

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ A LA
FALLA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA EN LAS PLANTAS DE LA GERENCIA DE
OPERACIONES DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN APIAY – GDA DE
ECOPETROL S.A.

GERMÁN WILLIAM HERNÁNDEZ FLÓREZ
JOSÉ YUSEP DÁVILA ARIAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2018

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ A LA
FALLA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA EN LAS PLANTAS DE LA GERENCIA DE
OPERACIONES DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN APIAY – GDA DE
ECOPETROL S.A.

GERMÁN WILLIAM HERNÁNDEZ FLÓREZ
JOSÉ YUSEP DÁVILA ARIAS

Monografía de grado presentada como requisito para optar al título de
Especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director
CARLOS ANDRÉS QUIÑONES BUITRAGO
Especialista en Gerencia de Mantenimiento

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2018

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a mi familia especialmente a mi hija María Alejandra Dávila Sierra. El mayor sacrificio para el cumplimiento de esta meta fue el tiempo que deje de compartir con ustedes. Al ingeniero William Barbosa por el apoyo incondicional para realizar este postgrado y por permitirme llevar a cabo varias acciones en el Departamento de Mantenimiento, relacionadas con los conceptos y habilidades adquiridas durante el programa.

A todos los compañeros de la empresa que aportaron sus valiosas experiencias y conocimientos en este trabajo.

José Yusep Dávila Arias

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	17
1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA GERENCIA APIAY	17
1.2 PLANTAS DE PROCESO DE LA GERENCIA APIAY	18
1.2.1 Estación de Tratamiento de Apiay	18
1.2.2. Planta de Gas de Apiay	19
1.2.3 Refinería de Apiay	21
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	23
1.4 OBJETIVOS	25
1.4.1 Objetivo General	25
1.4.2 Objetivos Específicos:	25
1.5 JUSTIFICACIÓN	26
2. MARCO TEÓRICO	27
2.1 PROCESOS DE LA GERENCIA APIAY	27
2.1.1 Proceso de Refinación	27
2.1.1.1 Descargue y Almacenamiento de Crudo	28
2.1.1.2 Precalentamiento del Crudo	28
2.1.1.3 Destilación Atmosférica y Extracción con Vapor	29
2.1.1.4 Destilación al Vacío	29
2.1.1.5 Enfriamiento de Productos	30
2.1.1.6 Almacenamiento de Productos	30
2.1.2 Proceso de Quema de Gas Húmedo	31
2.1.3 Sistema de Suministro de Energía Eléctrica	34

2.1.3.1 Funcionamiento en Paralelo	36
2.2 DISPONIBILIDAD	37
2.3 CONFIABILIDAD	38
2.4 HERRAMIENTAS USADAS EN EL MEJORAMIENTO DE ACTIVOS	40
2.4.1 Análisis de Criticidad (CA).....	40
2.4.2 Inspección Basada en Riesgo (RBI)	41
2.4.3 Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF)	42
2.4.4 Análisis Causa Raíz (RCA)	43
2.4.4.1 Paso 1: Responder a un Incidente y Conservar la Evidencia	44
2.4.4.2 Paso 2: Organización del Equipo	44
2.4.4.3 Paso 3: Análisis de la Falla y Verificación de las Causas Raíz.....	45
2.4.4.4 Paso 4: Comunicación de los Resultados y Oportunidades de Mejora	45
2.4.4.5 Paso 5: Implementación del Seguimiento	46
2.5 ARBOL LÓGICO DE FALLA	46
3. GENERADORES DE MEDIA TENSIÓN	48
3.1 SISTEMA DE POTENCIA	49
3.2 SISTEMA DE PROTECCIONES.....	50
3.2.1 Transformadores de Instrumento.....	51
3.2.2 Relevador.....	51
3.2.3 Interruptor de Potencia	51
4. RECOLECCIÓN DE DATOS	53
4.1 PLAN DE MANTENIMIENTO ACTUAL	53
4.1.1 Rutina No.1.....	53
4.1.2 Rutina No.2.....	54
4.1.3 Rutina No.3.....	54
4.1.4 Rutina No.4.....	55
4.1.5 Rutina No.5.....	55
4.2 FICHA TÉCNICA GENERADOR ELÉCTRICO KATO	56

5. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ.....	57
5.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	57
5.1.1 Reporte de Falla	57
5.1.2 Valoración de Consecuencias Económicas	58
5.1.3 Valoración de la Falla	59
5.1.4 Recolección de Evidencias	60
5.1.4.1 Personas.....	60
5.1.4.2 Papel.....	62
5.1.4.3 Partes.....	69
5.1.4.4 Posición.	¡Error! Marcador no definido.
5.1.5 Línea de Tiempo	71
5.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	72
5.2.1 Planteamiento del Problema.....	72
5.2.2 Fenómeno.....	73
5.3 ANÁLISIS DE LAS CAUSAS POSIBLES.....	73
5.3.1 Lluvia de Ideas.....	73
5.4 ANÁLISIS DE LAS CAUSAS PROBABLES.....	74
5.4.1 Árbol de Fallas	74
5.4.2 Verificación de Causas Raíz	74
5.5 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	77
5.5.1 Soluciones de la Causa Raíz.....	77
5.5.2 Plan de Acción	78
6. CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFÍA.....	81

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación geográfica Gerencia Apiay.....	17
Figura 2. Estación de Tratamiento de Apiay.	19
Figura 3. Planta de Gas de Apiay.	20
Figura 4. Refinería de Apiay.	22
Figura 5. Diagrama del Proceso.	23
Figura 6. Confiabilidad Plantas GDA – Primer semestre 2017.	24
Figura 7. Diagrama de proceso de la Refinería de Apiay.	27
Figura 8. Diagrama de proceso de Planta de Gas de Apiay.	31
Figura 9. Diagrama de suministro de energía eléctrica.....	35
Figura 10. Sincronización de generadores paralelos con lámparas de prueba.	37
Figura 11. Diagrama de flujo del AMEF.	43
Figura 12. Estructura del Árbol Lógico de Fallas.	47
Figura 13. Esquema de un Generador Eléctrico.....	48
Figura 14. Esquema general de un sistema eléctrico de potencia.....	50
Figura 15. Esquema de alimentación de carga a través de un transformador o un tablero.....	52
Figura 16. Generador eléctrico KATO.....	56
Figura 17. Histórico de Potencia de los Generadores AXG901A/C/D.....	63
Figura 18. Histórico del Generador AXG901B del 5 al 13 de febrero.	64
Figura 19. Histórico del Generador AXG901B del 12 de febrero.	64
Figura 20. Corrientes de falla registradas en el TR – 30 por 4.160 V.	65
Figura 21. Árbol de equipos GDA en SAP.	66
Figura 22. Diodos quemados (2 positivos, 1 negativo).	69
Figura 23. Varistor de platos de diodos quemados.....	69

Figura 24. Contacto hembra interruptor AXG901B con rastro de alta temperatura.	70
Figura 25. Contacto macho interruptor AXG901B con rastro de alta temperatura.	70
Figura 26. Línea de tiempo para el evento de falla.	71
Figura 27. Árbol de Fallas.	75

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición del Gas de Carga de la Planta de Gas de Apiay.	21
Tabla 2. Alternativas de Operación de la Refinería de Apiay.	22
Tabla 3. Reporte de Falla.	57
Tabla 4. Pérdidas Económicas en Refinería.	58
Tabla 5. Pérdidas Económicas en Planta de Gas.	58
Tabla 6. Matriz de Valoración RAM.	59
Tabla 7. Resultados de la Valoración RAM.	60
Tabla 8. Log Eventos AKG901B en Power CC.	65
Tabla 9. Plan de Mantenimiento AXG901B.	66
Tabla 10. Operaciones de Hoja de Ruta para el AXG901B.	67
Tabla 11. Histórico de Órdenes de Mantenimiento.	68
Tabla 12. Secuencia de Eventos Asociados a la Falla.	71
Tabla 13. Falla Suministro Energía Planta GDA.	72
Tabla 14. Verificación de Causas Raíz.	75
Tabla 15. Soluciones de la Causa Raíz.	77
Tabla 16. Plan de Acción.	78

RESUMEN

TÍTULO: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ A LA FALLA DE SUMINISTRO DE ENERGÍA EN LAS PLANTAS DE LA GERENCIA DE OPERACIONES DE DESARROLLO Y PRODUCCIÓN APIAY – GDA DE ECOPETROL S.A.¹

AUTORES: GERMÁN WILLIAM HERNÁNDEZ FLÓREZ y JOSÉ YUSEP DÁVILA ARIAS.²

PALABRAS CLAVES: GENERACIÓN, ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ, PLANTAS DE PROCESO, PÉRDIDAS DE PRODUCCIÓN, ÁRBOL DE FALLA.

DESCRIPCIÓN O CONTENIDO:

En la presente monografía se expone un ejemplo práctico, referente a la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz aplicada a la falla en el suministro de energía que se presenta en las plantas de proceso de la Gerencia de Operaciones de Desarrollo y Producción Apiay (GDA) de Ecopetrol S.A.

La necesidad surge a raíz de los retrasos, reprocesos y pérdidas económicas causadas en las plantas de tratamiento de crudo, refinación y quema de gas húmedo de la GDA, a causa de las fallas de suministro de energía del sistema de generación local.

Para elaborar el Análisis de Causa Raíz (RCA), se conformó un equipo de trabajo con profesionales en diferentes áreas de la GDA, convocados por parte de Confiabilidad para la creación del “Árbol Lógico de Falla”, con el objetivo de identificar el evento de falla de más alto impacto, determinar los costos asociados a esta falla identificada, establecer la(s) causa(s) raíz(es) y definir un plan para la implementación de acciones de control, que permitan aumentar la confiabilidad del sistema de generación viabilizando el cumplimiento los indicadores de confiabilidad y disponibilidad establecidos por la empresa.

El resultado de éste análisis permitió concluir que, para lograr una eficiente gestión de mantenimiento con alta confiabilidad de los equipos, es fundamental establecer rutinas de mantenimiento específicas para cada equipo y/o componente crítico, asegurando que el personal tenga las competencias requeridas para ejecutarlas.

¹ Monografía.

² Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Carlos Andrés Quiñones Buitrago, Especialista en Gerencia de Mantenimiento.

SUMMARY

TITLE: APPLICATION OF THE ROOT CAUSE ANALYSIS METHODOLOGY TO THE FAILURE OF ENERGY SUPPLY IN THE PLANTS OF THE MANAGEMENT OF DEVELOPMENT AND PRODUCTION OPERATIONS APIAY - ECOPETROL S.A.³

AUTHOR: GERMÁN WILLIAM HERNÁNDEZ FLÓREZ and JOSÉ YUSEP DÁVILA ARIAS.⁴

KEYWORDS: GENERATION, ROOT CAUSE ANALISYS, PROCESS PLANTS, LOST PRODUCTION, FAULT TREE.

DESCRIPTION OR CONTENTS:

The main objective of this monograph is for presenting a practical example, referring to the application of the root cause analysis methodology applied to the failure in the energy supply that occurs in the process plants of the Apiay Development and Production Operations Management (GDA) of Ecopetrol S.A.

The need arises as a result of the delays, reprocesses and economic losses caused in the plants of treatment of crude, refining and burning of humid gas of the GDA, because of the failures of energy supply of the local generation system.

To develop the Root Cause Analysis (RCA), a work team was formed with professionals in different areas of the GDA, convened by Reliability for the creation of the "Logical Fault Tree", with the objective of identifying the event of failure of higher impact, determine the costs associated with this failure, establish the root cause and define a plan for the implementation of control actions, which will increase the reliability of the generation system by enabling compliance with the reliability and availability indicators established by the company.

The result of this analysis showed that, to obtain an efficient maintenance management with high reliability of equipments, it is essential to establish specific maintenance routines for each team and / or critical component, ensuring that the personnel have the required competencies to execute them.

³ Monograph.

⁴ Faculty of Engineering Physics and Mechanics. Mechanical Engineering School. Specialization in Maintenance Management. Director: Carlos Andrés Quiñones Buitrago, Maintenance Management Specialist.

INTRODUCCIÓN

Las plantas de proceso de la Gerencia Apiay, son estratégicas para el desarrollo de los campos Apiay, Suria y Reforma. La producción de gas y derivados del petróleo hacen de estas plantas una fuente importante de ingresos económicos para la Gerencia. Por tal motivo, la confiabilidad en el suministro de energía a estas plantas es de vital importancia para el logro de los propósitos económicos de la Gerencia.

Esta investigación examina los conceptos teóricos y la aplicación práctica del procedimiento de Análisis de Causa Raíz (RCA), considerado como una estricta metodología para la evaluación y reparación de problemas en diferentes tipos de falla, basado en un proceso coherente, a través de herramientas como los árboles de causas de fallas, a fin de aumentar la motivación del recurso humano del grupo involucrado en los procesos.

Se compilaron datos relacionados con el evento de falla en el suministro de energía a las plantas, basado en las diferentes herramientas de información y gestión con los que cuenta la GDA. Se profundiza en los diferentes conceptos teóricos que tienen relación directa con el evento de falla en los generadores, que son la fuente para el suministro de energía en las plantas.⁵

Se presentará la causa raíz de la falla más representativa en el suministro de energía a las plantas de proceso de la GDA, que trajo consigo una afectación financiera importante para Ecopetrol. En esta investigación se recurre a la aplicación de la metodología RCA con el fin de mejorar la disponibilidad de los generadores de Apiay, lo que finalmente redundará en el incremento de la confiabilidad de las

⁵ MORA, Luis. Mantenimiento Industrial Efectivo. Medellín: Editorial COLDI, 2009. 340p. ISBN: 978-958-98902-0-2.

Plantas de Proceso, cuyos activos son considerados críticos para la producción, disminución del indicador de diferida (barriles equivalentes de crudo que dejan de producirse y por lo tanto dejan de venderse) y la reducción de costos por la compra de energía eléctrica a la EMSA ESP a un mayor precio.

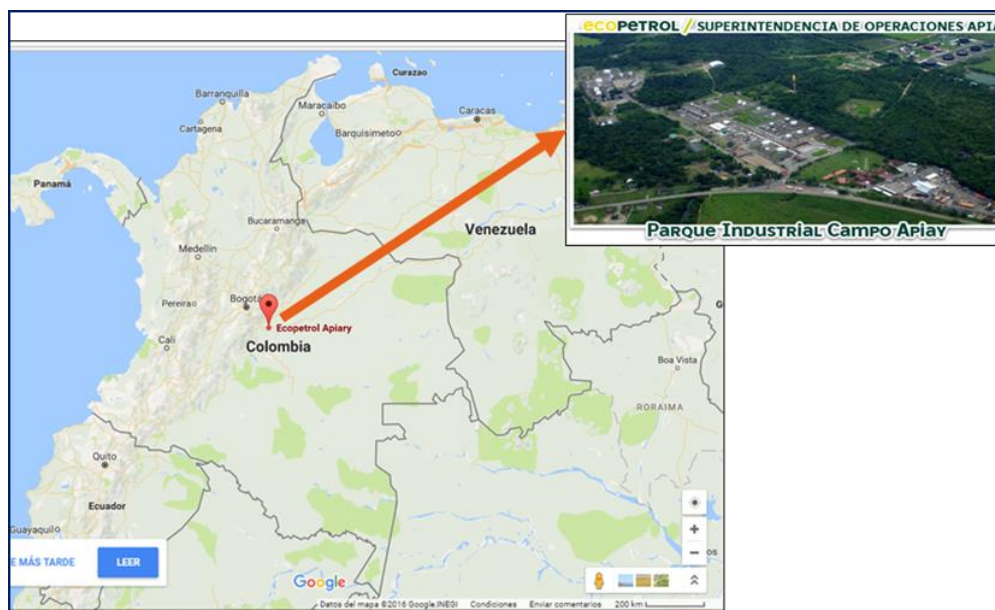
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA GERENCIA APIAY

La Gerencia de Operaciones de Desarrollo y Producción Apiay – GDA de Ecopetrol S.A, focaliza sus operaciones en los siguientes campos del Piedemonte Llanero: Apiay, Suria, Reforma, Libertad y Pachaquiario; ubicados en el departamento del Meta, con una extensión de operación de 29,767 HA.

La sede se encuentra en el parque industrial ubicado en el campo Apiay, área rural del municipio de Villavicencio, sobre el km 32 en la vía Villavicencio - Puerto López.

Figura 1. Ubicación geográfica Gerencia Apiay.



Fuente: GOOGLE LLC. Búsqueda en línea: Ecopetrol Apiay. [En línea]. [Consultado el: 04 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/search/ecopetrol+apiay>

La cadena completa del negocio que maneja este campo es: exploración, producción, tratamiento, refinación y transporte, con el soporte de la infraestructura nacional.

1.2 PLANTAS DE PROCESO DE LA GERENCIA APIAY

Actualmente, la Gerencia Apiay cuenta con una producción promedio de 14.500 barriles de crudo por día (BOPD), nueve millones de pies cúbicos de gas por día (MMSCFD) y refinación de 1.800 barriles de crudo por día. Estos volúmenes son tratados en las plantas de proceso, las cuales tienen un consumo de energía aproximado de 1,6 MW.

1.2.1 Estación de Tratamiento de Apiay. La planta de tratamiento Apiay (ver figura 2) cuenta con una capacidad instalada para procesar 30.000 barriles de crudo por día (BOPD) y 100.000 barriles de agua por día (BWPD), provenientes de los campos Apiay, Suria y Reforma.

Figura 2. Estación de Tratamiento de Apiay.



Fuente: ICCD LTDA. Proyectos. Estación Apiay. [En línea]. [Consultado el: 05 de mayo de 2018]. Disponible en: <http://www.iccdltda.com.co/sitio/proyectos/estacion-apiayecopetrol>

1.2.2. Planta de Gas de Apiay. De los procesos de producción y explotación, es posible obtener gas natural, el cual no es otra cosa que una mezcla de vapores de crudo (hidrocarburos), que además, posee determinado contenido de impurezas, para el caso, son tratados en la planta de gas (ver figura 3).⁶

Usualmente, los vapores de hidrocarburos encontrados son el propano, metano, butanos, etano, propano y reducidas cantidades de octanos, heptanos y hexanos, así como algunos gases de mayor peso molecular. Los sedimentos hallados en el

⁶ ECOPEPETROL S.A. Manual de operaciones Planta de Gas Apiay. Apiay, Villavicencio: La Compañía, 2014. 66 p.

gas incluyen sulfuros de hidrógeno, dióxidos de carbono, vapor de agua, y en algunos casos hidrógeno.

Figura 3. Planta de Gas de Apiay.



Fuente: ECOPETROL S.A. Manual de operaciones Planta de Gas Apiay. Apiay, Meta: La Compañía, 2014. 66 p.

En la tabla 1 se puede apreciar la composición del gas en unidades de porcentaje, que se procesan actualmente en la Planta de Gas de Apiay; además, la capacidad de tratamiento de ésta unidad es de aproximadamente veinte MMSCFD (millones de pies cúbicos estándar día).

Tabla 1. Composición del gas de carga de la Planta de Gas de Apiay.

Composición	Carga	Carga	Gas Seco	Mezcla	Etano	Unidades
	8/2002		Enero de 2012			%
CO ₂	2,68	3,5451	3,5471	2,7559	4,9916	
N ₂	0,74	0,9553	0,8513	0,5012	0,3530	
O ₂						
C ₁	61,22	71,9047	80,2682	82,2012	38,5116	
C ₂	13,30	14,7165	11,6897	10,9851	53,5492	
C ₃	8,98	5,0965	2,3342	2,3961	2,2890	
IC ₄	3,26	1,3457	0,4726	0,4449	0,0914	
NC ₄	4,85	2,0810	0,8050	0,6851	0,2121	
IC ₅	2,67	0,1955	0,0121	0,0143	0,0125	
NC ₅	2,30	0,0667	0,0153	0,0161	0,0171	
C ₆₊	0	0,0984	0,0128	0,0117	0,0172	
Sumatoria	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
Peso molecular promedio	27,466	22,3042	19,9875	19,5807	25,7689	
Factor de compresibilidad		0,9962	0,9970	0,9971	0,9946	
Gravedad específica del gas		0,7701	0,6901	0,6761	0,8897	
Gravedad específica (real)	0,9482	0,7731	0,6922	0,6780	0,8945	
Poder cal neto (real) btu/pe ₃		1127,3535	1012,9759	1016,0490	1279,6845	
NBN		8,3551	3,9303	3,7207	6,4819	

Fuente: ECOPETROL S.A. Manual de operaciones Planta de Gas Apiay. Apiay, Villavicencio: La Compañía, 2014. 66 p.

1.2.3 Refinería de Apiay.⁷ La planta está diseñada para procesar alrededor de 2500 barriles por día de crudo Castilla, con una de gravedad API aproximada de 13.2°, y así, producir como subproductos: Kerosene, Nafta, ACPM y principalmente Asfalto tipo 60 - 80, todo a través del fraccionamiento en una torre correctora de chispa al vacío, y una unidad de destilación atmosférica (ver figura 4).

La planta tiene flexibilidad para operar desde el 60% hasta 110% de la capacidad estándar o nominal. Además, tiene la facilidad, por diseño, de operar con tres alternativas diferentes, tal como se muestran en la tabla 2.

⁷ ECOPETROL S.A. Manual de operaciones de la Refinería de Apiay. Apiay, Villavicencio: La Compañía, 2014. 90 p.

Figura 4. Refinería de Apiay.



Fuente: ECOPETROL S.A. Manual de operaciones de la Refinería de Apiay. Apiay, Villavicencio: La Compañía, 2014. 90 p.

Tabla 2. Alternativas de operación de la Refinería de Apiay.

	1ª Alternativa	2ª Alternativa	3ª Alternativa
	Máxima Bencina	Máximo Kerosene	Máximo ACPM
Nafta	175 Barriles	98 Barriles	98 Barriles
Cima	430° F	280° F	280° F
Kerosene	243 Barriles	320 Barriles	154 Barriles
Plato 10	550° F	550° F	430° F
ACPM	288 Barriles	288 Barriles	454 Barriles
Plato 18	635° F	635° F	635° F

Fuente: ECOPETROL S.A. Manual de operaciones de la Refinería de Apiay. Apiay, Villavicencio: La Compañía, 2014. 90 p.

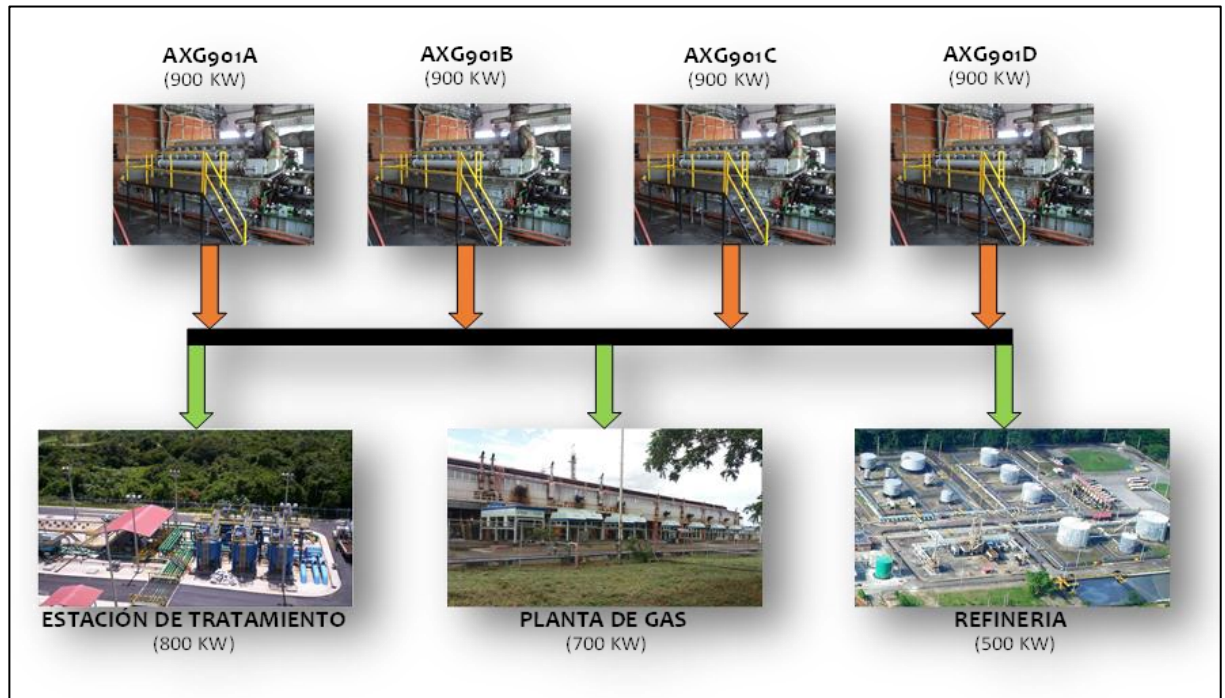
La torre atmosférica T-50 separa el crudo en varias fracciones útiles de rangos de ebullición específicos, tales como Nafta, Kerosene, ACPM y crudo reducido. La torre de vacío T-504 o correctora de chispa, separa el crudo reducido en tres corrientes

menores: una pequeña corriente de cima que se separa en el D-525, que básicamente es un ACPM pesado, un flujo mayor de gasóleo en la parte media de la torre y el producto de fondo y principal que es el asfalto.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las fallas de suministro de energía y la baja confiabilidad del sistema de generación local ilustrado en la figura 5, ocasiona retrasos y reprocesos en el proceso de refinación y quema de gas húmedo en las plantas de la Gerencia de Operaciones de Desarrollo y Producción Apiay Ecopetrol S.A.

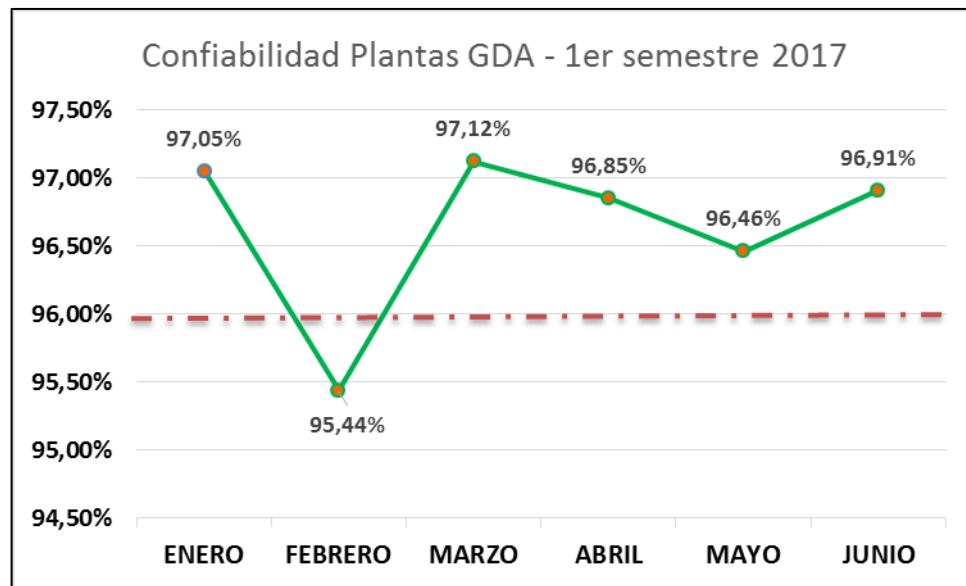
Figura 5. Diagrama del Proceso.



Una forma para aumentar la confiabilidad operacional de un activo, en su entorno normal de operación, es a partir del diagnóstico de los requerimientos reales de mantenimiento, optimizando las paradas inesperadas con la ayuda de diferentes herramientas, técnicas y filosofías de mantenimiento, en este caso mediante el método cualitativo de análisis de falla, que ayuda a identificar de forma sistemática, las tareas o acciones que se deben realizar para garantizar el correcto funcionamiento de los diferentes equipos, dentro de su contexto operacional.⁸

La confiabilidad de las Plantas de la GDA es un indicador mensual calculado mediante el software *Reline* (ver figura 6), y está dada como la probabilidad de que el sistema cumpla una función en un tiempo y bajo unos parámetros determinados, considerando la importancia de los activos en sus condiciones normales de operación, así como los posibles efectos y resultados de sus modos de falla.

Figura 6. Confiabilidad Plantas GDA – Primer semestre 2017.



⁸ BORRÁS, Carlos. Memorias de clase de Principios de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. 2014.

La falla de suministro de energía que se presentó el mes de febrero de 2017 tuvo una duración de cuatro horas en su restablecimiento, impactando el indicador de confiabilidad de las plantas de la GDA, quedando por debajo de la meta corporativa mensual (96%).

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General. Aplicar la metodología de análisis de causa raíz para aumentar la confiabilidad de las plantas de recolección y tratamiento de crudo y gas de la Gerencia de Operaciones de Desarrollo y Producción Apiay – GDA de Ecopetrol S.A.

1.4.2 Objetivos Específicos:

- Identificar el evento de falla de alto impacto que haya afectado la confiabilidad de las Plantas de la GDA.
- Establecer los costos asociados a la falla identificada como de alto impacto.
- Identificar las causas raíces del evento de alto impacto, por medio del árbol de falla.
- Establecer un plan para la implementación de acciones de control, que permita aumentar la confiabilidad de las Plantas de la GDA.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Una falla en el suministro de energía en las Plantas de la Gerencia de Operaciones de Desarrollo y Producción Apiay (GDA) de Ecopetrol S.A., genera retrasos y reprocesos en los sistemas de tratamiento y refinación de crudo y quema de gas húmedo, ocasionando afectaciones económicas que impiden el cumplimiento de las metas organizacionales.

Dado el nivel de efectividad y objetividad que tiene para enfocar tanto el origen del problema, como la implementación de los respectivos planes de acción, el análisis de causa raíz, ha sido una metodología muy efectiva en ECOPETROL y en general, en la industria de hidrocarburos, como metodología para la eliminación de fallas en equipos y/o sistemas, siendo parte fundamental en el proceso de eliminación de defectos que se maneja en la ingeniería de mantenimiento.

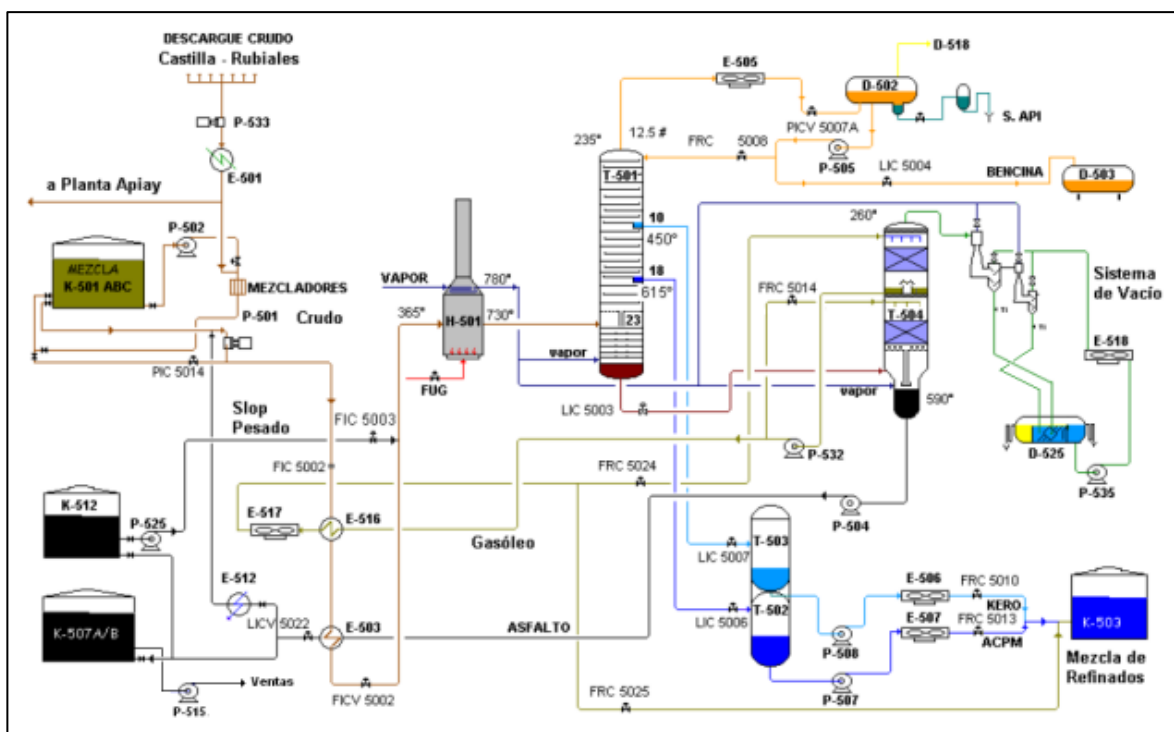
Para el caso puntual de las Plantas de la GDA, se requiere implementar un plan de mejora en el mantenimiento del sistema de suministro de energía de las mismas, que viabilice el cumplimiento los indicadores de confiabilidad y disponibilidad establecidos por la empresa, de una manera costo-efectiva.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 PROCESOS DE LA GERENCIA APIAY

2.1.1 Proceso de refinación.⁹ En la figura 7, se puede observar el esquema general del proceso de refinación, posteriormente, se describen las funciones de cada una de los sectores que integran el proceso en la planta.

Figura 7. Diagrama de proceso de la Refinería de Apiay.



Fuente: ECOPEPETROL S.A. Manual de operaciones de la Refinería de Apiay. Apiay, Villavicencio: La Compañía, 2014. 90 p.

⁹ ECOPEPETROL S.A. Manual de operaciones de la Refinería de Apiay. Apiay, Villavicencio: La Compañía, 2014. 90 p.

2.1.1.1 Descargue y Almacenamiento de Crudo. En este sector se acopia el crudo proveniente de los campos Castilla y Rubiales en carro tanques, el cual posteriormente es almacenado en los tanques denominados K-501 A/B/C, en la cantidad necesaria para obtener la mezcla 25% de Castilla - 75% de Rubiales.

Actualmente la carga de la Refinería es 100% Crudo Caño Sur.

El proceso de preparación de la mezcla se inicia cuando por un sistema de mezcladores se hacen atravesar los flujos de crudo, y la completa homogeneización se da mediante agitación dentro del tanque de almacenamiento. Al realizar el almacenamiento dentro de un tanque, se presenta el fenómeno de asentamiento del agua contenida en el crudo, la cual posteriormente es drenada periódicamente para garantizar la calidad de la materia prima y estabilidad de los procesos.

2.1.1.2 Precalentamiento del Crudo. La finalidad de éste sector es aumentar la temperatura de los flujos de crudo que van a ser introducidos en el horno, a través del intercambio de calor con flujos de productos con un nivel mayor de temperatura.

Para el caso, los flujos de Asfalto y Gasóleo extraídos de la torre de vacío T-504, que se encuentran a alta temperatura, y son introducidos en intercambiadores de carcasa y tubos, por donde además se introduce el crudo a temperatura ambiente, logrando así la transferencia de calor entre las dos corrientes de productos; de modo tal, que se logra disminuir la temperatura de los productos refinados, aumentar la temperatura del crudo, disminuyendo la carga térmica del horno, y de éste modo reduciendo el consumo de gas combustible.

2.1.1.3 Destilación Atmosférica y extracción con vapor. En el sector de destilación atmosférica el crudo es separado en diferentes fracciones, al ser introducido en la T-501 por la zona flash de la misma.

De este modo, en la parte superior de la T-501 se produce bencina, además, de las corrientes laterales e intermedias se obtiene kerosene y aceite para motor (ACPM). Y al final (en el fondo) se obtiene crudo reducido, el cual corresponde al tipo de crudo al que se le ha retirado sus fracciones más livianas, y que sirve como carga a la T-504.

La función de las torres extractoras es la de retirar compuestos livianos del ACPM y el Kerosene, a través de la inyección de vapor de agua a baja presión. Esto influye directamente sobre el Punto Inicial de Ebullición (PIE), aumentando la temperatura de chispa o flash point, de modo que la calidad del producto mejora considerablemente. El solo paso del kerosene y el ACPM por las torres empacadas (T-502 y T-503), produce una separación de las fracciones más livianas que regresan a la T-501.

La extensión de la reducción del crudo por destilación atmosférica, está limitada por la temperatura a la cual empieza a presentarse la ruptura térmica, debido a que los productos del craqueo térmico son indeseables en los productos vírgenes. Cuando se desea reducir el crudo, más allá de este punto, se emplea la destilación al vacío.

2.1.1.4 Destilación al Vacío. Esta sección del proceso permite la obtención de Asfalto y Gasóleo, tomando como base las corrientes de crudo pesado del fondo de la T-501.

La presión de operación de la T-504 es inferior a la presión atmosférica (-26.4 mm Hg), por esta razón, el uso de una bomba de transferencia de crudo hacia la T-501

es innecesaria. Por otro lado, ya que la presión de la columna es baja, la presión parcial de los componentes disminuye considerablemente, lo que facilita la separación y extracción de las fracciones, a menor temperatura que la requerida a presión atmosférica.

2.1.1.5 Enfriamiento de Productos. Con el fin de garantizar altos niveles de eficiencia energética y condiciones seguras de almacenamiento, es indispensable disminuir la temperatura de los derivados obtenidos, una vez realizado todo el proceso de separación.

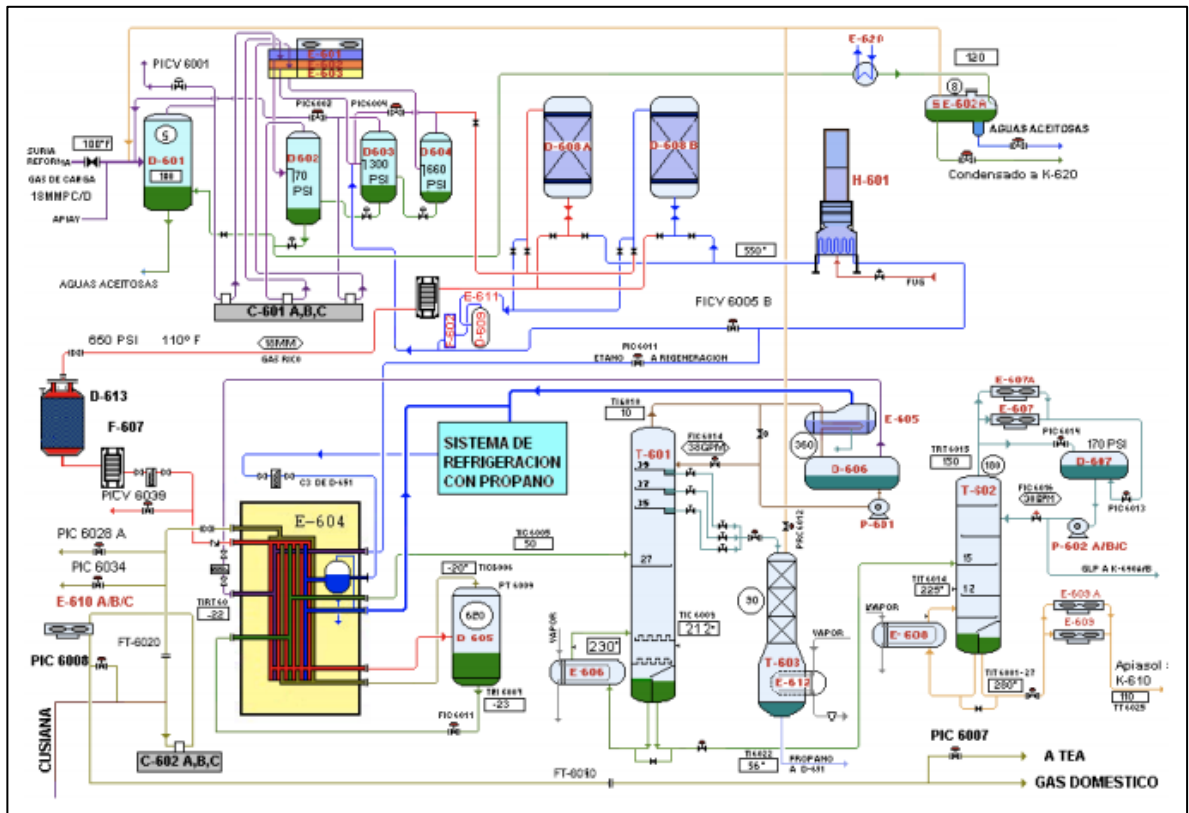
Por un lado, las altas temperaturas de los productos obtenidos ayudan en el proceso de refinación al aportar una parte del calor al calentamiento del crudo que va a ingresar al proceso de refinación, así se evita que toda la carga calorífica de los productos sea vertida a la atmósfera en los tanques de almacenamiento, aprovechando además la energía y disminuyendo los posibles impactos negativos al medio ambiente. Por otro lado, se reducen los riesgos por ocurrencia de incidentes operacionales como explosiones y destrucción de los tanques de almacenamiento por sobrepresión de los vapores de hidrocarburos almacenados.

2.1.1.6 Almacenamiento de Productos. Realizar el correcto almacenamiento de los productos de refinación permite dos aspectos importantes: en primer lugar, se garantiza el seguimiento a los balances volumétricos de la planta, en segunda medida, permite un monitoreo y seguimiento constante de las características de los productos, garantizando la calidad de los mismos.¹⁰

¹⁰ ECOPETROL S.A. Manual de operaciones Planta de Gas Apiay. Apiay, Villavicencio: La Compañía, 2014. 66 p.

2.1.2 Proceso de quema de gas húmedo.¹¹ A continuación, se presenta de forma general el proceso de la Planta de Gas de Apiay (ver figura 8).

Figura 8. Diagrama de proceso de Planta de Gas de Apiay.



Fuente: ECOPEPETROL S.A. Manual de operaciones Planta de Gas Apiay. Apiay, Villavicencio: La Compañía, 2014. 66 p.

El gas que procede de los separadores de tres fases (gas/agua/crudo) y que se encuentran en los campos de Apiay, Reforma - Libertad y Suria, son dirigidos hacia la Planta de Gas, donde los compresores C-601 A/B/C, elevan su presión en tres

¹¹ ECOPEPETROL S.A. Manual de operaciones Planta de Gas Apiay. Apiay, Villavicencio: La Compañía, 2014. 66 p.

etapas, pasando desde los 5 hasta los 647 PSI. Posteriormente, el gas es introducido en los intercambiadores E-601/602/603 para disminuir su temperatura a niveles aceptables dentro del proceso. Por otro lado, los fluidos condensados producto del enfriamiento, son enviados a los tanques (contenedores) D-601/602/603 que están localizados a la salida de las diferentes etapas del ciclo de compresión.

Posterior al ciclo de compresión, el gas es introducido en la unidad W-601, la cual busca disminuir el porcentaje de humedad o vapores de agua presente en el gas, dicha unidad está compuesta por:

- Dos secadores, D-608 A/B.
- Un tambor, D-609 para el gas de regeneración.
- Un enfriador, E-611, para el gas de regeneración.
- Un horno H-601, para calentar hasta 550° F el gas de regeneración.
- Dos filtros F-601 A/B para el gas rico libre de agua.
- Dos filtros F-602 A/B para el gas de regeneración.

La mezcla de gas saturado ingresa al secador D-608 A o B, los cuales operan de forma alternativa, de modo que mientras en uno de ellos está realizando el secado, el otro realiza la regeneración, buscando así disminuir las cantidades de agua en forma de vapor presente en el gas, evitando la creación de hidratos en la siguiente etapa de enfriamiento.

La mezcla de gas libre de agua (Gas Rico) producto del proceso de secado, es introducido en los filtros F-601 A/B, cuya intención es retirar el posible material particulado presente en la mezcla. Posteriormente, dicha mezcla es llevada hasta un dispositivo encargado de absorber el mercurio (D-613), para luego llevarlo hasta el filtro F-607. Para completar el proceso de tratamiento del gas, la mezcla completa se lleva a un proceso de enfriamiento en el intercambiador E-604, para

posteriormente, realizar una correcta separación de los gases presentes en la mezcla.

El proceso de separación ocurre a altas presiones dentro del D-605, los vapores que se encuentran en la parte superior, son sustraídos y enviados a los compresores C-602 A/B/C, que elevan su presión hasta un máximo de 1750 PSI, presión máxima de operación de la línea de transporte de gas. Posteriormente, el gas obtenido es llevado a los intercambiadores E-610 A/B/C que reducen su temperatura para la posterior inserción a la línea que transporta y surte el gas hasta la ciudad de Bogotá. Por otro lado, los condensados obtenidos del fondo del D-605 son llevados al E-604 y de allí pasan a la torre de fraccionamiento T-601, que es una unidad proceso que se encarga de retirar el etano presente en el gas.

El vapor presente en la parte superior de la T-601 de forma parcial es condensado en el E-605. La mezcla saturada (líquido/gas) es llevada hasta el tambor D-606 que se encarga de separar las dos fases. El flujo líquido lleva nuevamente a la parte superior de la torre, mientras que el gas se introduce en el E-604, y seguidamente inyecta en el horno H-601 y pasa al secador respectivo (el que se encuentre realizando el proceso de regeneración); posteriormente, es llevado al E-611 para retirarle el exceso de agua.

El flujo condensado en el fondo del D-609 (agua) es llevado hasta el D-601, mientras que los vapores de la parte superior son dirigidos hacia los filtros F-602 A/B, de donde se llevan al D-603, que almacena el gas que se introducirá a la tercera etapa de compresión.

Una parte del flujo de condensado del fondo de la T-601 se lleva hacia el E-606. El condensado restante (compuesto en su mayoría por butano, propano y otros compuestos pesados) es llevado como fluido de carga a la torre T-602, encargada del retiro de butano de la mezcla saturada.

Ahora bien, los vapores de la parte superior de la T-602 son introducidos en los intercambiadores E-607 y E-607 A, de donde se obtiene condensados de butano y propano, que se almacena y fracciona en el D-607, de allí, una parte es llevada como reflujo a la T-602, y la otra se almacena como Gas Licuado de Petróleo (GLP) en los contenedores de tipo esférico K-690 A/B.

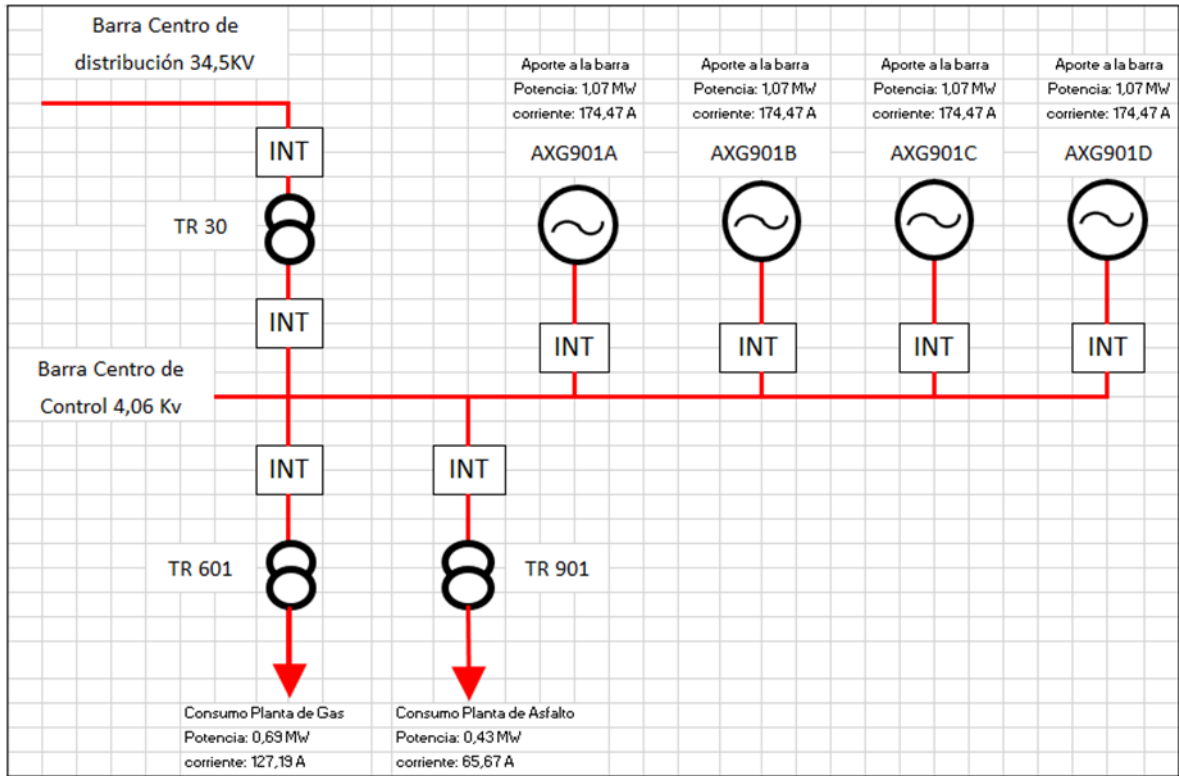
Una parte del condensado del fondo de la T-602 es llevado a un proceso de calentamiento en el E-608. El condensado restante es introducido para su enfriamiento en los intercambiadores E-609 y E-609 A, obteniendo así un producto que se denomina Apiasol y que es almacenado en el contenedor K-610.¹²

2.1.3 Sistema de suministro de energía eléctrica. El plano eléctrico de la figura 9 representa el sistema de suministro de energía de la GDA, el cual se constituye de cuatro generadores conectados en paralelo a la barra del centro de control, con una capacidad de 1MW por generador, a una tensión de 4160V. Dos transformadores reductores TR601 y TR901 se encargan de bajar la tensión a 480V para alimentar las cargas de la planta de gas y refinería que tienen un consumo de 0.69MW y 0.43MW, respectivamente.

La energía restante es exportada hacia la barra del centro de distribución la cual es transformada de 4160V a 34500V a través del transformador elevador TR-30, el cual también puede actuar como reductor 34500V a 4160V en caso de una falla de suministro de energía de los generadores, quedando las plantas alimentadas por la red pública de la electrificadora del Meta.

¹² ECOPETROL S.A. Manual de operaciones Planta de Gas Apiay. Apiay, Villavicencio: La Compañía, 2014. 66 p.

Figura 9. Diagrama de suministro de energía eléctrica.



De acuerdo con el fabricante de los generadores, es imprescindible realizar una inspección rigurosa, previa al encendido de los mismos, de modo que se logre disminuir las futuras y posibles fallas debidas a condiciones que fácilmente se puedan detectar, como el estado de los conectores. Además, establecen un procedimiento estructurado para la puesta en marcha y retiro de los generadores, ya sea que se realice mediante accionamiento manual o automático.

2.1.3.1 Funcionamiento en paralelo. Para que el generador funcione en modo paralelo con el sistema en funcionamiento, la secuencia de fases del generador debe ser igual que la del sistema. Es necesario el uso de transformadores para reducir el voltaje a un nivel aceptable y luego utilizar un medidor de rotación de fases o un método de lámpara incandescente, para una verificar la secuencia de fases.¹³

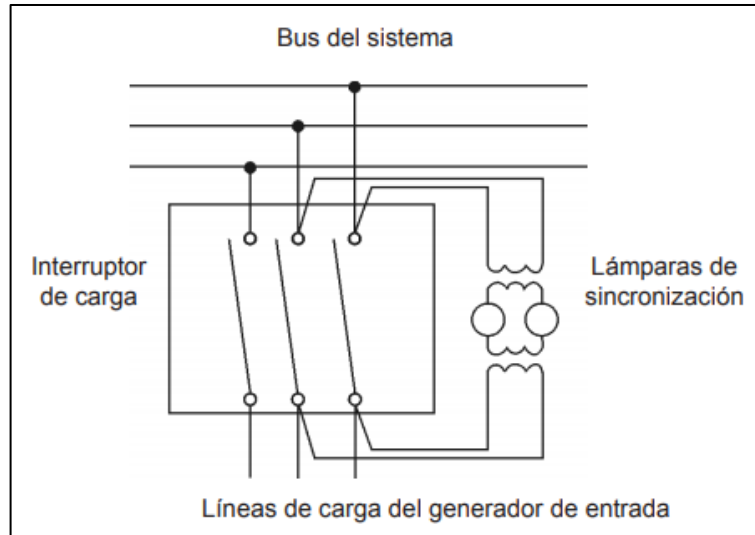
El voltaje de salida en el punto paralelo debe ser el mismo en cada momento, lo que requiere que los dos voltajes sean de la misma frecuencia, magnitud, rotación y que coincida uno con el otro; si los voltajes están en fases y exactamente a la misma frecuencia se indica mediante un sincronoscopio o lámparas de sincronía.

Se puede usar un sincronoscopio para indicar la diferencia en el ángulo de las fases entre la máquina de entrada y el sistema. Se pueden usar lámparas incandescentes conectadas como se muestra en la figura 10 para conectar en paralelo el generador. El voltaje nominal de las lámparas en serie debe ser igual al voltaje nominal del devanado de bajo voltaje del transformador.

Cada motor primario en el sistema debe tener las mismas características de regulación de velocidad, y los gobernadores se deben ajustar para dar la misma regulación de velocidad que se determina al aplicar carga que es proporcional a la carga total nominal del generador.

¹³ KATO ENGINEERING INC. Manual de Instrucciones, Generador estándar. [En línea]. Monkato, U.S.A.: La Compañía, 2013. 49 p. [Consultado el: 05 de mayo de 2018]. Disponible en: http://www.emersonindustrial.com/en-EN/documentcenter/electric-power-generation/KatoEngineering/InstructionManuals/Generators/350-01001-00_sp.pdf

Figura 10. Sincronización de generadores paralelos con lámparas de prueba.



KATO ENGINEERING INC. Manual de Instrucciones, Generador estándar. [En línea]. Monkato, U.S.A.: La Compañía, 2013. 49 p. [Consultado el: 05 de mayo de 2018]. Disponible en: http://www.emersonindustrial.com/en-EN/documentcenter/electric-power-generation/KatoEngineering/InstructionManuals/Generators/350-01001-00_sp.pdf

Para apagar el generador que funciona en paralelo, gradualmente se debe disminuir la carga de kW al usar el gobernador para reducir la velocidad. Cuando la carga de kW y la corriente de la línea se acerquen a 0, se abre el interruptor de circuito del generador. A continuación, se hace funcionar el generador sin carga durante varios minutos para disipar el calor en las bobinas.

2.2 DISPONIBILIDAD

Dentro del contexto de la gestión de mantenimiento, la disponibilidad asociada a un equipo está dada por la razón temporal de operación donde no ocurren incidentes causales de salidas de servicio del activo, es decir, el tiempo en que la máquina

opera de forma favorable, bajo condiciones normales de operación. Uno de los principales objetivos del mantenimiento es aprovechar en la mayor medida posible, la disponibilidad de cada activo que conforme una unidad de proceso.

En términos matemáticos puede entenderse la disponibilidad como la posibilidad de que un sistema, máquina o equipo opere de manera satisfactoria en un determinado periodo de tiempo.

La expectativa general es la de obtener la mayor disponibilidad de los activos, sin embargo, esto conlleva a una serie de medidas técnicas y operacionales que garanticen una reducción considerable del número de salidas de servicio de los activos, para tener una operación exitosa, económica y rentable.¹⁴

En sistemas que operan de manera continua, como las plantas de proceso de la GDA, esta disponibilidad se mide como el porcentaje de tiempo durante el cual se encuentran operativas y/o produciendo.

2.3 CONFIABILIDAD

La confiabilidad dentro del contexto del mantenimiento está asociada con el grado de certeza que se tiene sobre la funcionalidad de los activos, sin embargo, esto incluye además de las técnicas y herramientas de diagnóstico, todas aquellas herramientas metodológicas asociadas al mejoramiento continuo e integración metódica de nuevas tecnologías, que permiten una notable optimización de los procesos administrativos y los recursos financieros, pero en especial, en el fortalecimiento de las competencias humanas de los involucrados con las

¹⁴ BORRÁS, Carlos. Memorias de clase de Principios de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. 2014.

actividades de mantenimiento. Este proceso se fundamenta en los lineamientos corporativos tales como la misión, visión y sus objetivos.

Para garantizar un adecuado control sobre los procesos productivos de una empresa, es imprescindible asegurar la confiabilidad operacional de los activos desde cuatro perspectivas elementales: la confiabilidad del proceso a través del seguimiento de los estándares, la confiabilidad humana a través de las competencias y el entrenamiento, la confiabilidad de diseño asociada con los parámetros correctos de fabricación, y por último, la confiabilidad de equipos que se vale de estrategias de mantenimiento para aumentar disponibilidad de las plantas y sus equipos.¹⁵

La confiabilidad de los equipos es un eje fundamental de la confiabilidad operacional, de modo que se logren aumentar los resultados positivos sobre la mejora de los procesos, todo esto a través del uso de herramientas como el análisis de fallas, estudio de la capacidad de carga de los componentes, subsistemas, dispositivos y equipos en general; de esta manera se logra en gran medida el cumplimiento de la función de los equipos intervenidos, reduciendo fallas inesperadas y periodos improductivos.

¹⁵ BORRÁS, Carlos. Memorias de clase de Principios de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. 2014.

2.4 HERRAMIENTAS USADAS EN EL MEJORAMIENTO DE ACTIVOS

Dentro de las técnicas y medidas más usadas para la optimización de los activos y que inciden directamente sobre la confiabilidad de las máquinas, podemos encontrar:

- Análisis de criticidad (CA).
- Análisis de modos y efectos de falla (AMEF).
- Inspección basada en riesgos (RBI).
- Análisis de causa raíz (RCA).

2.4.1 Análisis de Criticidad (CA). Es una herramienta que organiza jerárquicamente los equipos, sistemas e instalaciones complejas, de acuerdo con el impacto sobre las razones misionales de una empresa, de modo tal que las decisiones tomadas sean las más acertadas. Este análisis parte de la definición concreta del alcance, así como del establecimiento del conjunto de criterios a evaluar y una metodología para realizar la evaluación de dichos criterios que permita dar como resultado la categorización de los activos.¹⁶

El fin último de ésta metodología es establecer un procedimiento que permita el correcto establecimiento del orden o jerarquía ya sea de procesos, sistemas, o equipos de una gran instalación productiva, permitiendo realizar una división sistemática y profunda que facilite el control y revisión de los activos, optimizando así los recursos financieros, administrativos y humanos con los que cuente el departamento respectivo y la compañía.

¹⁶ ALTMAN, Carolina. El Análisis de Causa Raíz, como herramienta en la mejora de la Confiabilidad. [En línea]. 12 p. [Consultado el: 16 de octubre de 2017]. Disponible en: <https://docs.google.com/file/d/0B7qSY6KPZGtVc0VXV2pXV2czTUU/edit>

Desde la perspectiva numérica, la criticidad puede expresarse como:

$$\text{Criticidad} = \text{Frecuencia} \times \text{Consecuencia}$$

La frecuencia está relacionada con la probabilidad que se presenten eventos o fallas del sistema o proceso evaluado, mientras que la consecuencia está relacionada con el efecto que pueda terminar en términos de costos de reparación, de seguridad y medio ambiente. Con relación a la consecuencia, ésta puede evaluarse desde la perspectiva del impacto sobre los siguientes aspectos:

- Seguridad e impacto sobre los humanos y el medio ambiente.
- Efectos sobre la producción.
- Costos generales de operación y mantenimiento.
- Tiempo promedio requerido para la programación, ejecución y cierre de tareas de mantenimiento.

2.4.2 Inspección Basada en Riesgo (RBI). Es una herramienta enfocada en la definición de la más deseable forma de evaluar la integridad de los equipos, estableciendo una serie de procedimientos para el cálculo acertado de los riesgos asociados. De este modo, los esfuerzos se orientan hacia los equipos con mayor riesgo, en procura de disminuir a términos aceptables dichos efectos.¹⁷

Esta herramienta establece el riesgo asociado a los activos como un producto numérico entre la probabilidad de falla de un componente, y el efecto de la falla; esto permite establecer unos lineamientos y propósitos conjuntos en la toma de decisiones acerca de dónde, qué, cómo y cuándo inspeccionar.

¹⁷ GASSÁN, Abraham. Herramientas de la Confiabilidad Operacional. [En línea]. 19 p. [Consultado el: 16 de octubre de 2017]. Disponible en: <http://cdimca.com/articulos/28152236405.pdf>

2.4.3 Análisis de Modos y Efectos de Falla (AMEF). Es una herramienta mejor conocida como FMEA por sus siglas en inglés de Failure Mode Analysis and Effects. Consiste en un método simple, versátil y de gran ayuda para la identificación de elementos y/o procedimientos que debieran ser eliminados o modificados. El objetivo del AMEF es el de establecer los ítems de un proceso que están en riesgo de contribuir en la ocurrencia de fallas.¹⁸

El AMEF es una herramienta organizada y concebida para:

- Determinar los modos en que un equipo o sistema puede fallar, en cumplimiento de los requerimientos del usuario.
- Valorar el nivel de riesgo de las causas de las fallas.
- Estimar la pertinencia del plan de control de fallas, con miras a prevenir futuras fallas.
- Priorizar las tareas o maniobras que limiten las ocurrencias de fallas en equipo y/o sistema.

¹⁸ INNOVANDO.NET. ¿Qué es un FMEA? [En línea]. [Consultado el: 17 de octubre de 2017]. Disponible en: <http://innovando.net/que-es-un-fmea/>

Figura 11. Diagrama de flujo del AMEF.



Fuente: BAEZ, David. Análisis de Modo Efecto de Falla. [En línea]. [Consultado el: 17 de octubre de 2017]. Disponible en: <https://gestionamantenimiento.blogspot.com.co/2015/08/analisis-modo-efecto-de-falla-amef.html>

2.4.4 Análisis Causa Raíz (RCA). Es un método de carácter cualitativo que de forma sistemática permite identificar las posibles y más probables causas responsables de una falla. Además, ayuda en la identificación y selección de la solución más acertada para corregir, controlar y hacer seguimiento a la causa de falla encontrada. Esta herramienta utiliza lo que se conoce como el árbol lógico de falla, a partir del seguimiento y verificación de los acontecimientos, para identificar el origen de una falla, favoreciendo el aprendizaje para mitigar las causas.¹⁹

¹⁹ BORRÁS, Carlos. Memorias de clase de Mantenimiento Preventivo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. 2015.

El RCA es una metodología científica, compleja lógica y sistemática para encontrar la causa raíz de una falla, de forma general, a partir del seguimiento y desarrollo de cinco pasos.

2.4.4.1 Paso 1: Responder a un Incidente y Conservar la Evidencia. Lo primero que se debe atender son los resultados del evento de falla. Como prioridad se tiene la atención al personal lesionado y el poner las instalaciones en una condición segura.²⁰

La obtención de evidencia es especialmente fundamental con las fallas esporádicas, puesto que el equipo tiene una sola oportunidad para obtenerlas. De otra parte, la recolección de las pruebas de fallas crónicas se puede realizar simultáneamente con la realización de las reparaciones, pero se debe organizar apropiadamente.

2.4.4.2 Paso 2: Organización del Equipo. Entre los miembros regulares de un equipo se pueden incluir operador, técnico, supervisor, ingeniero, inspector, diversos especialistas, proveedores, etc.

Como mínimo una persona del equipo debe ignorar los eventos de la falla, para establecer lineamientos constructivos y promover el pensamiento no encasillado. El equipo debe determinar su misión y lo que desean lograr.

²⁰ URUETA, José y VALENZUELA, Elkin. Modelo general de Análisis Causa Raíz de fallas y desgastes irregulares de llantas en la flota de transporte de mercancías coordinadora mercantil. [En línea]. Monografía de grado en Ingeniería Mecánica. Cartagena de Indias: Universidad Tecnológica de Bolívar, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2005. 156 p. [Consultado el: 10 de noviembre de 2017]. Disponible en: <http://biblioteca.unitecnologica.edu.co/notas/tesis/0032126.pdf>

2.4.4.3 Paso 3: Análisis de la Falla y Verificación de las Causas Raíz. Este paso se realiza mediante el árbol lógico de falla donde se describe el suceso y los modos de la falla, se hace una lista de las causas potenciales y se verifican los tres posibles niveles físicos, como primera medida el mecanismo de falla en el nivel de componentes, seguidamente la parte humana humana donde se verifica el punto de acción indebida o error humano y por última, la parte latente donde se verifica el defecto en el sistema de administración.

2.4.4.4 Paso 4: Comunicación de los Resultados y Oportunidades de Mejora. El reporte de los hallazgos y las oportunidades de mejora, debe contener contener como mínimo:

- La definición de la falla utilizada en el análisis.
- Una explicación completa de los modos y causas que se consideraron y como la evidencia respaldó o desaprobó los modos y las causas. También debe incluir información adicional sobre cada una de las causas raíz.
- Hallazgos de la investigación.
- Evidencias fotográficas, diagramas explicativos o dibujos demostrativos que permitan presentar claramente el componente o sistema sobre el que ocurrió la falla.
- Un diagrama del árbol de fallas completo de RCA.
- Una estrategia detallada para el establecimiento de las mejoras, allí debe quedar consignado el responsable de la tarea y el tiempo establecido para su realización.
- Recomendaciones o acciones para cada una de las causas raíz físicas, humanas y del sistema (y según sea necesario, de cualquier causa intermedia).

2.4.4.5 Paso 5: Implementación del Seguimiento. Al implementar las soluciones se debe tener en cuenta la siguiente secuencia: Identificar y delimitar el problema, evaluar el problema, identificar soluciones prácticas y reales, y por último, implementar dichas soluciones.

Las soluciones se deben implementar de manera que resulte efectivo el mejoramiento continuo. Esto implica pro-acción en lugar de reacción ante la próxima falla.

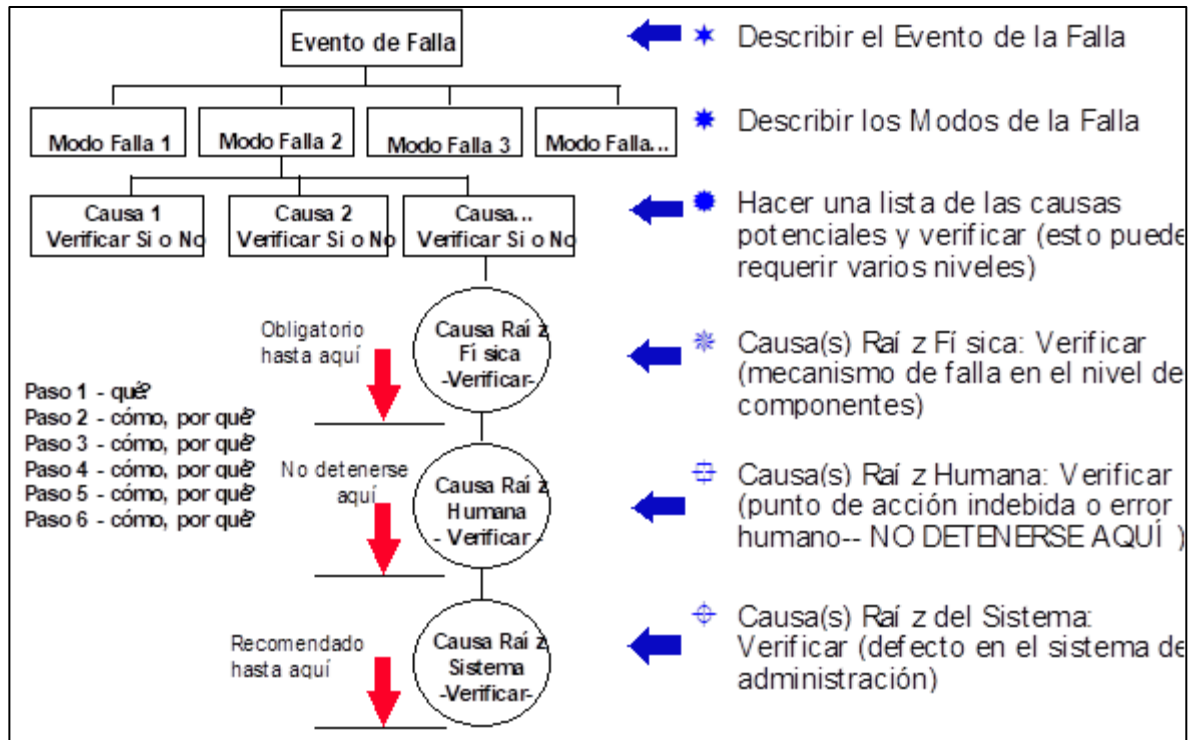
La finalidad del desarrollo de un Análisis de Causa Raíz (RCA) no corresponde únicamente con la eliminación o mitigación del riesgo que llevó a la ocurrencia del evento, sino que además, permita generar un ambiente donde se transmitan los conocimientos y aprendizajes adquiridos durante el ejercicio de análisis. Es indiscutible, que hay una alta probabilidad de que los mismos eventos estén ocurriendo en otras facilidades o unidades de la misma empresa o planta.²¹

2.5 ARBOL LÓGICO DE FALLA

El uso del árbol lógico de fallas es una de las herramientas de más amplio uso en el análisis de la confiabilidad. Consiste en una gráfica que consigna los pasos o niveles establecidos para encontrar una causa raíz. Dichos niveles pueden ser apreciados tal como se muestran en la figura 12.

²¹ URUETA, José y VALENZUELA, Elkin. Modelo general de Análisis Causa Raíz de fallas y desgastes irregulares de llantas en la flota de transporte de mercancías coordinadora mercantil. [En línea]. Monografía de grado en Ingeniería Mecánica. Cartagena de Indias: Universidad Tecnológica de Bolívar, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2005. 156 p. [Consultado el: 10 de noviembre de 2017]. Disponible en: <http://biblioteca.unitecnologica.edu.co/notas/tesis/0032126.pdf>

Figura 12. Estructura del Árbol Lógico de Fallas.

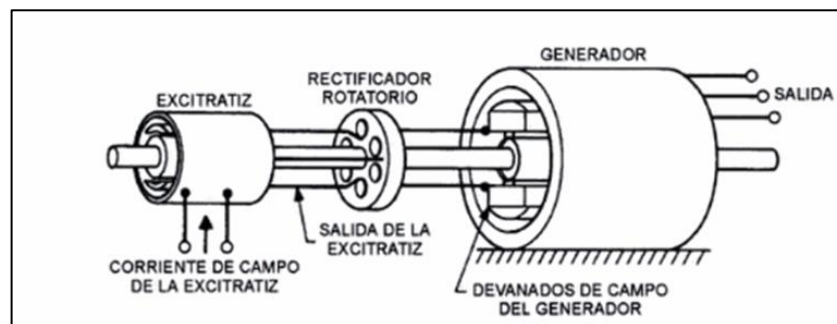


3. GENERADORES DE MEDIA TENSIÓN

En términos generales, un generador de corriente alterna consta de un arreglo de alambre conductor, el cual se encuentra acoplado de forma que gire libremente en un campo magnético, dicho arreglo se conoce como armadura o rotor, mientras que al campo magnético se le conoce como campo estator. El rotor es accionado un componente denominado como primotor, que usualmente es accionado por agua, turbinas de viento o vapor, motores de combustión interna, e incluso, motores de tipo nuclear.²²

El arreglo de alambre de la armadura se conecta a anillos rozantes, que a través de las escobillas se conectan por alambres conductores hacia el exterior del conjunto; en la medida que la armadura gira en el campo, se genera una diferencia de voltaje al cual se pueden conectar las diferentes cargas requeridas.²³

Figura 13. Esquema de un Generador Eléctrico.



Fuente: ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos. México D.F.: Editorial Limusa, 2004. 252 p. ISBN: 968-18-6053-5.

²² ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos. México D.F.: Editorial Limusa, 2004. 252 p. ISBN: 968-18-6053-5.

²³ Ibíd.

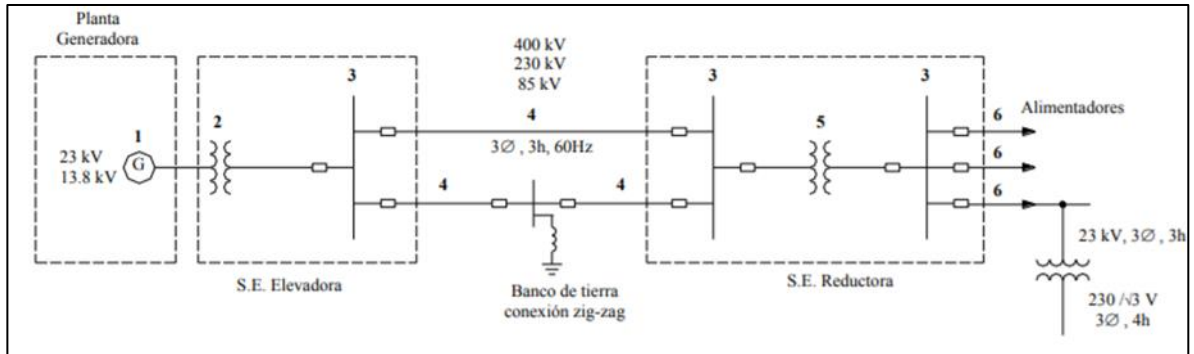
3.1 SISTEMA DE POTENCIA

El sistema eléctrico de potencia es el que se encarga de producir, transformar, transferir y entregar la energía eléctrica requerida en una planta de procesos industriales.²⁴ De forma general, el sistema eléctrico de potencia está constituido por los siguientes componentes:

- 1. Generador:** encargado de realizar la transformación de energía mecánica en energía eléctrica que se suministrará el sistema eléctrico general.
- 2. Transformador:** existen de dos tipos, uno de tipo elevador, cuya función es aumentar la tensión de generación a un nivel apropiado para líneas de transmisión; el otro es de tipo reductor, y su función es la de reducir la tensión a un nivel apropiado para el uso de los equipos que se encuentren conectados a dicha red.
- 3. Barra de interconexión:** su finalidad es la de empalmar los componentes del sistema de potencia.
- 4. Líneas de transmisión:** su función principal es la de transportar la energía eléctrica de las unidades generadoras a los sitios donde se requiera la energía, además sirven como puentes de conexión del sistema.
- 5. Alimentador:** su finalidad es la de transportar toda la energía eléctrica de la Subestación Reductora al consumidor final.

²⁴ ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. Elementos de protección de sistemas eléctricos, teoría y práctica. México D.F.: Editorial Limusa, 2008. 452 p. ISBN: 978-60-750-001-45.

Figura 14. Esquema general de un sistema eléctrico de potencia.



Fuente: ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. Elementos de protección de sistemas eléctricos, teoría y práctica. México D.F.: Editorial Limusa, 2008. 452 p. ISBN: 978-60-750-001-45.

3.2 SISTEMA DE PROTECCIONES

Dentro del diseño general de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), se deben tener dos aspectos muy importantes relacionados entre sí, por un lado, las fallas eléctricas que causan interrupciones en el flujo de energía, y por otro lado, los elementos utilizados para la protección de los equipos y demás componentes que integran el sistema eléctrico.²⁵

Las causas más comunes de daños e interrupciones del sistema eléctrico son:

- Cortocircuitos.
- Aumento y disminución constante de la tensión eléctrica.
- Variación repetitiva de la frecuencia.
- Pérdida de sincronismo de los generadores.

²⁵ ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. Elementos de protección de sistemas eléctricos, teoría y práctica. México D.F.: Editorial Limusa, 2008. 452 p. ISBN: 978-60-750-001-45.

Un sistema de protección está conformado principalmente por tres elementos, los cuales se describen a continuación:

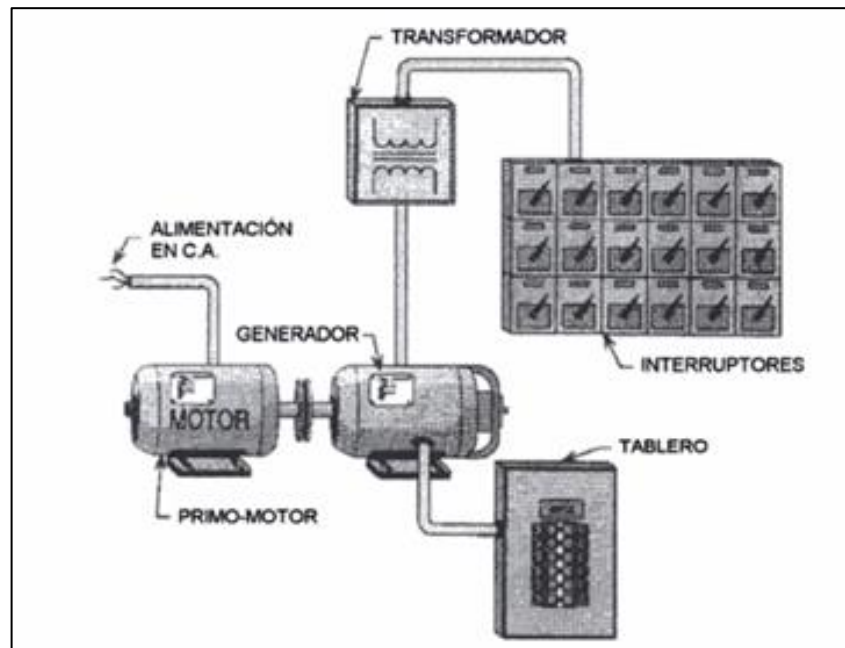
3.2.1 Transformadores de Instrumento.

- **Transformador de corriente (T.C.):** su función principal es la de aislar todo el sistema de la alta tensión, reduciendo además la magnitud de la corriente, en función de su respectiva relación de transformación (5 A ó 1A).
- **Transformador de potencial (T.P.):** su función principal es la de disminuir la magnitud de alta tensión, en función de su respectiva relación de transformación, normalmente, a una tensión inferior a $120/\sqrt{3}$ V.

3.2.2 Relevador. Es el encargado de identificar y reconocer una posible falla, para posteriormente enviar la señal de interrupción de flujo de energía. Se alimenta a partir de transformadores de corriente y potencial.

3.2.3 Interruptor de Potencia. Su función principal es la de suspender el flujo de corriente liberando los contactos principales, en el momento en que se recibe la señal del relevador.

Figura 15. Esquema de alimentación de carga a través de un transformador o un tablero.



Fuente: ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. Elementos de protección de sistemas eléctricos, teoría y práctica. México D.F.: Editorial Limusa, 2008. 452 p. ISBN: 978-60-750-001-45.

4. RECOLECCIÓN DE DATOS

4.1 PLAN DE MANTENIMIENTO ACTUAL

El objetivo de este plan de mantenimiento preventivo es garantizar la operación continua, reducir los tiempos de falla y aumentar la vida útil del generador.

El programa que se indica a continuación es la guía para el funcionamiento bajo condiciones estándar de operación. Bajo ciertas condiciones anormales y/o específicas de funcionamiento, pueden requerir reducir o aumentar los intervalos de mantenimiento.

4.1.1 Rutina No.1.

Frecuencia: Diaria

- Compruebe visualmente que los alojamientos de cojinetes del generador no muestren filtraciones de aceite.
- Compruebe las temperaturas de funcionamiento de los devanados del inductor del generador.
- Verifique que el voltímetro del panel de control tenga la estabilidad y la salida de voltaje adecuados.
- Monitorizar el factor de potencia y la carga del generador durante su funcionamiento.
- Con generadores que tienen cojinetes de fricción lubricados, compruebe los niveles de temperaturas de funcionamiento y del indicador visual (si aplica).

4.1.2 Rutina No.2.

Frecuencia: Semanal

- Inspeccione visualmente que el exterior de los cojinetes no tenga suciedad y limpie si es necesario.
- Inspeccione que los filtros de aire del generador no contengan acumulación de contaminantes y limpie o reemplace cuando sea necesario.

4.1.3 Rutina No.3.

Frecuencia: Cada 2.000 horas o 6 meses de operación

- Separe y retire la cubierta de la sección de salida del generador. Inspeccione visualmente que los cables de salida y el aislamiento del inductor no tengan grietas ni daños.
- Compruebe que todas las conexiones eléctricas expuestas estén bien apretadas.
- Compruebe que los transformadores, fusibles, capacitores y pararrayos no tengan sujeciones sueltas ni daños físicos.
- Compruebe que todos los cables conductores y conexiones eléctricas tengan la tolerancia y espaciado adecuados.
- Limpie el interior de la caja de salida, los filtros de aire, los alojamientos de cojinetes y los deflectores de aire con aire comprimido y disolvente eléctrico si es necesario.
- Con los generadores que tengan cojinetes de bola o de rodillo, compruebe las vibraciones de la máquina y la condición de los cojinetes con un analizador de espectro o medición de impulsos de choque.

- Vuelva a engrasar los cojinetes de tipo de reengrasado. Con generadores que tengan cojinetes de fricción lubricados, inspeccione que el aceite de los cojinetes tenga los niveles y claridad adecuados.

4.1.4 Rutina No.4.

Frecuencia: Cada 8.000 horas o 1 año de operación

- Compruebe la resistencia del aislamiento a la conexión a tierra en todos los devanados del generador, incluida la unidad principal de rotación, la unidad principal del inductor, las unidades del campo del excitador y armadura y la unidad opcional de PMG.
- Compruebe que los calefactores funcionen correctamente.
- Compruebe que la conexión del rectificador de rotación esté bien apretada.
- Con generadores que tengan cojinetes de fricción lubricados, cambie el aceite de los cojinetes.

4.1.5 Rutina No.5.

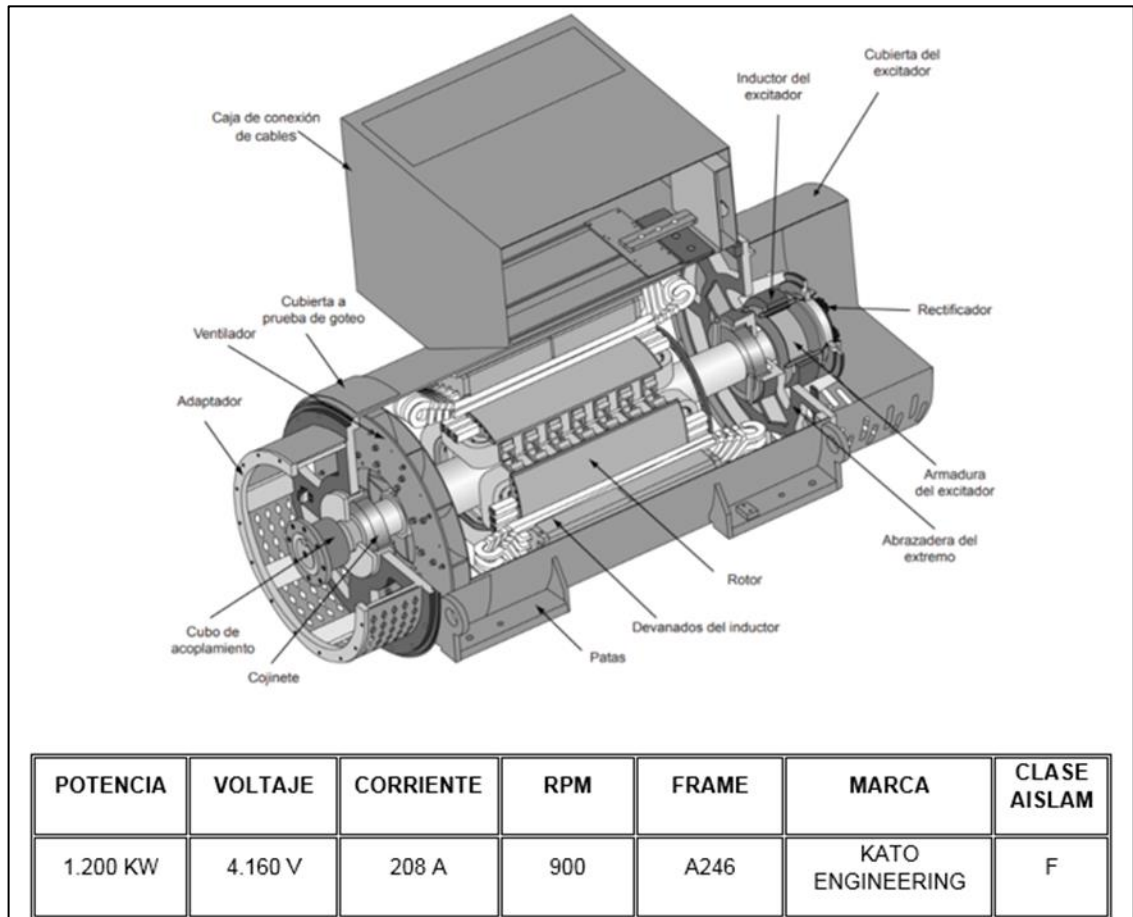
Frecuencia: Cada 20.000 horas o 3 año de operación

- Con generadores que tienen cojinetes de fricción lubricados, realice una inspección de los cojinetes de fricción que incluya extraer el alojamiento del cojinete superior y el forro del cojinete para inspeccionar que el forro, el muñón del eje y las superficies del sello no presenten desgaste ni estrías.
- Retire las abrazaderas del extremo e inspeccione visualmente que el devanado del extremo del generador no tenga contaminación de aceite ni de suciedad. La contaminación excesiva puede hacer necesario limpiar la superficie con aire comprimido y disolvente eléctrico.

- Inspeccione que el ventilador y el cubo del ventilador no tengan daños.

4.2 FICHA TÉCNICA GENERADOR ELÉCTRICO KATO

Figura 16. Generador eléctrico KATO.



Fuente: KATO ENGINEERING INC. Manual de Instrucciones, Generador estándar. [En línea]. Monkato, U.S.A.: La Compañía, 2013. 49 p. [Consultado el: 05 de mayo de 2018]. Disponible en: http://www.emersonindustrial.com/en-EN/documentcenter/electric-power-generation/KatoEngineering/InstructionManuals/Generators/350-01001-00_sp.pdf

5. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ

5.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

5.1.1 Reporte de falla. En la tabla 3 se detalla el reporte de falla del suministro de energía.

Tabla 3. Reporte de falla.

REPORTE DE FALLA	
DESCRIPCIÓN CORTA. QUE SUCEDIÓ?	Falla Suministro de Energía en las Plantas de la GDA
QUE / CUAL SISTEMA, PROCESO, OBJETO FUE AFECTADO?	Estación de Tratamiento Apiay, Planta de Gas y Refinería.
CUANDO SUCEDIÓ EL INCIDENTE?	13 de febrero de 2017 a las 11:24 horas.
DONDE SUCEDIÓ EL INCIDENTE?	Generadores Apiay.
COMO SUCEDIÓ EL INCIDENTE?	El 13 de febrero de 2017 a las 11:24 horas, se presenta black out en Plantas de proceso, Estación de tratamiento Apiay y Servicios Administrativos de la Gerencia Apiay, por apertura simultánea de los interruptores de 4.16 KV del TR-30, AXG901A, AXG901C y AXG901D. En el instante de la falla se estaba sincronizando el generador AXG901B. El evento tuvo una duración aproximada de 4 horas.
CONSECUENCIA REAL DE LO SUCEDIDO?	Nivel medio, pérdidas económicas
IMPACTO EN PERSONAS?	Ninguna lesión
IMPACTO AMBIENTAL?	Ningún impacto ambiental
IMPACTO ECONÓMICO?	Importante \$10k a \$100k
IMPACTO IMAGEN?	Impacto imagen local
IMPACTO CLIENTES?	Ningún impacto clientes

5.1.2 Valoración de consecuencias económicas. El evento generó afectación económica a la Empresa, por las pérdidas de producción de crudo y gas de las plantas. En las tablas 5 y 6, se detallan dichas pérdidas económicas.

Tabla 4. Pérdidas económicas en Refinería.

Pérdidas Refinería (4 horas)		
Carga Actual	1.600	BPD
Producción Nafta	9	BLS
Producción Fuel Oil N° 4	68	BLS
Producción Gasóleo	30	BLS
Producción Asfalto	160	BLS
Producción Total	267	BLS
Costo Promedio BEQ	55	\$US/BL
Total Refinería	14.685	\$US

Tabla 5. Pérdidas económicas en Planta de Gas.

Pérdidas Planta de Gas (4 horas)		
Producción Gas Seco	1.678	KPC
	294	BEQ
Producción GLP	106	BLS
Producción Apiasol	36	BLS
Producción Condensado	56	BLS
TOTAL BEQ	492	BEQ
Costo Promedio BEQ	55	\$US
Total Planta de Gas	27.060	\$US

En resumen, las pérdidas económicas totales ocasionadas por la falla de suministro de energía en las Plantas, fueron por la suma de 41.745 USD. Este valor a una TRM de \$2.900, equivale a \$121.060.500 (Ciento Veintiún Millones Sesenta Mil Quinientos Pesos m/cte.).

5.1.3 Valoración de la Falla. En la tabla 6 se muestra la valoración de la falla de acuerdo a la Matriz RAM corporativa. No hubo afectación a personas, ambiente, clientes e imagen de la empresa, el impacto importante fue netamente económico por lo que la valoración del riesgo es M.

Tabla 6. Matriz de valoración RAM.

CONSECUENCIAS					PROBABILIDAD					
					A	B	C	D	E	
Personas	Económica	Ambiental	Cientes	Imagen de la Empresa	No ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Industria	Ha ocurrido en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Empresa	Sucede varias veces al año en la Gerencia	
Una o mas fatalidades	Catastrófica >\$10M	Contaminación Irreparable	Veto como proveedor	Internacional	5	M	M	H	H	VH
Incapacidad permanente	Grave \$1M a \$10M	Contaminación Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Nacional	4	L	M	M	H	H
Incapacidad temporal (>1 día)	Severo \$100k a \$1M	Contaminación Localizada	Pérdida de clientes y/o de abastecimiento	Regional	3	N	L	M	M	H
Lesión menor (sin incapacidad)	Importante \$10k a \$100k	Efecto Menor	Quejas y/o reclamos	Local	2	N	N	L	L	M
Lesión leve (primeros auxilios)	Marginal <\$10k	Efecto Leve	Incumplir especificaciones	Interna	1	N	N	N	L	L
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún efecto	Ningún impacto	Ningún impacto	0	N	N	N	N	N

En la tabla 7 se presentan los resultados de la valoración RAM del evento, cuyo resultado es M, debido a la afectación económica importante la cual se encuentra en el rango de los 10.000 a los 100.000 dólares.

Tabla 7. Resultados de la valoración RAM.

RESULTADOS	
	VALORACIÓN
PERSONAS	P0E: N
ECONÓMICA	E2E: M
AMBIENTAL	A0E: N
CLIENTES	C0E: N
IMAGEN DE LA EMPRESA	I0E: N
NIVEL DEL EVENTO	M

5.1.4 Recolección de evidencias. Para la recolección de evidencias se aplica la metodología 4P como se muestra a continuación.

5.1.4.1 Personas. Como parte de la investigación, se toman las versiones libres de algunos testigos, tanto presenciales como no presenciales del evento de falla.

- **Supervisor de Plantas:**

El día de la falla aproximadamente a las 11:20 a.m., me encontraba en el cuarto del operador (tablero de control) realizando el cargue de sobretiempos de los técnicos operativos en la herramienta corporativa, cuando se fue el fluido eléctrico. Inmediatamente procedo a llamar al CIO (Centro Integrado de Operaciones) para averiguar por la falla y el operador del sistema eléctrico me informa que se salió de línea el TR-30 que alimenta las plantas y que están en la búsqueda del origen de la falla. Posteriormente me comunico con el Supervisor de Mantenimiento, quien se encontraba en sitio, para solicitar la atención inmediata al evento.

Tiempo después me informa el operador del CIO que la falla fue en el AXG901B que estaba en proceso de sincronización automática y que estaban en proceso de restablecimiento de la energía.

Hacia las 3 p.m. personal de Mantenimiento me comunica que ya se cuenta con energía en las plantas y procedo a ejecutar el procedimiento de arranque de las mismas, monitoreando continuamente las variables críticas del proceso.

- **Técnico Operativo:**

Salí a las 11 a.m. a realizar la ronda operativa por los equipos de la Planta de gas, unos 20 minutos después sentí que se apagaron los generadores (por ausencia de su ruido en condición normal). Me dirigí al centro de generación eléctrica y vi salir humo de uno de los generadores. Inmediatamente procedo a reportar la novedad al Supervisor de Plantas, mientras el personal de Mantenimiento se encontraba en el AXG901B verificando la falla.

Hacia las 3 p.m. con instrucciones del Supervisor, procedo a realizar las maniobras requeridas en campo para el re arranque de las plantas.

- **Supervisor de Mantenimiento:**

En el momento de la falla (11:30 aproximadamente), durante el proceso de sincronismo automático, se genera la apertura del TR-30 y la salida del AXG901B por subtensión, este equipo venía de un mantenimiento preventivo programado realizado en los cilindros motrices por recomendaciones de CBM.

El AXG901B se había tratado de poner en servicio el día anterior pero se tuvieron algunos inconvenientes con el ajuste del interruptor y presentó alta potencia activa y alta vibración, por esta razón se decidió realizar un cambio en el pick up de las

rpm, para posteriormente volver a intentar su puesta en servicio. Una vez verificada la falla en el log de eventos del sistema, se procede a realizar las maniobras requeridas para volver a poner en servicio el TR-30 y energizar las Plantas de Proceso.

Hacia las 3 p.m. se energiza el TR-30 y se restablece el servicio de energía en las plantas de proceso.

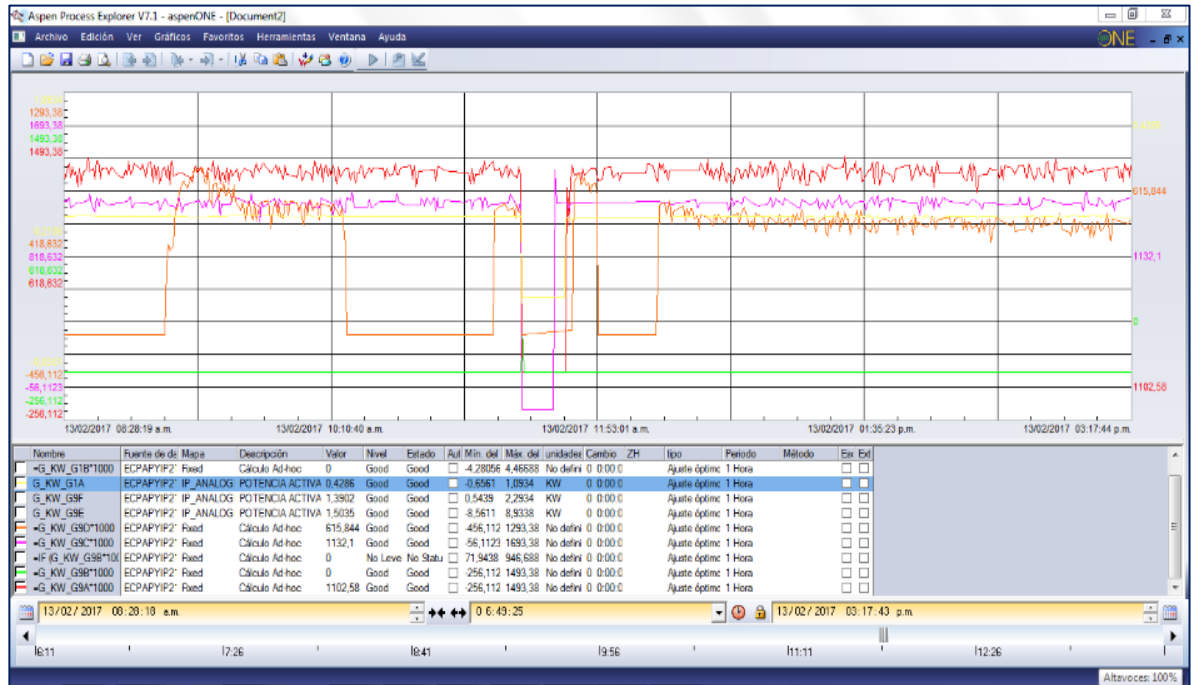
Después se procede a inspeccionar físicamente el generador, identificando 3 diodos de la excitatriz quemados, 1 varistor de excitatriz quemado, rotor de excitatriz operativo, estator de excitatriz operativo y estator de generador operativo.

5.1.4.2 Papel. Para las evidencias de papel, se toma en cuenta la documentación en cualquier medio que brinde aclaración o soporte al análisis.

Para el desarrollo de este RCA, se toman los datos históricos con las tendencias de las variables críticas, con apoyo del software de monitoreo InfoPlus21, el cual almacena en su base de datos el comportamiento de todas las variables de los procesos críticos de la GDA. De la misma manera se toma la información del log de eventos del SCADA Eléctrico (Power CC).

En la figura 17 se observa el histórico de cargas en amperios de los generadores previo, durante y posterior a la falla.

Figura 17. Histórico de Potencia de los Generadores AXG901A/C/D.



En las figuras 18 y 19 se muestra el comportamiento oscilatorio de la potencia activa, por tal razón el generador AXG901B tuvo que ser sacado de línea para realizar cambio de pickup.

Figura 18. Histórico del Generador AXG901B del 5 al 13 de febrero.

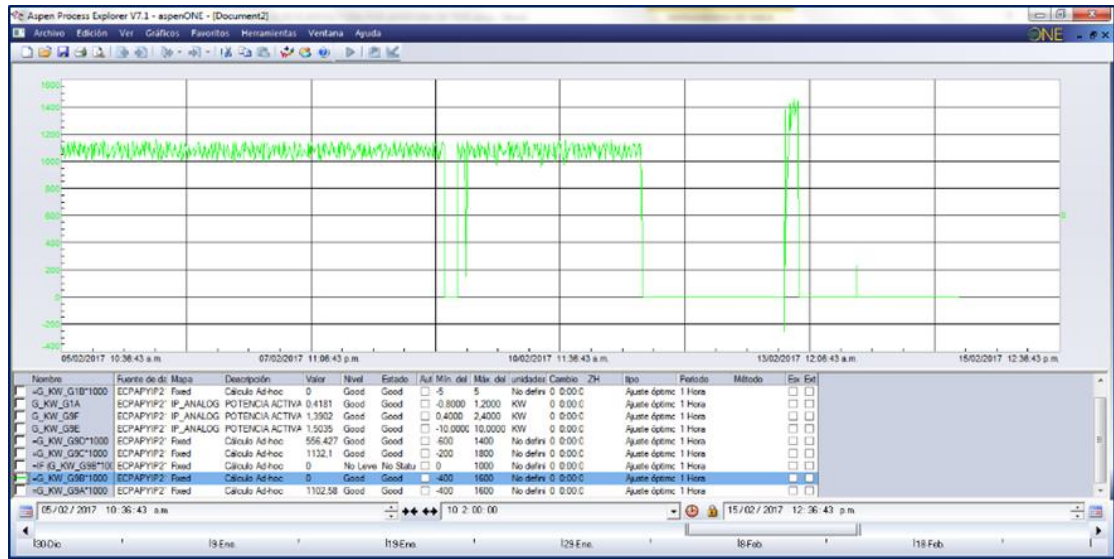
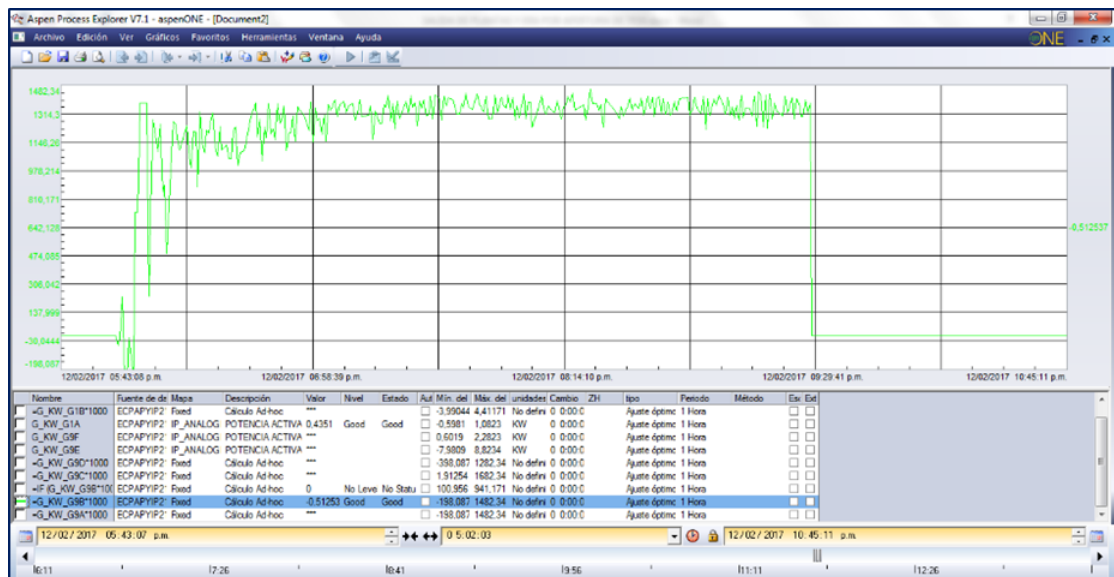


Figura 19. Histórico del Generador AXG901B del 12 de febrero.

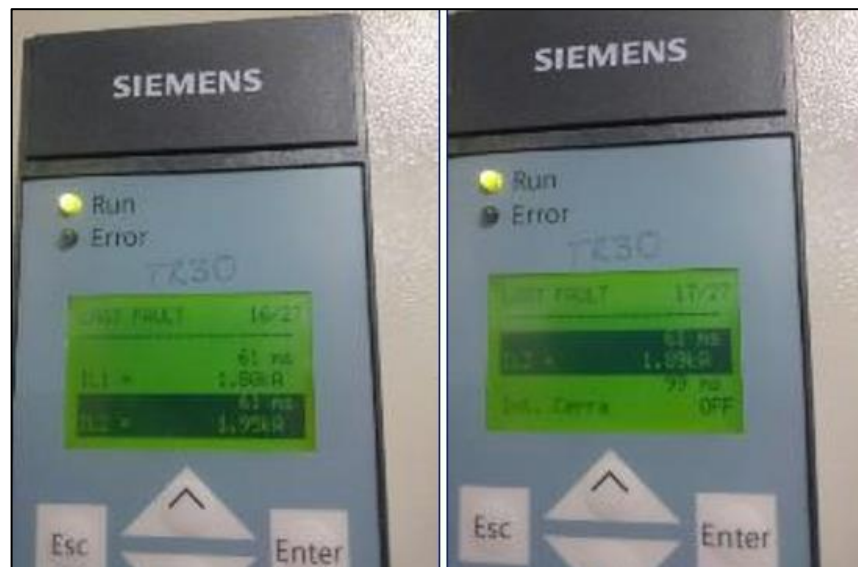


En las figuras 19 y 20 se muestra el registro del disparo del relé del transformador TR30 por sobrecorriente (1.890 A) en la Fase C, a las 11:24 am el 13/02/2017.

Tabla 8. Log eventos AKG901B en Power CC.

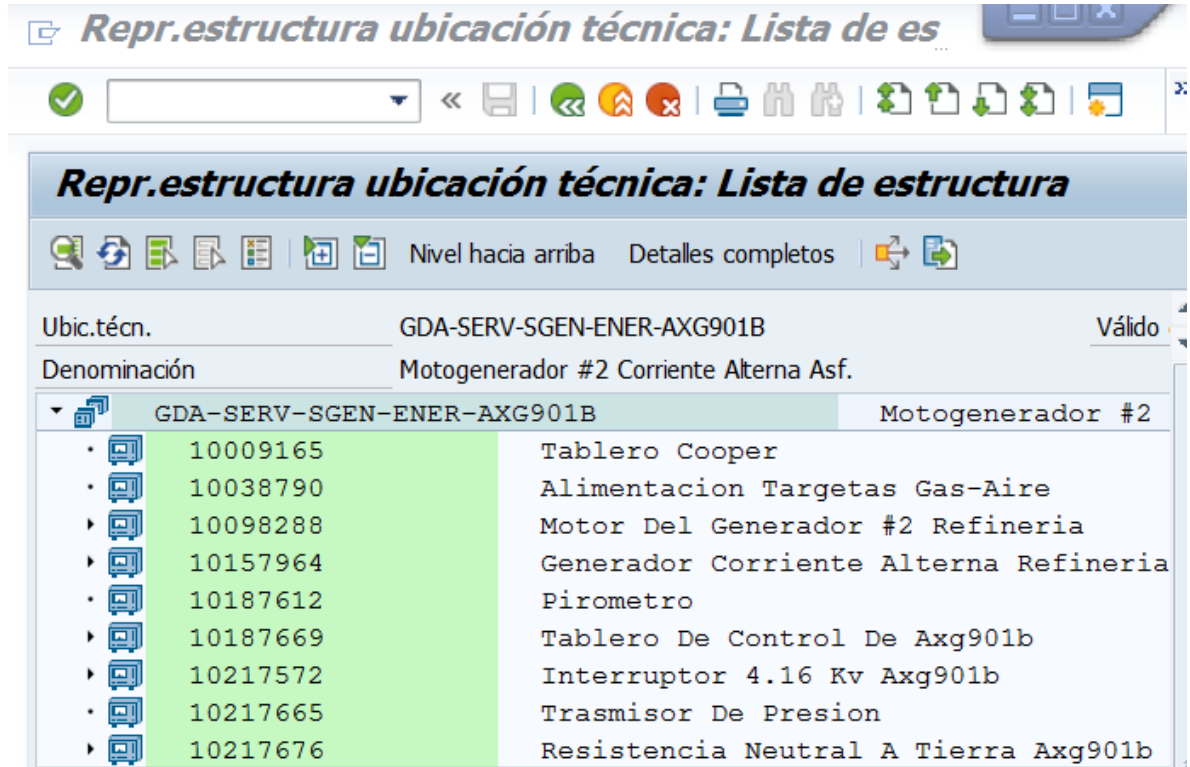
05096	32R picked up	ON	13.02.2017 11:23:47.236	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
	DISPARO BAJO VOLTAJE	ON	13.02.2017 11:23:47.340	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
05546	50/27 Release of the current stage	OFF	13.02.2017 11:23:48.215	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
	DISPARO BAJO VOLTAJE	OFF	13.02.2017 11:23:49.138	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
	ON/OFF (SP)	OFF	13.02.2017 11:23:50.432		Spontaneous
05238	81-3 TRIP	ON	13.02.2017 11:23:58.720	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
05238	81-3 TRIP	OFF	13.02.2017 11:23:59.822	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
	DISPARO BAJO VOLTAJE	ON	13.02.2017 11:24:00.538	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
05546	50/27 Release of the current stage	ON	13.02.2017 11:24:05.575	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
05002	Suitable measured quantities present	OFF	13.02.2017 11:24:08.032	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
05333	40 is ACTIVE	OFF	13.02.2017 11:24:08.113	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
05093	32R is ACTIVE	OFF	13.02.2017 11:24:08.113	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
05153	46 is ACTIVE	OFF	13.02.2017 11:24:08.113	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
	ON/OFF (SP)	ON	13.02.2017 11:24:08.975		Spontaneous
	INTERRUPTOR CERRADO	OFF	13.02.2017 11:24:23.134		Spontaneous
	INTERRUPTOR ABIERTO	ON	13.02.2017 11:24:23.145		Spontaneous
	DISPARO BAJO VOLTAJE	OFF	13.02.2017 11:24:23.337	Com.Issued=Aut...	Spontaneous
	Reset LED	ON	13.02.2017 11:28:34.655	Command Issue...	Spontaneous
	ON/OFF (SP)	OFF	13.02.2017 11:32:48.467		Spontaneous
	INTERRUPTOR ABIERTO	OFF	13.02.2017 11:49:30.473		Spontaneous
	Reset LED	ON	13.02.2017 12:07:35.278	Command Issue...	Spontaneous
	INTERRUPTOR ABIERTO	ON	13.02.2017 20:40:48.843		Spontaneous
	Reset LED	ON	13.02.2017 21:08:28.047	Command Issue...	Spontaneous
	Reset LED	ON	13.02.2017 21:27:42.759	Command Issue...	Spontaneous
	Reset LED	ON	13.02.2017 21:30:51.860	Command Issue...	Spontaneous

Figura 20. Corrientes de falla registradas en el TR – 30 por 4.160 V.



En la figura 21 se observa la jerarquización de los equipos que componen el sistema eléctrico del generador AXG901B.

Figura 21. Árbol de equipos GDA en SAP.



Fuente: ECOPETROL S.A. Árbol de equipos GDA. Sistema de información SAP Ecopetrol.

El plan de mantenimiento preventivo al sistema eléctrico del equipo AXG901B se realiza semestralmente como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9. Plan de Mantenimiento AXG901B.

Plan mant. prev.	Texto Posición Mantenimiento	Equipo	Denominación	Criticidad ASP	Clase de orden	Cl. actividad PM	Prioridad	Última orden
1012033	Cbm_E:Pruebas Motor AE901B	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	S	Z1PM	P04	3	10197312
1012094	Cbm_E:Medicion Spt Gen Ref AG901B	10157964	Generador Corriente Alterna	S	Z1PM	P04	3	10302727
1024161	Mtto Semestral Sistema Emei AP901B	10157918	Bomba Prelubricacion Ax901b	S	Z1PM	P01	3	10227623
1024162	Mtto 6 Meses Generadores AG901B	10157964	Generador Corriente Alterna	S	Z1PM	P01	3	10281535
1024246	Mtto Semestral Sistema Emei AE901B	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	S	Z1PM	P01	3	10308136
1025121	Lubricación Rodamientos Gen. 400H AG901	10157964	Generador Corriente Alterna	S	Z1PM	P01	3	10311533
1028964	Cbm_E:Pruebas Motor AXG901B			S	Z1PM	P01	3	10197586

Las operaciones del área eléctrica asociadas a la hoja de ruta del equipo AXG901B cargadas en el sistema de información, no especifica mantenimiento alguno a la celda de media tensión donde se encuentra el interruptor de potencia, (ver tabla 10).

Tabla 10. Operaciones de Hoja de Ruta para el AXG901B.

Operación	Puesto de trabajo	Descripción de la operación	Trabajo	Unidad	N° Personas	
10	Eléctrica	Revisar generador eléctrico	7,2	Horas	2	
20	Eléctrica	Revisar tableros de control	3	Horas	2	
30	Eléctrica	Revisar equipos auxiliares	2	Horas	2	
40	Eléctrica	Probar el equipo en vacío y con carga	3,2	Horas	2	
50	Eléctrica	Entregar equipo a operaciones	0,6	Horas	2	

Fuente: ECOPEPETROL S.A. Árbol de equipos GDA. Sistema de información SAP.

En la tabla 11 se detalla el histórico de las órdenes de Mantenimiento ejecutadas en los últimos 6 meses a los equipos asociados al Generador AXG901B.

Tabla 11. Histórico de Órdenes de Mantenimiento.

Orden	Equipo	Denominación Equipo	Criticidad ASP	Texto breve	Clase de orden	Cl. actividad PM	Pto. tboj responsable	Inlco program.	Fin program.	Fecha fin real	Costos reales
10008019	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Mtto Semestral Sistema Emel A E901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	28/09/2016	28/09/2016	04/10/2016	5 193.939
10032479	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Mtto Bimestral Ventilador A E901B	Z1PM	PO1	DMCEEGDA	24/08/2016	24/08/2016	26/08/2016	5 9.962
10034704	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A E901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	01/09/2016	01/09/2016	30/08/2016	5 179.940
10037134	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Cbm. E.Pruebas Motor A E901B	Z1PM	PO4	IELEEGDA	07/09/2016	07/09/2016	08/09/2016	5 517.412
10044394	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A E901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	29/09/2016	29/09/2016	27/09/2016	5 270.358
10053382	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Mtto Bimestral Ventilador A E901B	Z1PM	PO1	DMCEEGDA	18/10/2016	18/10/2016	18/10/2016	5 193.112
10055172	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A E901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	26/10/2016	26/10/2016	25/10/2016	5 347.476
10067220	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A E901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	24/11/2016	24/11/2016	21/11/2016	5 347.476
10073292	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Mtto Bimestral Ventilador A E901B	Z1PM	PO1	DMCEEGDA	13/12/2016	13/12/2016	13/12/2016	5 251.859
10077246	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A E901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	21/12/2016	21/12/2016	20/12/2016	5 352.603
10089451	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A E901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	20/01/2017	20/01/2017	19/01/2017	5 248.996
10098056	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	Mtto Bimestral Ventilador A E901B	Z1PM	PO1	DMCEEGDA	07/02/2017	07/02/2017	08/02/2017	5 2.571
20002884	10217590	Enfriador De Agua Motor Ax901b	5	ALINEACIÓN Y TENSIÓN CORREAS A E901B	Z2PM	PO1	DMCEEGDA	04/10/2016	04/10/2016	21/05/2016	5 3.121.540
20032745	10038891	Sistema De Protecciones Gpu	5	REV PARAMET ARRANQ- FUNCN CPU95 901B	Z2PM	CO3	DINSEGDA	18/10/2016	18/10/2016	16/10/2016	5 380.748
20032971	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Lubricación Rodamientos Gen. 400HA G901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	25/08/2016	25/08/2016	23/08/2016	5 66.730
10037260	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A G901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	08/09/2016	08/09/2016	06/09/2016	5 287.864
10040044	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Lubricación Rodamientos Gen. 400HA G901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	15/09/2016	15/09/2016	06/09/2016	5 128.529
10046957	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A G901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	04/10/2016	04/10/2016	05/10/2016	5 270.358
10047469	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Lubricación Rodamientos Gen. 400HA G901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	03/10/2016	03/10/2016	07/10/2016	5 96.971
10053112	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Lubricación Rodamientos Gen. 400HA G901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	20/10/2016	20/10/2016	18/10/2016	5 96.971
10060130	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A G901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	25/10/2016	25/10/2016	25/10/2016	5 347.476
10060906	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Lubricación Rodamientos Gen. 400HA G901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	08/11/2016	08/11/2016	31/10/2016	5 107.721
10065280	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Lubricación Rodamientos Gen. 400HA G901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	23/11/2016	23/11/2016	19/11/2016	5 107.721
10070016	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A G901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	24/11/2016	24/11/2016	21/11/2016	5 347.476
10073066	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Lubricación Rodamientos Gen. 400HA G901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	16/12/2016	16/12/2016	10/12/2016	5 109.171
10074734	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A G901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	23/12/2016	23/12/2016	20/12/2016	5 352.603
10080736	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Lubricación Rodamientos Gen. 400HA G901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	30/12/2016	30/12/2016	06/01/2017	5 3.001
10089850	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Lubricación Rodamientos Gen. 400HA G901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	19/01/2017	19/01/2017	19/01/2017	5 76.493
10092550	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Cbm-M Fft Monitor VVbr Eq-Rot A G901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	24/01/2017	24/01/2017	23/01/2017	5 248.898
10092896	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Mtto 6 Meses Generadores AG901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	25/01/2017	25/01/2017	26/01/2017	5 82.155
10097822	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Lubricación Rodamientos Gen. 400HA G901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	06/02/2017	06/02/2017	10/02/2017	5 11.039
20026352	10157964	Generador Corriente Alterna	5	REVISAR ACOPLE MOTO GENERADOR AX901B	Z2PM	PO1	DMCEEGDA	04/10/2016	04/10/2016	04/10/2016	5 772.449
20034434	10157964	Generador Corriente Alterna	5	Cambiar Elem Acople Generador AX901B	Z2PM	PO1	DMCEEGDA	15/12/2016	16/12/2016	16/12/2016	5 8.059.494
20027374	10068430	Temocupla J	5	REEMP TERMOCUPLA CIL 2L AX901B	Z2PM	CO3	DINSEGDA	22/09/2016	22/09/2016	14/09/2016	5 323.076
20036012	10217605	Trasmisor De Velocidad	5	CORREGIR FALLA CARGA AXG 901B	Z2PM	CO1	RINSEGDA	13/02/2017	13/02/2017	13/02/2017	5 1.096.732
20031271	10038790	Alimentación Targetas Gas-Aire	5	CORREG FALLA SISTEMA AJUSTE MEZCLA	Z2PM	CO1	DINSEGDA	10/10/2016	10/10/2016	05/10/2016	5 1.142.244
20039466	10038791	Gobernador	5	CORREG FALLA SISTEMA ARRANQ X901B	Z2PM	CO1	DINSEGDA	08/11/2016	08/11/2016	31/10/2016	5 170.474
20048758	10157974	Motor Superior 12gtl	N	CBM/CORREGIR PRESION POSIT CARTER AX901B	Z2PM	PO1	DMCEEGDA	02/01/2017	03/01/2017	03/01/2017	5 19.991.439
20064287	10157974	Motor Superior 12gtl	N	Arancar motor AX901B despues de falla	Z2PM	CO1	DMCEEGDA	17/02/2017	17/02/2017	13/02/2017	5 10.285
10008941	10157918	Bomba Prelubricación Ax901b	5	Mtto Semestral Sistema Emel A P901B	Z1PM	PO1	DELEEGDA	08/11/2016	08/11/2016	25/10/2016	5 193.939
10032674	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	17/08/2016	17/08/2016	19/08/2016	5 5.975
10034810	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Muestreo Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	26/08/2016	26/08/2016	25/08/2016	5 6.178
10037301	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Windrock Motogeneradores AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	02/09/2016	02/09/2016	30/08/2016	5 1.850.552
10037302	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	01/09/2016	01/09/2016	01/09/2016	5 123.369
10039548	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Muestreo Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	08/09/2016	08/09/2016	09/09/2016	5 82.247
10041874	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	16/09/2016	16/09/2016	16/09/2016	5 123.369
10044439	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Muestreo Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	20/09/2016	20/09/2016	23/09/2016	5 82.247
10047014	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Windrock Motogeneradores AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	03/10/2016	03/10/2016	05/10/2016	5 1.738.011
10050078	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Muestreo Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	06/10/2016	06/10/2016	07/10/2016	5 77.246
10050079	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	28/09/2016	28/09/2016	30/09/2016	5 115.866
10051724	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Serv Hrs Mot Superior 12GR AX901B	Z1PM	PO1	DMCEEGDA	26/10/2016	26/10/2016	29/10/2016	5 2.714.115
10055264	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Muestreo Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	19/10/2016	19/10/2016	21/10/2016	5 77.246
10055265	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	12/10/2016	12/10/2016	13/10/2016	5 115.866
10057927	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Windrock Motogeneradores AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	31/10/2016	31/10/2016	01/11/2016	5 2.233.771
10060174	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	26/10/2016	26/10/2016	27/10/2016	5 148.917
10062472	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Muestreo Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	02/11/2016	02/11/2016	04/11/2016	5 99.279
10064662	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	10/11/2016	10/11/2016	11/11/2016	5 148.917
10067264	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Muestreo Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	15/11/2016	15/11/2016	18/11/2016	5 99.279
10070094	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	25/11/2016	25/11/2016	26/11/2016	5 148.917
10072631	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Serv Hrs Mot Superior 12GR AX901B	Z1PM	PO1	DMCEEGDA	16/12/2016	16/12/2016	15/12/2016	5 2.648.276
10072709	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Muestreo Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	16/12/2016	16/12/2016	02/12/2016	5 100.744
10074796	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Windrock Motogeneradores AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	05/12/2016	05/12/2016	10/12/2016	5 2.266.732
10074797	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	05/12/2016	05/12/2016	10/12/2016	5 151.115
10077282	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Muestreo Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	29/12/2016	29/12/2016	16/12/2016	5 100.744
10080269	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	30/12/2016	30/12/2016	06/01/2017	5 1.801
10085642	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Windrock Motogeneradores AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	13/01/2017	13/01/2017	13/01/2017	5 1.200
10087906	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Windrock Motogeneradores AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	16/01/2017	16/01/2017	17/01/2017	5 27.009
10089485	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	19/01/2017	19/01/2017	20/01/2017	5 1.801
10092537	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Serv 1K Hrs Mot Superior 12GR AX901B	Z1PM	PO1	DMCEEGDA	06/02/2017	06/02/2017	09/02/2017	5 1.028
10092579	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Muestreo Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	26/01/2017	26/01/2017	27/01/2017	5 1.846
10097500	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Analisis Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	03/02/2017	03/02/2017	03/02/2017	5 1.543
10100300	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	Cbm-M Muestreo Aceite Lubricante AX901B	Z1PM	PO1	IMECEGDA	10/02/2017	10/02/2017	10/02/2017	5 1.028
20020096	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	CORREGIR FUGA ACEITE TAPAS LATERA AX901B	Z2PM	CO1	DELEEGDA	30/08/2016	30/08/2016	31/08/2016	5 2.160.695
20023882	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	CAMBIO GASKET CULATA5 1L/3R AX901B	Z2PM	CO1	RMECAGDA	23/09/2016	23/09/2016	22/09/2016	5 1.867.019
20027689	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	CAMBIA DE EMPAQ TAPAS VALV CULAT AX901B	Z2PM	PO1	DMCEEGDA	26/09/2016	26/09/2016	22/09/2016	5 1.233.701
20030653	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	REVISION CULATA 6L FILTROS AIR AX901B	Z2PM	PO1	DMCEEGDA	07/10/2016	07/10/2016	06/10/2016	5 4.397.041
20033067	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	CBM-M REVISAR LEVAS Y CALIBRA VV AX901	Z2PM	PO1	DMCEEGDA	26/10/2016	31/10/2016	30/10/2016	5 15.180.727
20038305	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	REPARAR 1 CULATA CIL MOTOR AX901B	Z2PM	CO1	DMCEEGDA	04/11/2016	04/11/2016		5 1.291.242
20035621	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	REPARAR ACTUADOR WOODWARD X901B	Z2PM	CO1	DMCEEGDA	23/05/2017	23/05/2017		5 9.753.165
20053753	10098288	Motor Del Generador#2 Refineria	5	CBM-M INSPECCIONAR PASO DE GAS CONTINUO	Z2PM	PO1	DMCEEGDA	06/02/2017	07/02/2017	09/02/2017	5 3.5

5.1.4.3 **Partes.** Se realiza una revisión detallada de elementos físicos tales como piezas, equipos, herramientas, objetos, etc.

El registro de evidencias se empieza por la excitatriz del generador, ya que en este componente al momento de la falla se identificó humo debido a tres diodos y un varistor quemados, el rotor y estator no sufrieron daños (ver Figuras 23 y 24).

Figura 22. Diodos quemados (2 positivos, 1 negativo).



Figura 23. Varistor de platos de diodos quemados.



Al encontrar en buenas condiciones el rotor y el estator del generador, se realizan pruebas de resistencia de aislamiento a los conductores que conectan el generador con el interruptor, los cuales se encuentran en buen estado, posteriormente se realiza inspección a la celda de media tensión del interruptor, se encuentran contactos con rastro de alta temperatura (ver figuras 25 y 26).

Figura 24. Contacto hembra interruptor AXG901B con rastro de alta temperatura.

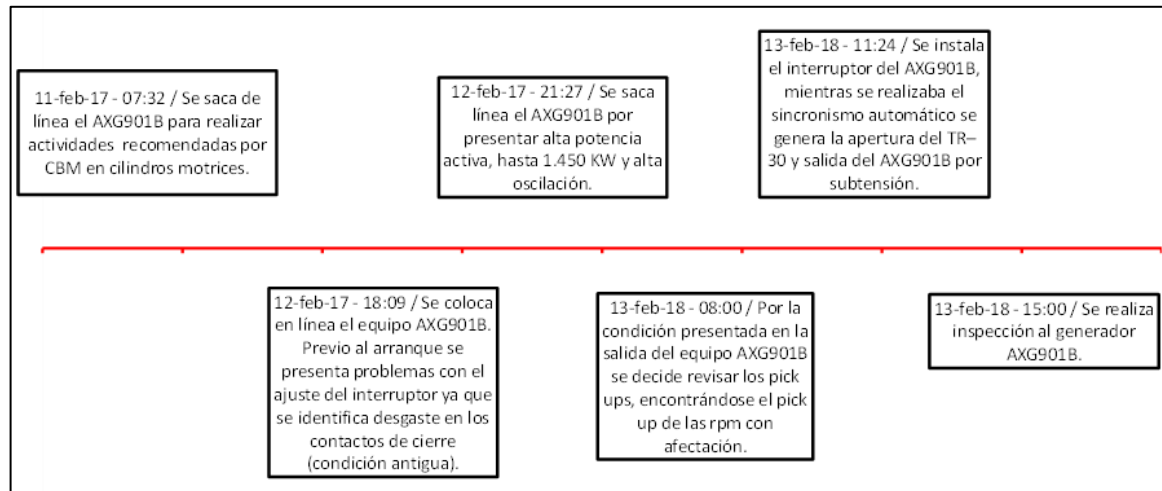


Figura 25. Contacto macho interruptor AXG901B con rastro de alta temperatura.



5.1.5 Línea de Tiempo. En la línea de tiempo del evento, se tiene en cuenta los hechos más relevantes asociados al AXG901B, ocurridos antes de la falla.

Figura 26. Línea de tiempo para el evento de falla.



El día 11 de febrero de 2017 se realiza monitoreo de vibraciones y ultrasonido al motor de combustión, donde se recomienda sacar de línea el equipo AXG901B para revisar la condición de los cilindros motrices. Previo a la falla el equipo presenta problemas de alta oscilación de la potencia activa y ajuste de rampa de arranque (ver tabla 12).

Tabla 12. Secuencia de eventos asociados a la falla.

Fecha	HH:MM	EVENTO
11/02/2017	07:32	Se saca de línea el AXG901B para realizar actividades recomendadas por CBM en cilindros motrices.
12/02/2017	18:09	Se coloca en línea el equipo AXG901B. Durante el arranque se requirió soporte de instrumentación para ajuste de rampa de arranque.
12/02/2017	21:27	Se saca línea el equipo AXG901B por presentar alta potencia activa, hasta 1.450 KW y alta oscilación.

13/02/2017	08:00	Por la condición presentada en la salida del equipo AXG901B se decide revisar los pick ups, encontrándose el pick up de las rpm con afectación. Se realiza cambio del pick up de las rpm.
13/02/2017	11:24	Se instala el interruptor del AXG901B y mientras se realizaba el sincronismo automático se genera la apertura del TR-30 y salida del AXG901B por subtensión. En el sitio se identificó humo en el generador.
13/02/2017	15:00	Se realiza inspección al generador AXG901B identificándose 3 diodos de la excitatriz quemados, 1 varistor de excitatriz quemado, rotor de excitatriz operativo, estator de excitatriz operativo y estator de generador operativo.

5.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

5.2.1 Planteamiento del problema. El planteamiento del problema se realiza de acuerdo a la metodología 5W, con el fin de tener una completa y clara definición del evento.

Tabla 13. Falla suministro energía planta GDA.

<p>¿Qué? (What?) ¿Qué hace evidente el problema? ¿En que se manifiesta el inconveniente?</p>	Apagado de Plantas GDA
<p>¿Dónde? (Where?) ¿En qué lugar, sitio o parte de la maquina o material ocurre el problema?</p>	En el interruptor de acople de barra del Generador AXG901B
<p>¿Cuándo? (When?) ¿Cuándo ocurrió el problema? ¿Bajo qué circunstancias ocurre el problema?</p>	En el momento de acoplar el interruptor del AXG901B a la barra
<p>¿Quién? (Who?) Depende de las actuaciones humanas el hecho de que aparezca o no el problema?</p>	No depende de ninguna actividad humana
<p>¿Cómo? (How?) ¿Cual es la forma en que se presenta el problema? ¿Cómo difiere de la situación normal o de un patrón?</p>	Se presenta una sobrecorriente de 1.89 kA en el relé asociado al Transformador TR30
<p>¿Cuál? (Which?) ¿Hay una tendencia de problema? ¿Hay un patrón de comportamiento?</p>	Falla por primera vez

5.2.2 Fenómeno. Se presenta una alta corriente de 1.89 kA en el relé asociado al Transformador TR30, que genera el apagado las Plantas de la GDA por falla en el interruptor del Generador AXG901B en el momento de realizar su acople a la barra. Esta falla se presenta por primera vez y no depende de ninguna actividad humana.

5.3 ANÁLISIS DE LAS CAUSAS POSIBLES

5.3.1 Lluvia de ideas. Como parte del análisis, se desarrolla una lluvia de ideas para encontrar las posibles causas de la falla de suministro de energía en las plantas de la GDA, como se presenta a continuación.

1. Apertura del TR-30 por alguna de las siguientes razones:

- Falla eléctrica.
- Desbalance de corriente.
- Desbalance de tensión.
- Variación de frecuencia.
- Maniobra indeseada.
- Fallas mecánicas.

2. Salida de los generadores por alguna de las siguientes razones:

- Falla aislamiento en conductores.
- Falla de aisladores.
- Sobrecorriente fase C.
- Acople inadecuado en potencia y control de interruptor fase C.
- Mantenimiento inadecuado.

- Falla relé de sincronismo.
- Operación manual indebida de sincronismo.
- Apertura de interruptor del AXG901A.
- Apertura de interruptor del AXG901B.
- Apertura de interruptor del AXG901C.
- Apertura de interruptor del AXG901D.

3. Ausencia de energía externa.

5.4 ANÁLISIS DE LAS CAUSAS PROBABLES

5.4.1 Árbol de Fallas. En la figura 29 se presenta el árbol de falla desarrollado para el análisis causa raíz de la falla, teniendo en cuenta las hipótesis planteadas en la lluvia de ideas.

5.4.2 Verificación de Causas Raíz. Una vez planteado el árbol de falla, se procede a validar cada una de las hipótesis de la falla con el objeto de definir si definitivamente se descarta (R) o si está asociada a la falla (V), mediante las respectivas acciones de verificación que se muestran en la tabla 14.

Figura 27. Árbol de Fallas.

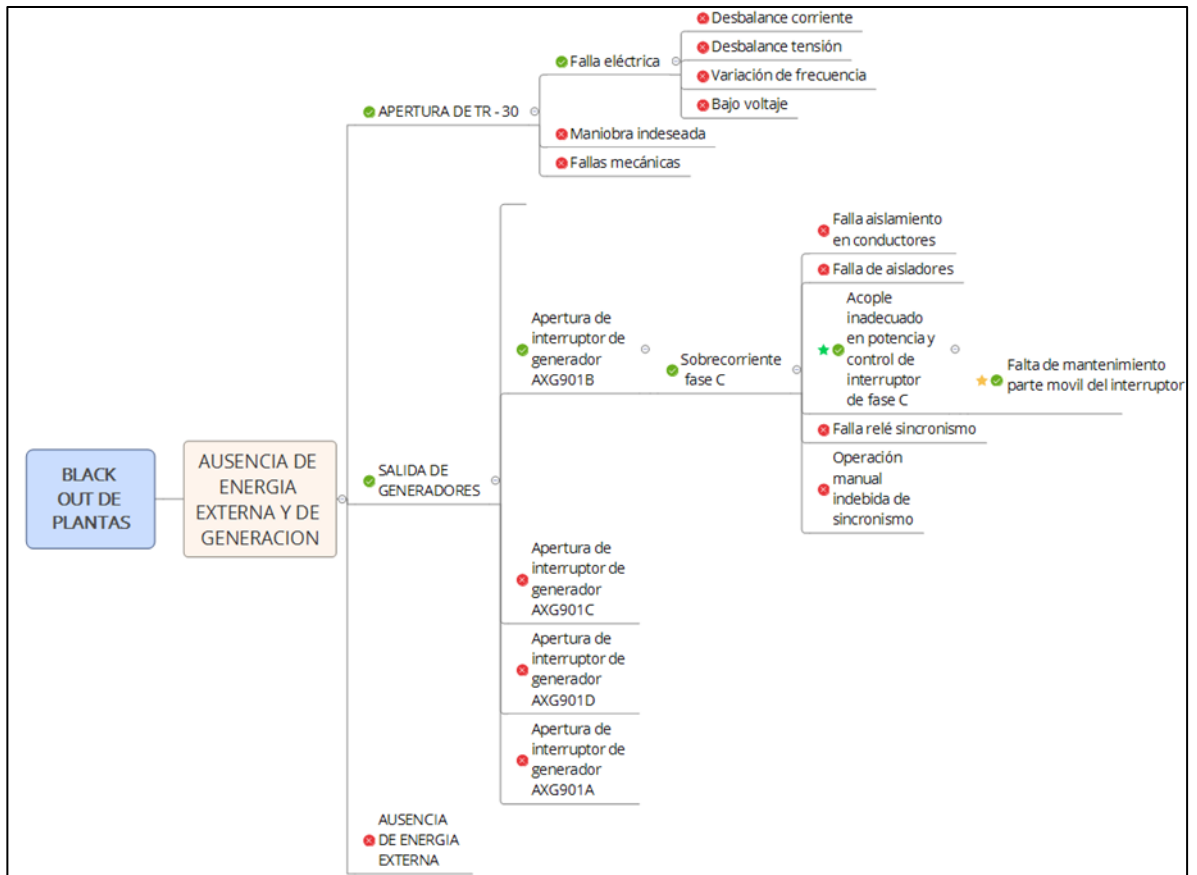


Tabla 14. Verificación de Causas Raíz.

SISTEMA	HIPÓTESIS DE FALLA	ACCIÓN DE VERIFICACIÓN	RESULTADO	R	V
APERTURA DE TR – 30	Falla eléctrica	Verificar condiciones presentadas en la red durante el momento de la falla	En el relé se registró disparo del interruptor por sobrecorrientes		X
APERTURA DE TR – 30	Desbalance corriente	Verificar si se presenta disparo por desbalance de corriente	En el relé no se registró disparo del interruptor por desbalance de corriente	X	
APERTURA DE TR – 30	Desbalance tensión	Verificar si se presenta disparo por desbalance de tensión	En el relé no se registró disparo del interruptor por desbalance de tensión	X	

APERTURA DE TR – 30	Variación de frecuencia	Verificar si se presenta disparo por variación de frecuencia	En el relé no se registró disparo del interruptor por variación de frecuencia	X	
APERTURA DE TR – 30	Bajo voltaje	Verificar si se presenta disparo por bajo voltaje	En el relé no se registró disparo del interruptor por bajo voltaje	X	
APERTURA DE TR - 30	Maniobra indeseada	Verificar si previo a la falla se realizaron maniobras no planeadas que generasen la apertura del interruptor del TR – 30	No se tiene registro de maniobras previas a la falla	X	
APERTURA DE TR - 30	Fallas mecánicas	Verificar si se presenta anomalías mecánicas en el transformador	No se identifican condiciones anormales en la operación mecánica del transformador	X	
SALIDA DE GENERADORES	Apertura de interruptor de generador AXG901B	Verificar si se presenta falla en el generador previo a la falla	En el relé se registró disparo del interruptor después de salidas de TR – 30		X
SALIDA DE GENERADORES	Falla aislamiento en conductores	Verificar si se presenta falla en aislamiento de conductores	En medición no se identifica falla en aislamiento de conductores	X	
SALIDA DE GENERADORES	Falla de aisladores	Verificar si se presenta condiciones anormales en los aisladores	En verificación no se identifica condiciones anormales en los aisladores	X	
SALIDA DE GENERADORES	Sobrecorriente fase C	Verificar en el relé si se presenta condiciones de cortocircuito	En el relé se registró disparo del interruptor por sobrecorrientes		X
SALIDA DE GENERADORES	Acople inadecuado en potencia y control de interruptor de fase C	Verificar acoplamiento en la barra del interruptor	Se identifica conector de interruptor de una de las fases con rastro de alta temperatura		X
SALIDA DE GENERADORES	Falta de Mantenimiento al interruptor	Verificar si se realizan mantenimientos especializados a los interruptores de las celdas	No se cuenta con rutinas de mantenimiento para los interruptores de las celdas		X
SALIDA DE GENERADORES	Falla relé sincronismo	Verificar si se presenta condición de falla durante sincronización	Previo a colocar en línea el generador se identifica que el relé cumple con su trabajo asegurar parámetros para sincronizar	X	

SALIDA DE GENERADORES	Operación manual indebida de sincronismo	Verificar si se forzó sincronismo manualmente	El sistema no permite un sincronismo forzado en manual si no se cumple parámetros	X	
SALIDA DE GENERADORES	Apertura de interruptor de generador AXG901C	Verificar si se presenta falla en el generador previo a la falla	En el relé se registró disparo del interruptor después de salidas de TR – 30 y AXG901B	X	
SALIDA DE GENERADORES	Apertura de interruptor de generador AXG901D	Verificar si se presenta falla en el generador previo a la falla	En el relé se registró disparo del interruptor después de salidas de TR – 30 y AXG901B	X	
SALIDA DE GENERADORES	Apertura de interruptor de generador AXG191A	Verificar si se presenta falla en el generador previo a la falla	En el relé se registró disparo del interruptor después de salidas de TR – 30 y AXG901B	X	

5.5 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

5.5.1 Soluciones de la causa raíz. Verificadas las hipótesis de falla se obtiene la causa raíz del evento y se generan las soluciones más acertadas para corregir, controlar y hacer seguimiento al modo de falla encontrado.

Tabla 15. Soluciones de la causa raíz.

CAUSA RAÍZ	SOLUCIÓN	ENTREGABLE
Falta de Mantenimiento al interruptor	Realizar diagnóstico detallado de los interruptores de los equipos AXG901A/B/C/D.	Informe con el estado mecánico actual de los interruptores y recomendaciones.
	Implementar rutinas de mantenimiento adecuadas para las partes mecánicas de los interruptores de los equipos AXG901A/B/C/D.	Cargue en el sistema de las rutinas de mantenimiento definidas con su respectiva frecuencia.

	Capacitar y entrenar al personal de ejecución de mantenimiento en el diagnóstico y cuidado básico de interruptores en generadores eléctricos.	Registro de asistencia y evaluación del personal capacitado y entrenado.
--	---	--

5.5.2 Plan de acción. Como parte del desarrollo de la solución, se realizó el diagnóstico detallado de los interruptores de los generadores AXG901A/B/C/D, encontrando algunos hallazgos, que se tienen en cuenta en el siguiente plan de acción definido para aumentar la confiabilidad de los generadores eléctricos y por ende de las Plantas de la GDA.

Tabla 16. Plan de acción.

HALLAZGO	ACCION	RESPONSABLE	FECHA	COSTO IMPLEMENTACIÓN
Personal no tiene el conocimiento requerido para diagnosticar y mantener los interruptores de los generadores	Capacitar y entrenar al personal de ejecución de mantenimiento en el diagnóstico y cuidado básico de los interruptores de los generadores eléctricos.	Jefe de Mantenimiento	30-Jun-2018	\$3.000.000
Interruptor del carro sin ajuste	<ul style="list-style-type: none"> * Extraer el interruptor de potencia de la gaveta. * Revisar lógica cableada del permisivo de cierre a través del switch de oposición servicio del interruptor. * Realizar calibración de la posición del final de carrera del interruptor. 	Técnico de Mantenimiento	15-Jun-2018	\$450.000

Parte móvil del interruptor descalibrada	* Revisar los rodachines del interruptor y reemplazarlos según sea el caso. * Asegurar que su desplazamiento sea libre.	Técnico de Mantenimiento	15-Jun-2018	\$450.000
No se cuenta con rutinas de Mantenimiento específicas para el interruptor	Validar y cargar en el software de mantenimiento las rutinas para verificación de ajuste de partes mecánicas y móviles del interruptor y actuador (válvulas de gas) y mariposa (entrada de aire).	Profesional de Mantenimiento	30-Jul-2018	\$1.000.000
TOTAL				\$4.900.000

El plan de acción propuesto será cargado en el software de confiabilidad de la GDA, asegurando así que cada uno de los responsables implementen las acciones de control requeridas dentro del periodo establecido.

6. CONCLUSIONES

La aplicación de la metodología de Análisis Causa Raíz a la falla de suministro de energía en las plantas de proceso de la GDA, permitió desarrollar un proceso de análisis de falla, dando como resultado la identificación de la causa raíz del problema que causó la baja sensible en el indicador de confiabilidad de las Plantas de la GDA.

Teniendo en cuenta los costos ocasionados por los retrasos y reprocesos en el proceso de refinación y quema de gas húmedo, la afectación económica es la principal consecuencia del evento de falla de alto impacto, cuya valoración de riesgos en la matriz RAM arrojó como resultado un nivel de criticidad M (Medio).

Mediante el método cualitativo de árbol de falla, se identificó la causa raíz y por ende el modo de la falla asociado al evento de alto impacto, el cual se eliminará por medio de la implementación de las acciones de control establecidas en el plan propuesto.

El análisis permitió evidenciar que, para lograr una eficiente gestión de mantenimiento con alta confiabilidad de los equipos, es fundamental establecer rutinas de mantenimiento específicas para cada equipo y/o componente crítico, asegurando que el personal tenga las competencias requeridas para ejecutarlas

BIBLIOGRAFÍA

ALTMAN, Carolina. El Análisis de Causa Raíz, como herramienta en la mejora de la Confiabilidad. [En línea]. 12 p. [Consultado el: 16 de octubre de 2017]. Disponible en: <https://docs.google.com/file/d/0B7qSY6KPZGtVc0VXV2pXV2cz TUU/edit>

BAEZ, David. Análisis de Modo Efecto de Falla. [En línea]. [Consultado el: 17 de octubre de 2017]. Disponible en: <https://gestionamantenimiento.blogspot.com.co/2015/08/analisis-modo-efecto-de-falla-amef.html>

BORRÁS, Carlos. Memorias de clase de Mantenimiento Preventivo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. 2015.

_____. Memorias de clase de Principios de Mantenimiento. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. 2014.

_____. Manual de conexiones y sistemas eléctricos de la Refinería de Apiay. Apiay, Villavicencio: ECOPETROL S.A, 2013.

_____. Manual de operaciones de la Refinería de Apiay. Apiay, Villavicencio: ECOPETROL S.A, 2014. 90 p.

_____. Manual de operaciones Planta de Gas Apiay. Apiay, Villavicencio: ECOPETROL S.A, 2014. 66 p.

ENRÍQUEZ HARPER, Gilberto. Elementos de protección de sistemas eléctricos, teoría y práctica. México D.F.: Editorial Limusa, 2008. 452 p. ISBN: 978-60-750-001-45.

_____. El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos. México D.F.: Editorial Limusa, 2004. 252 p. ISBN: 968-18-6053-5.

GASSÁN, Abraham. Herramientas de la Confiabilidad Operacional. [En línea]. 19 p. [Consultado el: 16 de octubre de 2017]. Disponible en: <http://cdimca.com/articulos/28152236405.pdf>

GOOGLE LLC. Búsqueda en línea: Ecopetrol Apiay. [En línea]. [Consultado el: 04 de mayo de 2018]. Disponible en: <https://www.google.com/maps/search/ecopetrol+apiay>

ICCD LTDA. Proyectos. Estación Apiay. [En línea]. [Consultado el: 05 de mayo de 2018]. Disponible en: <http://www.iccdltda.com.co/sitio/proyectos/estacion-apiayecopetrol>

INNOVANDO.NET. ¿Qué es un FMEA? [En línea]. [Consultado el: 17 de octubre de 2017]. Disponible en: <http://innovando.net/que-es-un-fmea/>

LATINO, Mark; LATINO, Robert y LATINO, Kenneth. Root Cause Analysis: Improving Performance for Bottom-Line Results, Fourth Edition. Boca Ratón, U.S.A.: CRC Press, 2011. 279 p. ISBN: 978-143-985-092-3.

MOBLEY, Keith. Root Cause Failure Analysis, First Edition. Woburn, U.S.A.: Butterworth – Heinemann, 1999. 317 p. 978-008-051-642-4.

MORA, Luis. Mantenimiento Industrial Efectivo. Medellín: Editorial COLDI, 2009. 340p. ISBN: 978-958-98902-0-2.

URUETA, José y VALENZUELA, Elkin. Modelo general de Análisis Causa Raíz de fallas y desgastes irregulares de llantas en la flota de transporte de mercancías coordinadora mercantil. [En línea]. Monografía de grado en Ingeniería Mecánica. Cartagena de Indias: Universidad Tecnológica de Bolívar, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2005. 156 p. [Consultado el: 10 de noviembre de 2017]. Disponible en: <http://biblioteca.unitecnologica.edu.co/notas/tesis/0032126.pdf>