras que al enfriarse tiende a contraerse. Si se permite que estas deformaciones ocurran libremente, no se generan esfuerzos adicionales. Sin embargo, si se restringe el movimiento del elemento estructural, se generan esfuerzos conocidos como esfuerzos térmicos. Es importante tener en cuenta que a medida que la temperatura del material aumenta, este fenómeno puede ser afectado por el "creep", que es la respuesta del material a esfuerzos sostenidos a altas temperaturas a lo largo del tiempo. (Castañeda & Cuitiva, 2018).

Aparte de los tipos principales de fallas que ocurren a altas temperaturas, como la creep, existen otros fenómenos como la fatiga de alto y bajo ciclo, la fatiga térmica por sobrecarga y combinaciones de estas. La capacidad de un material para resistir dichas fallas puede verse afectada por diferentes factores, como el nivel de esfuerzo aplicado, el tiempo de exposición, la temperatura y las condiciones corrosivas del entorno. Estos factores pueden provocar cambios en la microestructura del material, que pueden ser analizados a través de ensayos metalográficos para estudiar características como el tamaño de grano, la composición y la reorganización estructural química. (Wiley, 2007).

La resistencia a la fatiga del material se ve afectada negativamente por el aumento de la temperatura. En determinadas situaciones, un componente mecánico puede operar a altas temperaturas, ya sea bajo esfuerzos constantes en el tiempo o bajo condiciones de carga

fluctuante. En estos casos, la combinación de los efectos de creep y fatiga resulta en una reducción de la vida útil a altas temperaturas en comparación con la vida útil alcanzada solo por el fenómeno de creep. Además, factores como la oxidación, los esfuerzos aplicados, la frecuencia de la carga cíclica, las deformaciones y los patrones de fractura superficial deben ser cuidadosamente considerados (Tackson, 2017).

La deformación térmica restringe a las áreas que experimentan cambios de temperatura y que afectan la integridad estructural del elemento. Sin embargo, cuando los materiales de ingeniería se ven expuestos a fluctuaciones de temperatura, tanto internas como externas, pueden surgir numerosos factores a considerar. (Krupp, 2007).

Otro tipo de deformación que puede ocurrir es la deformación plástica, la cual se produce en un material cuando se aplica un esfuerzo localizado que excede su límite elástico. Esto resulta en una deformación permanente en el material una vez que se retira la carga. En algunos casos, esta deformación puede ocurrir incluso a temperaturas normales y se conoce como deformación en frío. Como consecuencia de esta deformación, pueden presentarse características como la separación de partículas en el material, lo que puede llevar a fracturas y rupturas en los puntos donde se inició la deformación. (Krupp, 2007).

Todas las condiciones explicadas anteriormente pueden ser analizadas a partir de un ensayo metalográfico a las válvulas, para observar los cambios de la composición y de la microestructura en distintas zonas de la pieza, que provocan el fallo total o parcial de los elementos.

En investigaciones realizadas en motores que utilizan gas natural comprimido (GNC) como combustible en comparación con motores de encendido por chispa (MEP), se ha observado un aumento en las temperaturas de operación de ciertos componentes. En este contexto, se realizó un estudio experimental de caso específico con una válvula de escape de un motor de

combustión dual, empleando pruebas de dureza y análisis metalográfico. Se determinó que la falla de la válvula se debe a la pérdida de resistencia del material, que se vuelve inestable cuando se expone a altas temperaturas de funcionamiento. Este fenómeno se explica por el crecimiento anormal del tamaño de grano en la microestructura del material de la válvula, como se observa en las imágenes microscópicas obtenidas. (Agudelo & Viáfara, 2004).

Con el objetivo de estudiar el agrietamiento y la influencia de la fatiga térmica en una válvula de escape de un motor que fue convertido de gasolina a GNC, se llevó a cabo un análisis de falla. Se realizaron ensayos experimentales que incluyeron pruebas de dureza y observación visual y metalográfica de la válvula. Estos ensayos permitieron examinar las propiedades y características del material de la válvula y determinar cómo la fatiga térmica afectó su integridad estructural. (Agudelo & Viáfara, 2004).

Además, debido a la composición química del GNC, se requiere una mayor cantidad de energía para romper sus enlaces, lo que está directamente relacionado con la energía de encendido. Esta característica resulta en un tiempo de retraso significativamente mayor, lo que a su vez provoca que la combustión se inicie en un momento desfavorable en términos de presión y temperatura. (Acevedo & Agudelo, 2002) .

Adicionalmente, el estado gaseoso del GNC genera un cambio significativo, ya que a diferencia de los combustibles líquidos, no tiene un calor latente de vaporización. Esto implica que no se requiere disipar calor adicional proveniente de la vaporización, lo cual contribuye a evitar el sobrecalentamiento de las paredes de la cámara de combustión y otros componentes del motor. (Kato, 1999).

La vaporización de la gasolina en un motor de encendido por chispa (MEP) puede generar un enfriamiento promedio de 20°C en las temperaturas de funcionamiento de los

componentes del motor. Sin embargo, en el caso del GNC, esta situación no se presenta, lo que influye en el aumento de la temperatura de operación del motor. (Heywood, 1988).

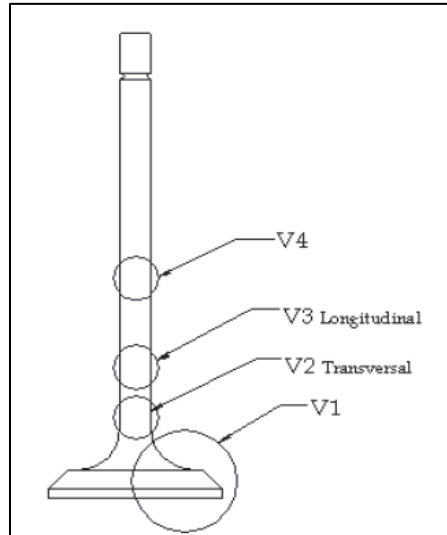
Los elementos mencionados anteriormente alteran el proceso de combustión al utilizar GNC como combustible en lugar de gasolina, lo que contribuye al aumento de la temperatura en los componentes del motor y puede causar fallas debido a la fatiga térmica. En motores que funcionan con GNC, las cargas cíclicas variables pueden ocasionar fallas estructurales a niveles de esfuerzo más bajos que en condiciones de carga estática. Este fenómeno, conocido como fatiga, se define como el proceso de cambio estructural localizado y progresivo que ocurre en un punto del material sometido a esfuerzos y deformaciones de amplitud variable, lo cual resulta en la formación de grietas que eventualmente llevan a la falla total después de cierto número de ciclos. (Agudelo & Viáfara, 2004).

En conjunto, los efectos térmicos son más complejos que los generados por las cargas mecánicas por sí solas. Estos efectos térmicos pueden alterar las propiedades del material, activando o atenuando los efectos de la fatiga. Por lo tanto, la fatiga termomecánica puede provocar cambios en la microestructura del material. (Oller, Salomón, & Oñate, 2001).

### 5.6.2 Dureza

#### **Figura 32**

*Lugar y dirección del perfil de durezas en la válvula en estudio*



*Nota:* La gráfica representa el perfil de durezas de la válvula. Tomado de estudio de la fatiga en los componentes de un motor bicomcombustible gasolina-gas natural comprimido, página 94.

**Tabla 4**

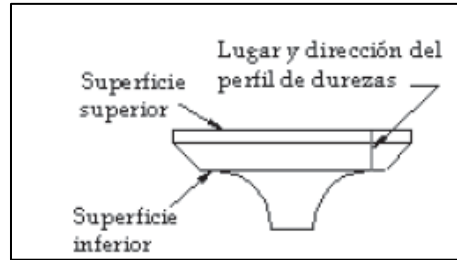
*Resultado de durezas en diferentes partes de la válvula*

<b>Muestra</b>	<b>Durezas (HV)</b>
<b>V1</b>	<b>352</b>
<b>V2</b>	<b>394</b>
<b>V3</b>	<b>445</b>
<b>V4</b>	<b>460</b>

*Nota.* Esta tabla muestra los resultados de durezas de válvulas en escala Vickers. Tomado de estudio de la fatiga en los componentes de un motor bicomcombustible gasolina-gas natural comprimido, página 95.

**Figura 33**

*Perfil de durezas en la cabeza de la válvula*



*Nota.* Perfil de durezas en la cabeza de la válvula. Tomado de estudio de la fatiga en los componentes de un motor bicomcombustible gasolina-gas natural comprimido, página 95

De los resultados de dureza obtenidos, se puede concluir que existe una notable diferencia en las microestructuras de distintas áreas de la válvula. Específicamente, se observa una disminución en la dureza a medida que nos acercamos a la cabeza de la válvula, lo cual posiblemente se relaciona con un incremento en la temperatura de trabajo en esa región, lo que podría estar modificando las características microestructurales.

Por otro lado, se evidencia una diferencia de dureza entre la muestra tomada en dirección transversal (V2) y la tomada en dirección longitudinal (V3), aunque es importante tener en cuenta que esta última se encuentra más alejada de la cabeza de la válvula. Por su parte, la muestra V4 exhibe una dureza mayor que las otras muestras, lo cual indica que la temperatura de trabajo en esa zona no ha provocado cambios microestructurales significativos.

El perfil de dureza en la cabeza de la válvula se muestra en la figura 33, donde se aprecia un aumento de la dureza a medida que nos alejamos de la superficie superior. Sin embargo, al acercarnos a la superficie interior, la dureza comienza a disminuir.

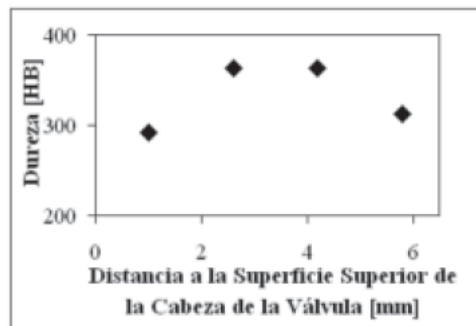
Es relevante mencionar que la dureza en la región próxima a la superficie inferior, que no está directamente expuesta a los gases de escape del motor, es superior a la de la región cercana a la superficie superior. Esto sugiere que la microestructura de esta última región se ve

más afectada, posiblemente debido a una temperatura de trabajo más alta. (Agudelo & Viáfara, 2004).

### 5.6.3 Metalografía

#### Figura 34.

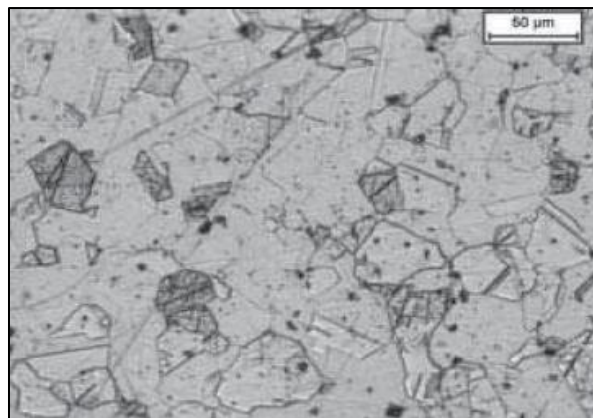
*Microestructura de la cabeza de la válvula*



Nota. El perfil de durezas en la cabeza de la válvula es mostrado en la gráfica, donde se observa como a medida que se incrementa la distancia desde la superficie superior, va aumentando la dureza. Tomado de estudio de la fatiga en los componentes de un motor bicomcombustible gasolina-gas natural comprimido, p. 96.

#### Figura 35

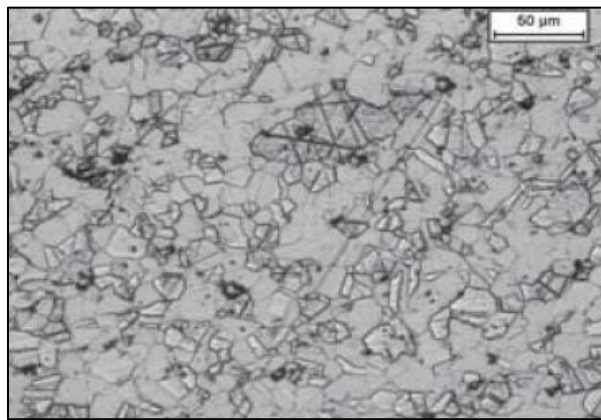
*Microestructura de la cabeza de la válvula*



*Nota.* se observa en la gráfica la microestructura correspondiente a la cabeza de la válvula (V1), en la parte más cercana a la superficie expuesta directamente a los gases de escape. Tomado de estudio de la fatiga en los componentes de un motor bicomcombustible gasolina-gas natural comprimido.

### **Figura 36**

*Microestructura en la parte central de la válvula*



*Nota.* La microestructura de la parte central e inferior de la cabeza de la válvula presenta una estructura más homogénea. Tomado de estudio de la fatiga en los componentes de un motor bicomcombustible gasolina-gas natural comprimido.

Por lo tanto, la falla de la válvula de escape se debe a la inestabilidad térmica del material, causada por las altas temperaturas de operación que dependen del proceso de combustión en el motor alimentado con GNC y su capacidad para disipar el calor generado durante el proceso (consultar figura 36).

Además, la solución para prevenir la falla de los componentes en los motores convertidos de gasolina a GNC se puede abordar desde dos perspectivas: el proceso de combustión en el motor y el material utilizado en la válvula de escape.

En el primer caso, es crucial reducir el tiempo de retardo y aumentar la velocidad de combustión para disminuir las temperaturas de operación de los componentes del motor (ver figura 35). Para lograr esto, es necesario ajustar parámetros como el avance de encendido, la fuente y la energía de ignición, así como la turbulencia de la mezcla. (Amell & Agudelo, 2002, págs. 36-48).

Además, se puede lograr una mayor estabilidad térmica del material de la válvula de escape mediante la adición de elementos aleantes como Molibdeno, Vanadio y Tungsteno. Otra forma de mejorar la estabilidad térmica de la aleación es optimizando el tratamiento térmico, que consiste en mejorar el endurecimiento del material mediante la formación de partículas finas.

Por último, en cuanto a las propiedades térmicas, es importante que el material exhiba una alta conductividad térmica y un bajo coeficiente de expansión térmica. (Amell & Agudelo, 2002).

### **6.Desarrollo de la metodología de análisis de causa raíz**

Luego de realizar el estudio del arte, lograr la descripción mecánica del equipo y explicar sus modos de operación se desarrolla la metodología de análisis de causa raíz utilizando la técnica de los cinco porqués descritos en la norma UN-EN62740 que se utiliza habitualmente para el análisis de fallas e incidentes analizando los eventos foco que han ocurrido.

La técnica de los cinco porqués se integró con los pilares de mantenimiento planeado y mejoras enfocadas del programa de Mantenimiento Productivo Total (TPM) con el objetivo de maximizar la producción, mejorar la confiabilidad de equipo y eliminar las averías.

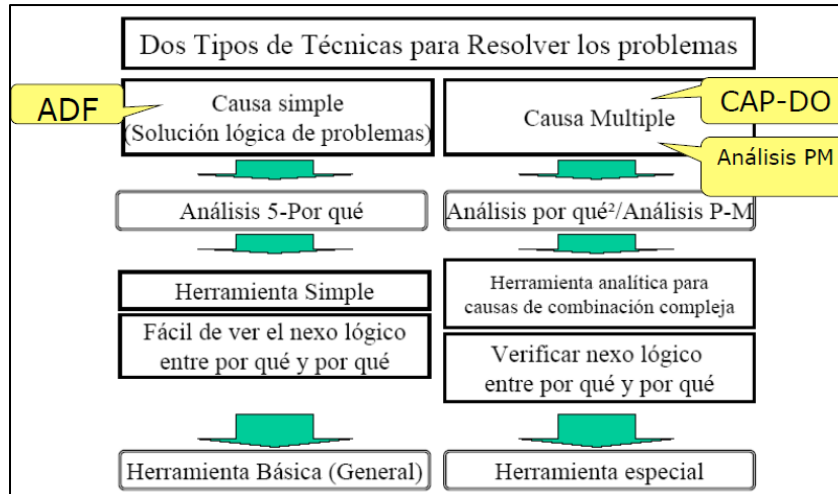
El desarrollo de las actividades de los pilares de mantenimiento planeado y mejoras enfocadas se compone de los siguientes pasos:

- Registrar los equipos
- Evaluar los equipos según su criticidad
- Registrar y clasificar las averías (Leve, media o grave)
- Analizar los indicadores
- Aplicar la técnica del cinco porque para la resolución de problemas
- Entregar el plan de acción para corregir las fallas

Con base a los criterios del programa de mantenimiento Productivo total se utilizan dos técnicas de análisis de causa raíz para la resolución de problemas las cuales son descritas a continuación:

**Figura 37**

*Dos tipos de técnicas para resolver los problemas*



*Nota.* Nuestro caso de estudio se realizó con la técnica de Causa Múltiple sustentada bajo el plan de Mantenimiento Productivo y el análisis CAP-DO. Finalmente, con el análisis CAP-DO; se elaboró el plan de acción para eliminar las averías. Tomado del curso de memorias TPM.

### 6.1 Registro de los equipos

**Figura 38**

*Generador Caterpillar modelo G3412*



*Nota.* La gráfica muestra el generador Caterpillar modelo G3412. Tomado de manual de operación y mantenimiento Caterpillar G3412.

**Figura 39**

*Especificaciones planta eléctrica a gas natural modelo G3412*

<b>ESPECIFICACIONES</b>	
Especificaciones Plantas Eléctricas a Gas Natural	
Potencia Continua (Kw)	360
Voltaje Linea-Linea/ Linea-Neutro	208/120 V -
	220/127 V -
	440/254 V -
	480/277 V
Frecuencia	60 Hz
Aspiración del Motor	TURBOCARGADO
Velocidad	1800 RPM
No. Cilindros	12 EN V

*Nota.* Especificaciones planta eléctrica a gas natural modelo G3412. Tomado de manual de operación y mantenimiento Caterpillar G3412

**Tabla 5**

*Órdenes de servicio ejecutadas durante el período 2018 - 2023*

<b>Órdenes de servicio ejecutadas</b>		
<b>Año</b>	<b>Ejecutadas</b>	<b>Cambios de culata</b>
<b>2018</b>	4	1
<b>2019</b>	3	1
<b>2020</b>	3	1
<b>2021</b>	5	1
<b>2022</b>	4	3
<b>2023</b>	3	2
<b>Total</b>	<b>22</b>	<b>9</b>

*Nota.* Esta tabla muestra el comparativo de órdenes de servicio realizadas VS Cambios de culata.

**Tabla 6**

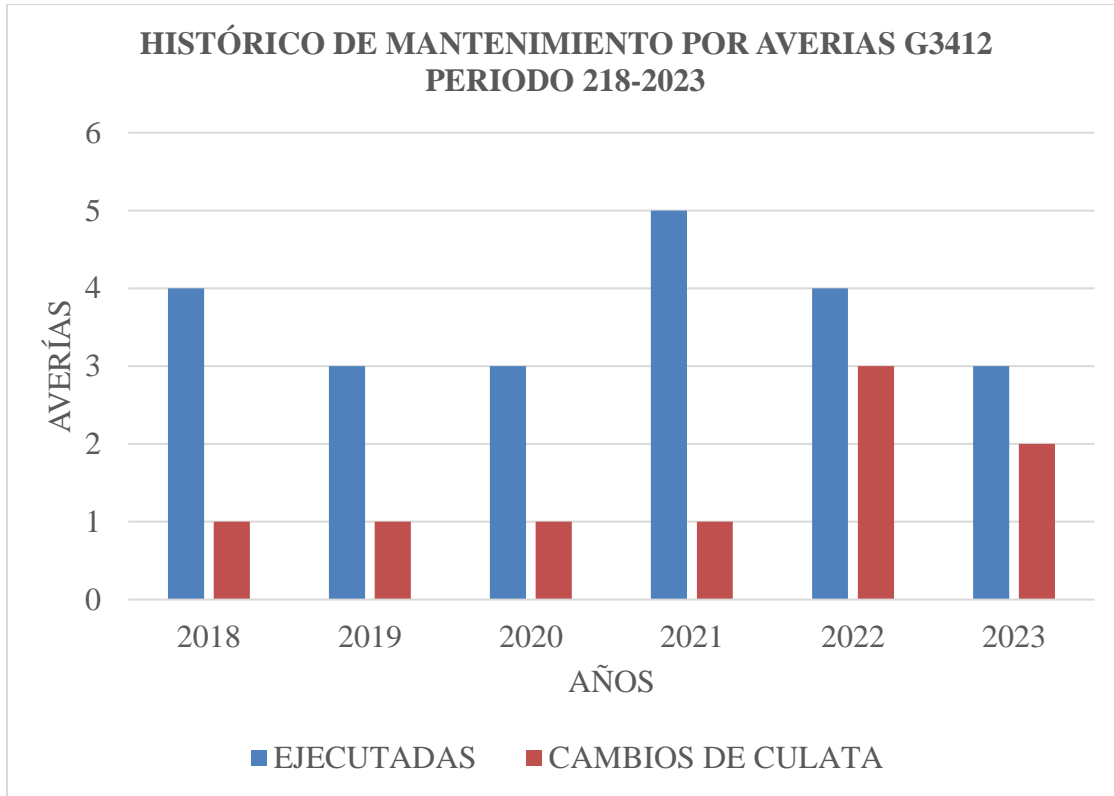
*Histórico de mantenimiento por averías G3412*

<b>Histórico por averías de grupos electrógenos G3412 campo la punta período 2018 - 2023</b>	
<b>Fecha</b>	<b>Asunto</b>
2/26/2018	Cambio de tendido de bujías del motor y capuchones del adapter de bujías baja temperatura de trabajo en los cilindros
5/16/2018	Cambio de mixer g3412 por falla en el diafragma
7/06/2018	Cambio de baterías por bajo voltaje de trabajo
12/09/2018	Cambio de culatas, juego completo de casquetes de biela y juego de anillos de pistones por falla de válvulas de escape
22/08/2019	Cambio de culata par por altos valores en recesión de válvulas
15/10/2019	Cambio electroválvula de entrada de gas por deterioro
10/12/2019	Cambio del turbo por desgaste de álabes de turbina
2/27/2020	Cambio de culatas por altos valores en la recesión de válvulas
4/17/2020	Cambio de bujías y cables de alta por baja temperatura de trabajo de los cilindros
10/30/2020	Cambio de la válvula mariposa del carburador por desgaste de rodamiento y baja respuesta de aceleración
2/24/2021	Revisión del sistema de sincronismo, ajustes de parámetros de ganancia y respuestas de voltaje y frecuencia para repartición de carga entre equipos, se ajustan y se busca el mejor comportamiento de estabilidad.
2/26/2021	Cambio de rodamiento alternador y puente rectificador diodos por arrastre del rotor estator
5/02/2021	Cambio de bujías por baja temperatura de trabajo de los cilindros
5/02/2021	Se cambian culatas por falla en rotocoil de la válvula de escape del cilindro número 3
9/8/0201	Reemplazo de baterías 4d por bajo voltaje de trabajo
19/01/2022	Se cambian culatas por falla en válvula de escape, cambio de pistón camisa anillos y bulón del cilindro número 10, limpieza general del equipo puesta en marcha del mismo
1/07/2022	Sondeo al haz de tubos internos del cooler por obstrucción y alta temperaturas del motor
30/10/2022	Cambio de culatas por fuga de aceite del cárter la las cámaras de combustión debido al falla de las arandelas de chamber y los o-rings de chamber's
20/11/2022	Cambio de culatas por fuga de refrigerante al cárter debido a falla de las arandelas de chamber y los orines de chamber's
1/03/2023	Cambio de culatas por falla en las válvulas de escape de los cilindros 1, 5 y 7, cambio de pistones y camisas de los cilindros mencionados
20/03/2023	Mantenimiento correctivo al radiador y pos enfriador (sondeo general de tubería, cambio de empaquetadura y tornillería, lavado de tanques de expansión, curado de fugas de agua con soldadura, prueba hidrostática, aplicación de pintura en general)
10/04/2023	Cambio de culatas por falla en las válvula de escape del cilindro número 4 y cambio de pistón y camisa del cilindro mencionado

*Nota.* Esta tabla muestra las actividades de mantenimiento realizadas a los motores G3412 de Campo La Punta. Tomado de hojas de vida de los grupos electrógenos de Campo La Punta.

**Figura 40**

*Gráfica comparativa de las órdenes de servicio ejecutadas con respecto a los cambios de culata*



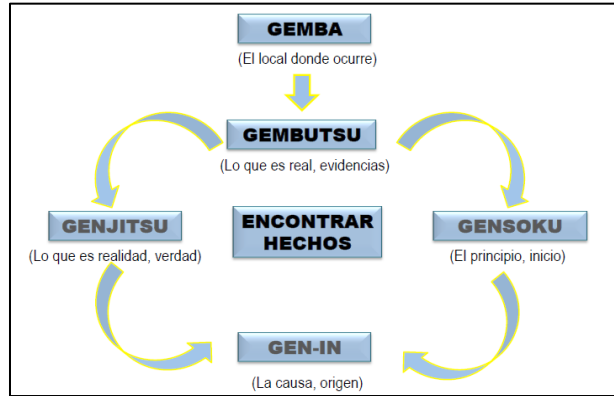
*Nota.* La gráfica representa el comportamiento para el año 2022 en el que se triplicaron las fallas por culatas en los equipos de generación, mientras que durante los primeros 4 meses del año 2023 se duplicaron las fallas por culata.

Ambas estadísticas son comparadas con respecto al promedio registrado entre los años 2018-2021 (Ver figura 40). Al registrarse esta estadística, se procedió a realizar el análisis de causa raíz de la siguiente manera:

6.2 Definir el fenómeno

Figura 41

Las 5G's del TPM



Nota. Filosofía que permite definir el fenómeno para iniciar su investigación. Tomado de memorias del curso TPM

Tabla 7

Las 5G's del TPM

5G's	ENCONTRAR HECHOS
<b>GEMBA</b>	Motores G3412
<b>GEMBUTSU</b>	Falla en el material de la válvula, temperatura excesiva de trabajo de los cilindros, elementos de culatas fatigados, falla de ensamble de los elementos
<b>GENJITSU</b>	Aumentó el número de fallos desde que entró la planta de gas en operación sin realizar el proceso de Dewpoint para eliminar los hidrocarbustos gaseosos del gas (Propano, butano)
<b>GENSOKU</b>	Todos los generadores sufrieron falla en las culatas por utilizar el gas de proceso que se obtiene en la extracción de crudo como gas combustible para la generación
<b>GEN IN</b>	Ga de proceso es rico en hidrocarburos gaseosos (butano, propano) de acuerdo a los resultados de la cromatografía del gas

**Definición del fenómeno:** Los motores G3412 tuvieron múltiples fallas desde que entró la planta de gas en operación sin realizar el proceso de Dewpoint para eliminar los hidrocarbustos gaseosos del gas (Propano, butano). Todos los generadores sufrieron falla en las culatas por utilizar el gas de proceso que se obtiene en la extracción de crudo como gas combustible para la generación, el gas de proceso es rico en hidrocarburos gaseosos (butano, propano) de acuerdo a los resultados de la cromatografía del gas, ocasionando aumento de temperatura y presión en las cámaras de combustión y alterando las condiciones normales de operación de los grupos electrógenos

Nota. Definición del fenómeno en estudio. Ver desarrollo en el apéndice 5G's

### 6.3 Descripción del fenómeno

**Tabla 8**

*Formato 5W + 1H*

FORMATO 5W + 1H	
PROBLEMA: Fallo de elementos de las culatas del grupo electrógeno G3412	
¿Qué? (What?) ¿Qué hace evidente el problema? ¿En que se manifiesta el inconveniente?	Inicialmente el motor se apaga, al intentar arrancarlo nuevamente, el motor no alcanza los parámetros nomales de operación (RPM, Voltaje, Frecuencia) y vuelve apagarse, en ocasiones se presentan sonidos anormales durante el intento de arranque del motor
¿Dónde? (Where?) ¿En qué lugar, sitio o parte de la maquina ò material ocurre el problema?	Culatas del motor y los elementos que la componen para su funcionamiento (Rotocoil, resortes, seguros de válvula, válvula, asientos, chamber's, arandelas de chamber's y Orings de chamber's)
¿Cuándo? (When?) ¿Cuándo ocurrió el problema? ¿Bajo qué circunstancias ocurre el problema?	Cuando el motor estaba en sincronismo (voltaje del BUS 480 voltios, voltaje de red 480 voltios y frecuencia de 60 Hz) durante su funcionamiento con una carga de 250 Kw, presión de aceite 80 Psi y temperatura del motor de 200 F
¿Quién? (Who?) Depende de las actuaciones humanas el hecho de que aparezca o no el problema?	El mecánico se da cuenta de la falla. La falla no depende de la habilidad de la persona
¿Cómo? (How?) ¿Cual es la forma en que se presenta el problema? ¿Cómo difiere de la situación normal o de un patrón?	El problema es frecuente y su probabilidad de ocurrencia ha aumentado en un 300% en el año 2022 y 200% en el año 2023 con respecto al promedio de falla entre los años 2018-2021
¿Cuál? (Which?) ¿Hay una tendencia de problema? ¿Hay un patrón de comportamiento?	Parada automática del motor por activación de alarma configurada en la programación del control EMCP 4.2 debido a la pérdida de compresión y temperatura de trabajo en los cilindros afectados por la falla
<b>¿Cómo?-¿Que?-¿Dónde?-¿Cuándo?-¿Cuál?-¿Quién?</b>	
<b>Fenómeno:</b> Aumento de fallo de los elementos de las culatas del grupo electrógeno G3412 en un 300% durante el año 2022 y en un 200% en el año 2023 con respecto al promedio de cambios de culata registrados entre los años 2018-2021 con una diferencia de 850 horas de operación entre el último y el penúltimo evento, lo que ocasiona un aumento mayor de la probabilidad de fallo con respecto a las horas de operación del motor con una desviación del 91.5%, no depende de la habilidad de la persona y la falla es primera vez que se presenta	
1 Culata----- 10.000 horas	X=8.5% de tiempo en servicio
1 Culata-----850 horas	X=100%-8.5%
	X=91.5% de aumento de probabilidad de falla

*Nota.* Descripción del fenómeno. El fenómeno es la combinación de hechos que lleva a la ocurrencia del problema y se define con la frase compuesta 5W + 1H. Ver desarrollo completo en el apéndice 5W + 1H.

### 6.4 Desarrollo de la matriz Modo – Falla – Componente

Con el desarrollo de esta metodología y con base al historial de fallas de los grupos electrógenos G3412 se identificó que el sistema de combustión del motor es el que presenta mayor frecuencia de averías (8) y que los elementos mecánicos del motor son los que presentan mayor frecuencia de modos de falla (14) como se observa en la tabla 9.

**Tabla 9**

*Matriz modo – falla – Componente*

MATRIZ MODO - FALLO - COMPONENTE															
CODIGO EQUIPO: CAT G3412#1 GENERACIÓN NOMBRE: GRUPO ELECTROGENO G3412	ZONA DE MAQUINA (SISTEMA)	COMPONENTE DEL SISTEMA	FALLAS ELECTRICAS Y ELECTRONICAS			FALLAS MECANICAS				FRECUENCIA DE NÚMERO DE AVERIAS	TOTAL PERIODO				
			POTENCIA (motores, variadores de velocidad, etc.)	CONTROL (sensores, contactos, bobinas, etc.)	PROGRAMA (PLC o controlador, computador, pantalla de operación)	HIDRÁULICA	NEUMÁTICA	LUBRICACIÓN	ELEMENTOS MECANICOS						
	Sistema de ignición	Bujías		□								3			
	Sistema de admisión de gas	Mixer										1			
	Sistema de alimentación de 24 voltios	Baterías		□								2			
	Sistema de combustión	Culatas								□	□	8			
	Sistema de alimentación de 24 voltios	Electroválvula de admisión de gas										1			
	Sistema de potencia	Turbo										1			
	Sistema de aceleración	Válvula mariposa del carburador										1			
	Sistema de refrigeración	Mantenimiento general al cooler										2			
	Sistema velocidad y sincronismo	Tarjetas de velocidad y sincronismo										1			
	Sistema de transmisión de potencia	Rodamiento del alternador										1			
<b>FRECUENCIA MODOS DE FALLA</b>															
<b>TOTAL PERIODO</b>				6	1							14			

Cada que ocurra una Avería de mas de 5 minutos, se deben hacer los siguientes dos pasos para registrarla:

1. Dibuje una línea por fallo, hasta completar un cuadrado cruzado.

1 Avería
2 Avería
5 Avería

2. Rellene un cuadrado horizontal y vertical, teniendo en cuenta que si la falla es LEVE se hace un cuadrado punteado y si es MEDIA o GRAVE se debe llenar un cuadro amarillo

*Nota.* Matriz modo – falla – componente del grupo electrógeno G3412. Ver desarrollo completo en el apéndice Matriz Modo – Falla – Componente.

### 6.5 Análisis de modo de falla y efectos (FMEA)

Identificado el sistema que presenta mayor frecuencia de averías y que los elementos mecánicos del motor son los que registran mayor frecuencia de modos de falla a partir de la matriz Modo – Falla – Componente se procedió a realizar un Análisis de Modo y Efecto de Fallas para evaluar la confiabilidad del sistema y su criticidad.

Este análisis se realizó durante varias etapas de acuerdo a las etapas del proceso que involucra fallos de montaje, mecanización defectuosa, montaje de piezas desgastadas y fallas por combustión (ver tabla 10).

Tabla 10

Análisis de modos de falla y efectos G3412

Análisis de Modos de Falla y Efectos (FMEA)											
Número del proceso o producto:		Grupo electrógeno G3412						Página 1 de 1			
Responsable:		Winer Jiménez Maestre						FMEA_1 Fecha 01/06/2023			
Etapo del proceso	Entrada de proceso clave	Descripción gráfica	Modo de Falla Potencial	Efectos de falla	Severidad	Causas potenciales	Descripción gráfica	Probabilidad de ocurrencia	Controles del proceso	Capacidad actual para detectar errores	N P R
Fallos de montaje	Ajuste incorrecto de juego para la válvula		La válvula no hace sello correctamente con el asiento de la cámara.	Calentamiento de la cabeza de la válvula	3	Desdibujamiento de la válvula		Manualmente NPR=3	Baja potencia del motor	3	27
	Montaje incorrecto del resorte de válvula		Muelle de resorte desalineado, flexión lateral en el vástago de la válvula	Flexión lateral en el vástago de la válvula	5	Fractura de la guía de la válvula y fractura del extremo superior de la válvula		Una vez durante cada montaje NPR=3	Realizar cambio de resortes basado en cuentas fijas por horas de operación y recomendación del fabricante	2	30
	Montaje incorrecto del sistema de lubricación de las válvulas		Exceso de aceite en el conducto de lubricación	Las válvulas trabajan por debajo de su posición vertical correcta debido al exceso de aceite	Las válvulas golpean los pistones, se doblan o se rompen	4	Las válvulas golpean los pistones, se doblan o se rompen		Una vez durante cada montaje NPR=3	Inspección visual de control de calidad y medición del montaje del sistema de lubricación de las válvulas	2

Nota. Este análisis describe el modo de falla potencial, el efecto de la falla y la causa potencial.

Ver desarrollo completo del análisis en el apéndice FMEA.

### 6.6 Criticidad de equipos

Identificar la criticidad de los equipos es importante para definir los tipos de mantenimiento y su frecuencia

Figura 42

Criticidad de equipos







Nota. Esta gráfica muestra la criticidad de equipos. Para el caso de estudio, el resultado de criticidad es de TIPO A. Tomado de memorias del curso TPM.

**Tabla 11**

*Matriz de Criticidad G3412*

MATRIZ DE CRITICIDAD PARA MOTOGENERADOR G3412					LEYENDA							
RIESGO	Probabilidad (Ocurrencia)	Gravedad (Impacto)	Valor del Riesgo	Nivel de Riesgo	GRAVEDAD (IMPACTO)							
					MUY BAJO 1	BAJO 2	MEDIO 3	ALTO 4	MUY ALTO 5			
La válvula no hace sello correctamente con el asiento de la culata	3	4	12	Importante	PROBABILIDAD	MUY ALTA	5	5	10	15	20	25
Muelle de resorte desalineado flexión lateral en el vástago de la válvula	5	4	20	Muy grave		ALTA	4	4	8	12	16	20
Exceso de aceite en el conducto de lubricación	4	2	8	Apreciable		MEDIA	3	3	6	9	12	15
El asiento o la guía de válvula no se ha mecanizado centradamente	4	4	16	Muy grave		BAJA	2	2	4	6	8	12
El juego para la guía de la válvula es demasiado grande	4	4	16	Muy grave		MUY BAJA	1	1	2	3	4	5
Ajuste demasiado estrecho del diámetro de la guía	4	4	16	Muy grave								
Las chavetas pueden perder la conicidad de sujeción	5	5	25	Muy grave								
La transmisión de fuerza del balancín se produce de forma descentrada en el extremo del vástago de la válvula	2	4	8	Apreciable								
apoyo unilateral del asiento de válvula en el inserto	2	3	6	Apreciable								
Exceso de capacidad mecánica y térmica de diseño de la válvula	5	5	25	Muy grave								
			0	Marginal								
			0	Marginal								
			0	Marginal								
			0	Marginal								
			0	Marginal								
Borrar Datos												

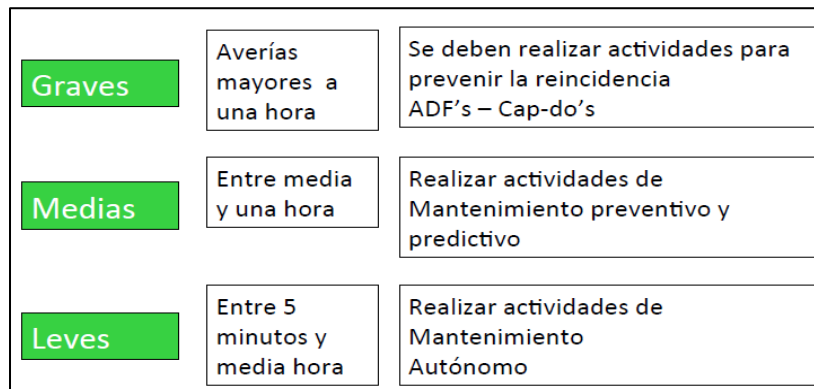
  

	Riesgo muy grave. Requiere medidas preventivas urgentes. No se debe iniciar el proyecto sin la aplicación de medidas preventivas urgentes y sin acotar sólidamente el riesgo.
	Riesgo importante. Medidas preventivas obligatorias. Se deben controlar fuertemente las variables de riesgo durante el proyecto.
	Riesgo apreciable. Estudiar económicamente si es posible introducir medidas preventivas para reducir el nivel de riesgo. Si no fuera posible, mantener las variables controladas.
	Riesgo marginal. Se vigilará aunque no requiere medidas preventivas de partida.

*Nota.* Resultado de probabilidad de ocurrencia alto para el caso de estudio. Ver desarrollo completo del análisis en el apéndice Matriz de criticidad.

**Figura 43**

*Clasificación de averías*



*Nota.* La gráfica representa la clasificación de averías. Tomado de memorias del curso TPM.

Con base a la figura 43 y de acuerdo al valor del riesgo calculado en la matriz de criticidad y teniendo en cuenta que el tiempo de reparación de las averías es mayor a una hora, las averías presentadas en el grupo electrógeno G3412 son GRAVES y por lo tanto se deben realizar actividades de análisis de fallas (ADF's) complementado con la metodología Cap-do's para realizar el plan de acción que mitigue la reincidencia de las fallas.

### 6.7 Análisis por qué - porque

Figura 44

Análisis cinco por qué – porque

ANÁLISIS POR QUÉ - PORQUÉ						
FENÓMENO: Fallo de los elementos de culata						
1	2	3	4	5	ACCIONES A REALIZAR	
¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ?	¿POR QUÉ?		
Porque	Porque	Porque	Porque	Porque		
A	Aumento de temperatura de trabajo en las cámaras de combustión del motor	Aumento de gas combustible en las cámaras de combustión del motor	Aumento de aceleración del motor	Aumento de apertura de la válvula mariposa del carburador	Desconfiguración de la programación de la tarjeta de velocidad del gobernador	Reprogramar la tarjeta de velocidad del gobernador y ajustar los PID
B	Fallo del material de la válvula	Aumento de temperatura de trabajo en las cámaras de combustión del motor	presencia de hidrocarburos gaseosos en el combustible (propano, butano)	se utilizó el gas de producción resultante de la extracción de crudo como gas combustible para los grupos electrogenos sin realizar el proceso de Dewpoint (secado de gas para eliminar los hidrocarburos gaseosos del combustible)	por decisión del departamento de operaciones de la compañía	Suspender el suministro de gas de producción para la generación y alimentar el sistema de generación con GNC (Gas natural comprimido)
C	Desprendimiento de la válvula	Falla de la chaveta de sujeción de la válvula	La chaveta perdió la conicidad de sujeción	Se reutilizaron elementos fatigados para la reparación de las culatas	Por decisión del coordinador de mantenimiento	No reutilizar elementos fatigados, realizar el cambio de todos los repuestos para la reparación de las culatas
D	Fuga de aceite. Paso del aceite del cárter a las cámaras de combustión	Falla de las arandelas y los O-Rings de chamber's	Fatiga de arandelas y O-Rins de chamber's	No se realizó el cambio de arandelas y O-Rins de chamber's al momento de realizar la reparación	Se realizó prueba hidrostática y no se presentaron fugas	No reutilizar elementos fatigados, realizar el cambio de todos los repuestos para la reparación de las culatas
E	Fuga de refrigerante al cárter del motor	Falla en la instalación de los chamber's de culata	Torque ineficiente de los chamber's de culata	Torque descalibrado	Fecha de mantenimiento y calibración de torque vencida	Recentificar los torques de mantenimiento. Utilizar herramientas certificadas

Nota. La gráfica representa el análisis cinco por qué – porque.

El resultado del análisis (Ver figura 44) arroja 4 recomendaciones. Reprogramar la tarjeta de velocidad del gobernador y ajustar los PID, suspender el suministro de gas para la generación y alimentar el sistema de generación con GNC (Gas natural comprimido), no reutilizar elementos fatigados y utilizar torques certificados a la hora de realizar la instalación de las culatas. Para finalizar, se busca la relación entre las causas raíces y los 5 modos de falla

**Figura 45**

*Causas raíz y los 5 modos de falla*

Las causas raíces debe relacionarse con al menos 1 modo de falla	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Restablecer condiciones básicas</li> <li>2. Falta de condiciones de funcionamiento / operación</li> <li>3. Deterioro Forzado</li> <li>4. Puntos Débiles de diseño</li> <li>5. Error humano / Falta de capacitación</li> </ol>
--	---

*Nota.* Relación entre las causas raíces y los 5 modos de falla

**Figura 46**

*Cinco modos de falla*

	Restablecer condiciones básicas de operación	Puntos débiles de diseño	Deterioro Forzado	Error humano / Falta de capacitación	Falta de condiciones de funcionamiento / Operación
<b>R</b> Reprogramar la					
<b>E</b> tarjeta de velocidad					
<b>S</b> del gobernador y					
<b>U</b> ajustar los PID del					
<b>L</b> motor					
<b>T</b> Suspender el					
<b>A</b> suministro de gas de					
<b>D</b> producción para la					
<b>O</b> generación y					
<b>S</b> alimentar el sistema					
<b>C</b> de generación					
<b>A</b> con GNC (Gas					
<b>U</b> natural comprimido)					
<b>S</b> No reutilizar					
<b>A</b> elementos					
<b>S</b> fatigados, realizar el					
<b>R</b> cambio de todos los					
<b>A</b> repuestos para la					
<b>Í</b> reparación de las					
<b>Z</b> culatas					
Recertificar los					
torques de					
mantenimiento.					
Utilizar herramientas					
certificadas					

Nota: Relación entre las causas raíces y los 5 modos de falla. Ver análisis completo en el apéndice Causa raíz VS 5 modos de falla

**Tabla 12**

*Cronograma 5W+2H*

CRONOGRAMA 5W + 2H		
PLAN DE ACCIÓN CAPDO	Registro de evidencia	Responsable
CORTO PLAZO		
Presentar ante la gerencia los resultados de la metodología	Análisis RCA	Jefe del pilar
Realizar requisiciones para comprar herramientas	Formato de requisiciones	Supervisor de operaciones y mantenimiento
Realizar las ordenes de compra de herramientas	Orden de compra	Coordinador de mantenimiento/ Departamento de compras
Realizar la requisición de entrenamiento de personal	Formato de requisiciones	Supervisor de operaciones y mantenimiento
Identificar los equipos más críticos para la implementación de las recomendaciones de la metodología	Análisis de criticidad	Coordinador de mantenimiento
Realizar las requisiciones de compra de los repuestos acuerdo a los equipos críticos	Formato de requisiciones	Supervisor de operaciones y mantenimiento
Realizar las órdenes de compra de acuerdo a los equipos críticos	Orden de compra	Coordinador de mantenimiento/ Departamento de compras
MEDIANO PLAZO		
Aprobar el presupuesto para la implementación del plan de acción	Acta de presupuesto	Gerencia
Ejecutar órdenes de compra de herramientas	Órdenes de compra	Coordinador de mantenimiento/ Departamento de compras
Ejecutar órdenes de compra de repuestos	Órdenes de compra	Coordinador de mantenimiento/ Departamento de compras
Ejecutar orden de compra para capacitar al personal en el manejo de herramientas	Órdenes de compra	Coordinador de mantenimiento/ Gestión humana
Entrenar el personal	Formato de asistencia	Contratista
LARGO PLAZO		
Consolidar el pedido de repuestos	Remisión de entrega de repuestos	Contratista
Organizar actividades de ejecución del plan de acción de acuerdo a la criticidad de los equipos	Plan de trabajo	Coordinador de mantenimiento
Ejecutar actividades en los equipos	Check list	Supervisor de mantenimiento Mecánico de mantenimiento
seguimiento y control de las actividades por medio de indicadores de desempeño	Indicadores de gestión	Coordinador de mantenimiento
Aplicar el ciclo PHVA (Planear, hacer, Verificar, Actuar) para mejora continua	Formato ciclo PHVA	Coordinador de mantenimiento Jefe del pilar

*Nota.* La tabla muestra el cronograma del plan de acción CAPdDo 5W + 2H.

## **7. Recomendaciones**

En la actualidad, la organización no cuenta con una metodología estructurada para realizar las investigaciones a los problemas de mantenimiento que la aquejan, es por eso que se hace necesario que la organización realice análisis de causa raíz de una manera organizada, utilizando estudios estadísticos para encontrar la desviación porcentual del evento foco, construyendo gráficas comparativas en intervalos de tiempo determinados de acuerdo al histórico de fallas relacionadas con el evento foco que permitan entender de mejor manera la dimensión del mismo y empezar a estudiar sus posibles soluciones.

En la necesidad por estabilizar las operaciones y mantener los equipos en operación, en la mayor parte de los casos se brindan soluciones rápidas y a corto plazo, sin embargo, depender de mejoras rápidas requiere que estas sean repetidas una y otra vez, resolviendo de esta manera solo los síntomas del evento foco mas no la causa raíz que lo genera, aumentando el riesgo de una falla mayor y la pérdida de rentabilidad de las operaciones cuando ello ocurra. Realizar estudios de análisis de causa raíz ayudaría a identificar la causa que genera los síntomas, mejorar la toma de decisiones y acciones correctivas para actuar en pro de la solución real evento foco, permitiendo la reducción de los tiempos medios entre falla, aumentando la disponibilidad y la confiabilidad de los equipos

Utilizar los siguientes pasos para realizar un análisis de causa raíz tienen como propósito identificar la causa o las causas que inician la generación de los eventos no conformes que atacan

al proceso productivo, estos pasos permiten mejorar la objetividad del estudio del evento foco y por ende brinda la mejor manera de resolverlo

- Identificar el problema
- Definir el problema
- Entender el problema
- Identificar la causa raíz
- Realizar acción correctiva
- Monitorear el sistema



## 8. Trabajos futuros que permiten mejorar la investigación

Instalar un cromatógrafo de gases a la entrada del proceso de generación de energía eléctrica para verificar la composición del gas combustible en tiempo real y cerciorarse de que no existan composiciones de metano, propano o butano que recalientan las cámaras de combustión del motor y por ende disminuye la vida útil de los elementos de las culatas.

Instalar un medidor de gases de escape en la salida del exhosto para permitir evaluar la cantidad de emisiones que se está produciendo en el proceso de combustión del motor permitiendo el análisis de los gases que la componen como monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados, dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno, dando lugar a una evaluación precisa del desempeño del motor que permita obtener las recomendaciones para mejorar la eficiencia del equipo.

Instalar termocuplas que midan la temperatura de trabajo de las cámaras de combustión del motor enlazado con una válvula de shutdown con el objetivo de brindarle la protección al activo al momento en que los rangos de temperatura no estén dentro de las ventanas operativas. El equipo en primer lugar genera una alarma por alta temperatura de trabajo en los cilindros y en caso de superar el tiempo de retardo programado en el control, la válvula de shutdown se active cerrando el paso de gas combustible a la máquina y apagando el equipo.

Con esta instrumentación instalada como medida preventiva se busca monitorear las variables del proceso de combustión de los grupos electrógenos permitiendo evaluar comportamiento de las mismas de manera objetiva y poder tomar acciones correctivas eficaces para optimizar la vida útil de los activos

## 9. Conclusiones

El desarrollo de la metodología de Análisis de Causa Raíz a las fallas de los elementos de culata de los grupos electrógenos permitió construir un proceso detallado, organizado y estructurado dando como resultado una herramienta útil de investigación para uso y aplicación de análisis de falla de la compañía.

La norma UNE EN -62740 es una guía de consulta muy buena para realizar el proceso de selección de la metodología de investigación de la técnica de análisis de causa raíz para estudiar los eventos focos, en ella se detallan todos los métodos recomendados para RCA según el nivel de investigación que se requiera.

La integración de la metodología de análisis de causa raíz del cinco porqué de la norma UNE-62740 con las herramientas de los pilares de mantenimiento planeado y mejoras enfocadas del programa de Mantenimiento Productivo Total como 5G's, 5W+1H, matriz Modo – Fallo – Componente, FMEA, análisis de criticidad, 5W+2H permiten hallar una relación lógica para encontrar los hechos que permiten describir y comprender el fenómeno con análisis estadístico, identificar el componente o sistema del evento foco que registra la mayor frecuencia del número de averías y la mayor frecuencia de los modos de falla para realizar un análisis de los modos de falla y los efectos más significativos, analizar su criticidad, encontrar la relación entre las causas raíces y los modos de falla, realizar el plan de acción y su cronograma de seguimiento de ejecución con el ciclo PHVA de mejora continua.

La fatiga térmica y el aumento de temperatura en motores a gas es causado por la alta estabilidad de la estructura molecular del metano (CH<sub>4</sub>) principal componente del gas combustible GNC debido a que presenta una gran resistencia al encendido por compresión. Esto

hace que se emplee mucha más energía para producir la explosión dentro de la cámara de combustión aumentando la temperatura de trabajo de los componentes mecánicos de la culata y del conjunto de fuerza del motor (Camisa, biela y pistón) y a su vez la presión de trabajo del sistema superando los rangos de diseño y de resistencia termomecánica del material acelerando las fallas por fatiga térmica y fatiga termomecánica.

Para comprobar los efectos de la fatiga térmica y termomecánica en los componentes de la culata es necesario realizar ensayos no destructivos de dureza y metalografía para estudiar el reordenamiento y el comportamiento de la estructura molecular del material en las diferentes zonas expuestas a la alta temperatura de trabajo y los esfuerzos cíclicos y mecánicos con el objetivo de identificar los aumentos del tamaño de grano para hallar las áreas en donde se fragiliza el material

Suspender el suministro de gas de proceso como gas combustible para la generación de energía del campo mejoró la temperatura de trabajo de los equipos y no han vuelto a ocurrir averías desde hace 1500 horas de operación, en comparación al último evento foco sucedido a las 850 horas de operación luego de realizar el cambio de culatas, teniendo en cuenta que este gas de proceso es pobre en la concentración de metano (0%) principal componente del gas natural comprimido GNC con el cual el fabricante recomienda trabajar el motor y muy rico en hidrocarburos gaseosos como propano (35.920%) y butano (24.183%) con los cuales el fabricante recomienda evitar trabajar para no causar aumentos elevados de temperatura y presión de trabajo dentro de las cámaras de combustión causantes de fatiga térmica y fatiga termomecánica, los cuales aumentan la probabilidad de falla debido a la inestabilidad de las estructuras moleculares de los componentes de las culatas en estas condiciones de trabajo.

Con esta acción también se espera disminuir la fatiga térmica y termomecánica de los componentes de la culata para aumentar la disponibilidad y confiabilidad de los equipos. Se adjunta análisis de cromatografía del gas de entrada de campo La Punta.

Los malos actores causaron falla por fatiga del material al reutilizar algunos componentes de las culatas para realizar su reparación. Como acción de mejora, se propone realizar el cambio completo de todo el kit de reparación de culatas y evitar averías por reincidencia en la toma de este tipo de decisiones del departamento de mantenimiento. Se adjunta cotización del proveedor de los equipos para estimar el costo de reparación de culatas. Esta cotización se limita a los repuestos y consumibles, no incluye mano de obra.



### Referencias bibliográficas

- Acevedo, C., & Agudelo, J. (2002). *Factores que inciden en la combustión de un motor operando con gas natural*, Revista Gas Vehicular . Bogotá: sd.
- Agudelo, J., & Viáfara, C. (2004). *Estudio de la fatiga en componentes de un motor biocombustible gaolina-gas natural comprimido*. Antioquia: Universidad industrial de Santander.
- Algrain, M. (2019). *Visión golística sobre las clasificaciones de los grupos electrógenos*. sd: Caterpillar Ratings Electric.
- Amell, A., & Agudelo, J. (2002). *El Gas Natural: ¿nuevo vector energético?* . Antioquia: Universidad de Antioquia.
- Castañeda, L., & Cuitiva, C. (2018). *Análisis de falla de 3 válvulas de escape de un motor de combustion interna*. Bogotá: Universidad Los Libertadores.
- Caterpillar. (2013). *Grupo motor-generator Caterpillar*. EEUU: Caterpillar.
- Copower. (2019). *Memorias de curso de entrenamiento DEIF AGC-200,AGC-4,AGC-150,TDU,DVC-310*. Bogota: Copower.
- DEIF. (2019). *Memorias de curso de entrenamiento DEIF* . Bogotá: Copowe.
- Drummond. (2015). *Aplicación de la metodología de analisis de causa raiz para la identificación del mal actor de las excavadoras catepillar 345c y 345d en la empresa Drummond*. Bogota: Drummond ltd.
- Energy, O. (2014). *Reporte de sostenibilidad*. Bogota: Omega Energy Group.
- Energy, O. (2019). *Reporte de sostenibilidad 2018-2019*. Bogota: Omega Energy Group.

- Flores, A., & Mccaherty, J. (2007). *Assess Process Performance*. USA: Caterpillar Best Practice Series.
- Heywood, J. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. sd: McGraw Hill Book Co.
- ISO8528. (2019). *Visión holística sobre las clasificaciones de los grupos electrogenos*. Europa: Caterpillar Ratings Electric Power.
- Kato, K. (1999). *Development of Engine for Natural Gas Vehicle*. sd: SAE Technical Paper.
- Krupp, U. (2007). *Microstructural Aspects and Modelling Concepts*. sd: Wiley.
- Oller, S., Salomón, O., & Oñate, E. (2001). *Thermo-mechanical fatigue analysis using generalized continuum damage mechanics for numerical methods in engineering*. sd: International Journal For Numerical .
- Omegaenergy. (2023). *Coordenadas de ubicación Campo la punta*. Colombia: Omegaenergy.
- PBI. (2022). *Petroleum blending international sas esp*. Bogota: PBI.
- Pesantez, A. (2007). *Elaboracion de un plan de mantenimiento predictivo y preventivo de funcion de la criticidad de los equipos del proceso productivo*. Ecuador: ESPL.
- SAE-1011. (1999). *Norma tecnica internacional- criterios de evaluacion para procesos de mantenimiento centrado en confiabilidad*. España: SAE Internacional.
- Tackson, A. (2017). *Fundamentals and Applications, Fourth Edition CRC Press*. Mesquita: ASM International.
- Wiley, S. (2007). *Fatigue Crack Propagation in Metals and Alloys: Microstructural Aspects and Modelling Concepts*. EEUU: Krupp.

Apéndices

Apéndice A

Cromatografía gas de proceso – Campo la Punta

Shimadzu Scientific Instruments					
7102 Riverwood Drive Columbia, MD 21046					
<b>GPA 2261 Natural Gas Results Report</b>					
Data File Name:	gas entrada la punta 100523.gcd				
Output Date:	10/05/2023				
Output Time:	10:24 a. m.				
Type:	2172-09 NAT GAS DATA				
Generated:	10/05/2023 10:24:12 a. m.				
Generated by:	System Administrator				
Modified:	10/05/2023 11:01:25 a. m.				
Modified by:	System Administrator				
Sample name:	gas entrada la punta 100523				
Sample ID:	gas entrada la punta 100523				
GAS ANALYSIS BY GC/TCD					
COMPONENT	Normalized	Gross Heating	Gross Heating	Gasoline	Specific Gravity
	Mole Percent	Value (BTU/ft3)	Value (BTU/lb)	Content (gal/1000ft3)	(ideal)
Carbon Dioxide	6.339%	N/A	N/A	N/A	0.0963
Ethane	23.642%	418.390	3372.81	N/A	0.2455
Nitrogen	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Methane	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Propane	35.920%	903.795	7286.17	N/A	0.5469
i-Butane	10.623%	345.447	2784.85	N/A	0.2132
n-Butane	13.560%	442.368	3566.20	N/A	0.2721
Neopentane	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
i-Pentane	5.400%	216.043	1741.66	N/A	0.1345
n-Pentane	3.620%	145.119	1169.89	N/A	0.0902
Hexane	0.896%	42.616	343.54	N/A	0.0267
TOTAL	100.000%	2513.779	20265	N/A	1.6253
COMPRESSIBILITY =		0.9805			
DRY BTU (IDEAL) =		2513.779		FRACTION	
DRY BTU (REAL) =		2563.656		C6 1	
				C7 0	
				C8 0	
SATURATED BTU (IDEAL) =		2469.928			
SATURATED BTU (REAL) =		2520.321			
WOBBE INDEX (REAL, DRY) =		1971.78			
UNNORMALIZED TOTAL PERCENT =		100.000%			
AVERAGE MOLAR MASS =		47.073			
<p>NOTES: IDEAL VALUES FROM GPA 2145-16                      REAL VALUES CORRECTED FOR COMPRESSIBILITY                      STD CONDITIONS: 60 °F, 14.696 PSIA &amp; SP. GR. @ AIR = 0.9995                      GAS CONSTANTS FOR C6+ (C6,C7,C8) ARE FOR N-HEXANE, N-HEPTANE, N-OCTANE                      ACTUAL PRESSURE IS USED TO COMPUTE SPECIFIC GRAVITY (REAL)                      ACTUAL PRESSURE IS USED TO COMPUTE WOBBE INDEX                      ACCURACY IS TO 1 PART IN 1000 (EXTRA DIGITS FOR ROUNDING)                      CALCULATIONS ARE BASED UPON DRY ANALYSIS</p>					
Signature: _____					
Date: _____					

**Apéndice B**

*Cotización de repuestos*



**Cotización de Repuestos**

**COT-000211651-1**

Estimados(as):

Página: 1 de 3

Fecha de emisión: 05/08/2023  
 Fecha de expiración: 20/08/2023  
 Municipio:  
 Moneda:  
 Modo de entrega:  
 Almacén:  
 Asesor comercial:  
 Soporte comercial:



Equipo		Modelo	Fabricante		Serie		SMU		0.00			
No. SOS	No. Parte	Descripción	Cod. Ext.	UM	Retornable	Cantidad	Disponible	Precio unitario	Descuento %	Precio Uni. Neto	Cargos	Total Línea**
1	000 3581230	Valve-Exhaus		PC	Yes	24.00	24.00	448,298	0.00	448,298	0	10,759,104
2	000 3581229	Valve-Inlet		PC	Yes	24.00	24.00	473,369	0.00	473,369	0	11,360,856
3	000 2137537	Guide-Valve		PC	Yes	12.00	12.00	101,218	0.00	101,218	0	1,214,616
4	000 2120936	Insert-V Sea		PC	Yes	24.00	24.00	196,086	0.00	196,086	0	4,706,064
5	000 2154812	Gasket		PC	No	2.00	0.00	1,049,160	0.00	1,049,160	0	2,098,320
6	000 9L6924	Gasket		PC	No	2.00	0.00	15,572	0.00	15,572	0	31,144
7	000 2146051	Seal		PC	No	24.00	0.00	24,007	0.00	24,007	0	576,168
8	000 2137536	Guide-Valve		PC	Yes	12.00	12.00	97,788	0.00	97,788	0	1,173,456
9	000 7C9710	Gasket		PC	No	2.00	0.00	73,040	0.00	73,040	0	146,080
10	000 3E6772	Seal-Water		PC	No	48.00	48.00	23,636	0.00	23,636	0	1,134,528
11	000 8M8283	Seal O Ring		PC	No	8.00	0.00	20,067	0.00	20,067	0	160,536

Apéndice C

Cotización de repuestos



Cotización de Repuestos

COT-000211651-1

Página: 2 de 3

No. SOS	No. Parte	Descripción	Cod. Ext.	UM	Retornable	Cantidad	Disponibile	Precio unitario	Descuento %	Precio Uni. Neto	Cargos	Total Linea**
12	000 6N9135	Gasket Plate		PC	No	2.00	0.00	375,395	0.00	375,395	0	750,790
13	000 1299452	Gasket		PC	No	14.00	10.00	35,593	0.00	35,593	0	498,302
14	000 4P3452	Gasket		PC	No	2.00	2.00	19,372	0.00	19,372	0	38,744
15	000 6V5166	Seal-O-Ring		PC	No	2.00	2.00	213,604	0.00	213,604	0	427,208
16	000 4N1918	Gasket		PC	No	4.00	0.00	624,361	0.00	624,361	0	2,497,444
17	000 4N1156	Gasket		PC	No	4.00	4.00	14,830	0.00	14,830	0	59,320
18	000 6N1396	Gasket-Oil P		PC	No	2.00	2.00	126,985	0.00	126,985	0	253,970
19	000 2143286	Insert-V Sea		PC	Yes	24.00	24.00	105,667	0.00	105,667	0	2,536,008
20	000 2N7174	Gasket		PC	No	12.00	12.00	18,445	0.00	18,445	0	221,340
21	000 2A4429	Lock		PC	Yes	98.00	98.00	6,071	0.00	6,071	0	582,816
22	000 6N7154	Rotocol A		PC	Yes	48.00	48.00	83,699	0.00	83,699	0	4,017,552
23	000 4N5906	Spring		PC	Yes	48.00	48.00	52,602	0.00	52,602	0	2,524,896
24	000 2N5775	Dowel		PC	Yes	24.00	0.00	83,328	0.00	83,328	0	1,999,872
25	000 7C0307	Gasket		PC	No	26.00	26.00	10,567	0.00	10,567	0	274,742
											Peso total extendido Lbs.	58.00



Cotización de Repuestos

COT-000211651-1

Página: 3 de 3

Subtotal: 50,043,876  
 Otros Cargos: 0  
 Total Impuestos\*: 9,508,337  
 Total oferta: 59,552,213

**Apéndice D**

Norma española UNE-EN-62740

<h1>norma española</h1>		<b>UNE-EN 62740</b>
<b>Diciembre 2015</b>		
<b>TÍTULO</b>	<b>Análisis de causa raíz (RCA)</b>	
	<i>Root cause analysis (RCA).</i> <i>Analyse de cause initiale (RCA).</i>	
<b>CORRESPONDENCIA</b>	Esta norma es la versión oficial, en español, de la Norma Europea EN 62740:2015, que a su vez adopta la Norma Internacional IEC 62740:2015.	
<b>OBSERVACIONES</b>		
<b>ANTECEDENTES</b>	Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 200 <i>Normas básicas eléctricas</i> cuya Secretaría desempeña AENOR.	
Editada e impresa por AENOR Depósito legal: M 40071:2015	LAS OBSERVACIONES A ESTE DOCUMENTO HAN DE DIRIGIRSE A: <b>AENOR</b> Asociación Española de Normalización y Certificación	74 Páginas
© AENOR 2015 Reproducción prohibida	Génova, 6 28004 MADRID-España	info@aenor.es www.aenor.es
Tel.: 902 102 201 Fax: 913 104 032		
<small>Este documento ha sido adquirido por UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER a través de la suscripción a AENORMás. Para uso en red interna se requiere de autorización previa de AENOR.</small>		