

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ PARA  
ASEGURAR LA DISPONIBILIDAD DEL CENTRO DE GENERACIÓN  
ELÉCTRICA DEL PROYECTO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA DEL  
CAMPO YARIGUÍ CANTAGALLO DE ECOPETROL**

**JULIETH ANDREA DITTA DÍAZ  
JHONNY ALEXANDER ROJAS GALVIS**

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

**2013**

**APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ PARA  
ASEGURAR LA DISPONIBILIDAD DEL CENTRO DE GENERACIÓN  
ELÉCTRICA DEL PROYECTO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA DEL  
CAMPO YARIGUÍ CANTAGALLO DE ECOPETROL**

**JULIETH ANDREA DITTA DÍAZ  
JHONNY ALEXANDER ROJAS GALVIS**

**Monografía de grado**

**Presentada como requisito para optar por el título de:  
ESPECIALISTA EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO**

**Director**

**LUIS OMAR SUESCUN ARMESTO  
Magister en Ingeniería mecánica**

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

**2013**

## DEDICATORIA

*A mi Padre Celestial por su amor inefable*

*A mi Señor Jesucristo por su gracia*

*Al Espíritu Santo por su intercesión*

*A mi bendita mamá por su apoyo incondicional*

*A mi papá por sus consejos*

*A mi hermosa Esposa por su maravillosa compañía, motivación y paciencia*

*A mis benditos hijos por contagiarme de su gozo y sus sueños angelicales*

JHONNY ROJAS

## **AGRADECIMIENTOS**

Al culminar esta obra deseamos manifestarles nuestros más sinceros agradecimientos a:

Nuestro Padre celestial y su hijo Jesucristo por concedernos las fuerzas, el talento y el entendimiento.

Luis Omar Suescún por su interés en dirigir esta investigación.

Los compañeros de trabajo del campo Cantagallo por su valioso aporte a través de su conocimiento.

Los docentes de la Especialización en Gerencia de Mantenimiento de la UIS por compartir sus conocimientos y experiencias, enriqueciendo nuestra formación profesional.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	17
1 CONTEXTUALIZACIÓN .....	19
1.1 OBJETIVOS .....	27
1.1.1. Objetivo general. ....	27
1.1.2. Objetivos específicos. ....	28
2 MARCO REFERENCIAL .....	30
2.1 RECUPERACIÓN SECUNDARIA DE CRUDO .....	30
2.2 PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA .....	33
2.3 FENÓMENO DE COMBUSTIÓN ANORMAL O “GOLPETEO” .....	38
2.3.1. Métodos de detección. ....	42
2.3.1.1. Métodos basados en el análisis de la presión interna del cilindro. ....	43
2.3.1.2. Métodos basados en el análisis de vibraciones del bloque del motor. ....	44
2.3.1.3. Métodos basados en la temperatura del gas de emisión. ....	45
2.3.1.4. Métodos basados en el análisis de radicales y especies. ....	46
2.3.1.5. Métodos de análisis basados en la transferencia de calor. ....	46
2.3.1.6. Formas de evitar el fenómeno de golpeteo. ....	47

2.4	INDICADORES DE GESTIÓN EN MANTENIMIENTO.....	48
2.4.1.	Disponibilidad.....	48
2.4.2.	Confiabilidad. ....	49
2.4.3.	Mantenibilidad.....	49
2.5	TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE FALLAS .....	50
2.5.1.	Análisis de Modos de Falla y Efectos de Falla. ....	50
2.5.2.	Análisis del Árbol de Fallos .....	52
2.5.3.	Análisis de Causa Raíz. ....	55
2.6	METODLOGÍA DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (RCFA) .....	62
2.6.1.	Reporte de la falla .....	65
2.6.2.	Clasificación de la falla.....	65
2.6.3.	Obtención de información. ....	66
2.6.4.	Revisión del diseño. ....	68
2.6.5.	Revisión de la aplicación y del mantenimiento.....	68
2.6.6.	Observaciones y mediciones. ....	69
2.6.7.	Determinación de la causa raíz.....	71
2.6.8.	Evaluación de las potenciales acciones correctivas.....	72
2.6.9.	Análisis de costo-beneficio.....	72
2.6.10.	Reporte y recomendaciones. ....	73

2.6.11. Verificar las acciones correctivas.....	74
3 APLICACIÓN DEL RCA EN ECOPETROL S. A.....	76
3.1 REPORTE PRELIMINAR DE FALLAS.....	82
3.2 ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (RCA).....	85
3.3 ACCIONES DE VERIFICACIÓN.....	88
3.3.1. Análisis del índice de metano.....	89
3.3.2. Análisis de la mezcla aire/combustible.....	91
3.3.3. Revisión de la temperatura de aire de admisión.....	95
4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
5 RECOMENDACIONES.....	102
BIBLIOGRAFÍA.....	103

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Bombas multietapa para inyección de agua en Yariguí-Cantagallo.....	19
Figura 2. Potencia por equipo según placa (1,75 MW) y Potencia Instalada (7 MW).....	21
Figura 3. Moto-generadores CUMMINS de 1,75 MW. ....	21
Figura 4. Faltas de suministro de energía desde enero del 2012 hasta marzo del 2013, debido a fallas en los moto-generadores del Centro de Energía Eléctrica. ....	22
Figura 5. Excedente (1600 kWh aprox.) comprado a la ESSA ESP a través del SIN. ....	24
Figura 6. Cantidad de barriles de crudo no producidos (diferida) asociado al tipo de falla sufrida por Centro de Generación de Yaguirí desde el año 2011 hasta el 2013.....	24
Figura 7. Operación en modo Isla A de la planta de generación de energía en Yariguí – Cantagallo. ....	25
Figura 8. Demanda del Campo Yariguíes, Energía Mínima Horaria Instalada y Energía Mínima Horaria Contratada .....	27
Figura 9. Modo de operación actual. Capacidad en MW vs. Tiempo en meses, en el centro de generación Yariguíes .....	28
Figura 10. Matriz de riesgos para RCA.....	28

Figura 11. Relación entre cantidad y caudal de crudo recuperado para diferentes métodos de recuperación.....	30
Figura 12. Métodos de producción de crudo.....	33
Figura 13. Números de metano para diferentes gases combustibles. ....	38
Figura 14. Imagen obtenida de un ciclo de detonación mediante el sistema LIF. ....	40
Figura 15. Ciclos típicos de detonación y deflagración. ....	44
Figura 16. Diagrama de flujo del análisis de modos de falla y efectos de falla. ....	51
Figura 17. Proceso típico de un Árbol de Fallas. ....	52
Figura 18. Ejemplo de Árbol de Fallas.....	54
Figura 19. Diagrama típico de secuencia de eventos. ....	58
Figura 20. Diagrama Espina de Pescado. ....	55
Figura 21. Diagrama de flujo de la metodología de análisis de causa raíz. ....	64
Figura 22. Diagrama de Flujo RCA para la Superintendencia del Operaciones del Rio.....	78
Figura 23. Matriz de riesgos para RCA.....	79
Figura 24. Descripción del árbol lógico de fallas.....	82
Figura 25. Cantidad de fallas en el Centro de Generación de Yaguirí entre el año 2011 y 2013. ....	84

Figura 26. Tipo y cantidad de fallas presentadas en los motores del Centro de Generación de Yaguirí entre el año 2011 y 2013. ....	85
Figura 27. Árbol lógico de fallas elaborado durante la sesión de análisis de causa raíz.....	87
Figura 28. Mezcla de Aire/Combustible en la unidad generadora número 1.....	93
Figura 29. Mezcla de Aire/Combustible en la unidad generadora número 2.....	94
Figura 30. Mezcla de Aire/Combustible en la unidad generadora número 3.....	94
Figura 31. Mezcla de Aire/Combustible en la unidad generadora número 4.....	95
Figura 32. Número de eventos presentados en cada hora del día. ....	96
Figura 33. Mediciones de temperatura por en los filtros de admisión. ....	97
Figura 34. Factores de derrateo por calidad del combustible y modo de funcionamiento.....	99

## LISTA DE CUADROS

	<b>Pág.</b>
Cuadro 1. Símbolos empleados en el diagrama de análisis de eventos. ....	59
Cuadro 2. Tiempos de ejecución en el proceso RCA. ....	80
Cuadro 3. Herramientas para la implementación del RCA. ....	81
Cuadro 4. Hipótesis de posibles causas de falla y recomendaciones hechas en la sesión de análisis de causa raíz. ....	88
Cuadro 5. Cálculo del índice de metano con la herramienta de Cummins en línea. ....	91
Cuadro 6. Resumen de los resultados del análisis del índice de metano. ....	91
Cuadro 7. Datos sobre las emisiones de los moto-generadores según el fabricante. ....	92
Cuadro 8. Cálculo de la eficiencia del equipo. ....	100
Cuadro 9. Potencia de salida de cada generador. ....	100

## RESUMEN

**TÍTULO:** APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ PARA ASEGURAR LA DISPONIBILIDAD DEL CENTRO DE GENERACIÓN ELÉCTRICA DEL PROYECTO DE RECUPERACIÓN SECUNDARIA DEL CAMPO YARIGUÍ CANTAGALLO\*

**AUTORES:** JULIETH ANDREA DITTA DIAZ  
JHONNY ALEXANDER ROJAS GALVIS\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Análisis de Causa Raíz, Planta de Generación Eléctrica, Proceso de Recuperación Secundaria de Crudo, Moto-Generadores a gas.

**CONTENIDO:** En la presente monografía se expone un ejemplo verídico, referente a la aplicación de la Metodología de Análisis de Causa Raíz (RCFA, por su sigla en inglés) para asegurar la disponibilidad de los moto-generadores a gas (los cuales constan de motores de combustión interna) de la planta encargada del suministro de energía eléctrica al campo de recuperación secundaria de crudo en Yariguí (Departamento de Santander), a cargo de la Superintendencia de Operaciones del Río, de la Empresa Colombiana de Petróleos (ECOPETROL).

Para elaborar el Análisis de Causa Raíz (RCA) de las fallas en los moto-generadores a gas de la planta de energía eléctrica, se conformó un grupo o equipo especial de funcionarios que, aunque son profesionales en diferentes áreas del Centro de Generación Eléctrica, se encuentran relacionados entre sí, gracias a las responsabilidades de ejecución y validación para cada una de las actividades alineadas por la metodología unificada de Ecopetrol S.A. en el “Instructivo para el desarrollo de causa raíz en la Superintendencia de Operaciones del Río”, aplicable en este caso al buen funcionamiento del sistema generador de electricidad (cuatro equipos moto-generadores a gas) y convocados por parte de Confiabilidad para la creación del “Árbol Lógico de Falla”, con el objetivo de definir las acciones correctivas necesarias para asegurar la disponibilidad de dichos equipos y, de tal manera, eliminar las causas perjudiciales para el proceso de recuperación secundaria de crudo en el campo Yariguí.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director M.Sc. Luis Omar Suescun

## ABSTRACT

**TITLE:** APPLICATION OF THE CAUSE ROOT ANALYSIS METHODOLOGY TO ENSURE THE DISPONIBILITY OF THE ELECTRIC POWER PLANTS SECONDARY OIL RECOVERY PROJECT YARIGUÍ-CANTAGALLO'S FIELD\*.

**AUTHORES:** JULIETH ANDREA DITTA DIAZ  
JHONNY ALEXANDER ROJAS GALVIS\*\*

**KEY WORDS:** Cause Root Analysis Methodology, Electric Power Plant, Secondary Oil Recovery Process, Engine Generator Set.

**DESCRIPTION:** In this monograph a truthful example is given concerning the application of the methodology Root Cause Analysis (RCFA, for its acronym in English) to ensure the availability of the gas engine-generators (which consist of internal combustion engines) of the plant responsible for supplying electricity to the field of secondary recovery of oil in Yariguí (Santander Department), in charge of River Operations Superintendent of the Colombian Petroleum Company (ECOPETROL).

To prepare the Root Cause Analysis (RCA) of the failures in gas engine-generators the power plant, was formed a special group or team of officials, but are professionals in different areas of Power Generation Center, they are related to each other, thanks to the implementation and validation responsibilities for each of the activities lined up by the unified methodology of Ecopetrol SA in the "Instructions for the development of root cause in the River Superintendent of Operations", applies in this case to the proper functioning of the electricity generating system (four teams gas engine-generator), and Reliability summoned by the creation of the "Fault Tree Logic", in order to define the corrective actions necessary to ensure the availability of such equipment, so, remove the causes detrimental to the process of secondary oil recovery in the Yariguí field.

---

\* Monography

\*\* Faculty of Physical and mechanical engineering. School of Mechanical Engineering. Director M.Sc. Luis Omar Suescun.

## INTRODUCCIÓN

El Centro de Generación Yariguí pretende ser la fuente de energía confiable para el Sistema de Inyección de Agua, vital para el proceso de recuperación secundaria del crudo del campo Yariguí de Ecopetrol.

Esta investigación examina los conceptos teóricos y la aplicación práctica de la metodología Análisis de Causa Raíz (RCA), considerado un método riguroso para la solución de problemas en cualquier tipo de falla, basado en un proceso lógico y en la utilización de árboles de causas de fallas, a fin de aumentar la motivación del recurso humano del grupo caza-fallas ya que en la mayoría de los casos es muy exitoso en la búsqueda de causas raíces<sup>1</sup>.

Se compilaron datos relacionados con la recurrencia de fallas basado en la información del sistema Ellipse (CMMS), y mediante herramientas estadísticas se analizan los distintos elementos CMD a fin de calcular y establecer los diferentes índices, rendimientos e indicadores que justifican la aplicación del RCA. Se profundiza en los diferentes conceptos teóricos que tienen relación directa con los eventos de falla más recurrentes en los motores de combustión interna que mueven los generadores, tales como las detonaciones y desviaciones de temperatura, así como la posible afectación de la eficiencia por diversas causas. Con esta investigación se pretende realizará una contribución a la protección de la producción del campo mediante el análisis de informes y estudios preliminares de la calidad del gas y los criterios de selección de los motores de combustión interna, entre otros.

---

<sup>1</sup> Mora L., 2009, Mantenimiento Industrial Efectivo. Editorial COLDI Limitada.

Se presentarán las causas raíces de las continuas y repetitivas salidas del Centro de Generación Yariguí que han traído consigo una serie de afectaciones financieras tanto para Ecopetrol como para la empresa Unión Temporal Generación Colombia. En esta investigación se recurre a la aplicación de la metodología RCA con el fin de mejorar la disponibilidad y confiabilidad de los generadores del Centro de Generación Yariguí, lo que finalmente redundará en el incremento de la disponibilidad de la Planta de Inyección de Agua, cuyos activos son considerados críticos para la producción, disminución del indicador de diferida (barriles de crudo que dejan de producirse y por lo tanto dejan de venderse a refinería), reducción de costos por la compra de energía eléctrica a la ESSA ESP a un precio más alto, y de igual manera, facilitará establecer posiciones claras entre Ecopetrol y el contratista en temas contractuales, económicos y de facturación

## 1 CONTEXTUALIZACIÓN

El campo Cantagallo de Ecopetrol es un campo en producción ya hace varios años y hoy se considera maduro, lo que significa que progresivamente se ha venido agotando el yacimiento. Dada la necesidad de producir más petróleo, sólo hay hoy dos formas: descubrir nuevas reservas o aumentar el factor de recuperación de los campos: Esto es, precisamente, el proyecto de recuperación secundaria de crudo que se ha implementado en el campo Yariguí-Cantagallo, perteneciente a la Superintendencia de Operaciones del Río de Ecopetrol y contempla la instalación y puesta en marcha de una Planta de Inyección de Agua PIA de 100.000 Barriles/día aproximadamente, constituida esencialmente por cinco bombas multietapa en paralelo marca REDA impulsada cada una por un motor eléctrico de 1500 hp.

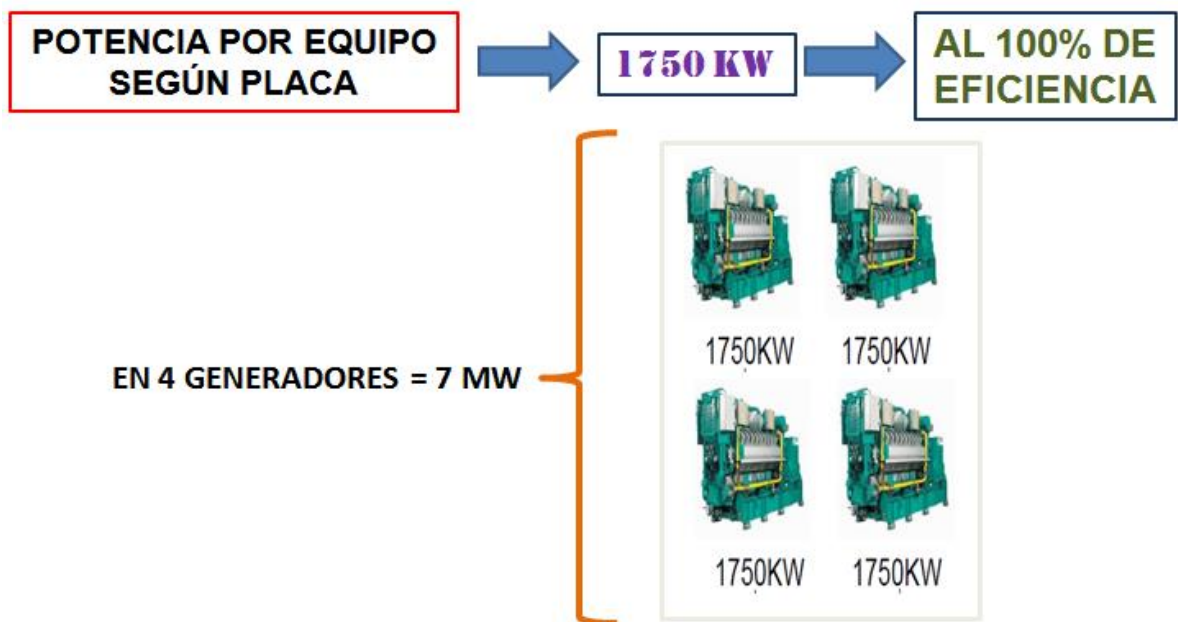
Figura 1. Bombas multietapa para inyección de agua en Yariguí-Cantagallo.



Fuente: Autor de este trabajo.

Bajo las consideraciones anteriores, los activos de la Planta de inyección de agua se catalogan como equipos críticos para la producción, esta planta demanda un consumo de energía cercano a los 7 MW, lo cual hizo necesario el montaje de un Centro de Generación Eléctrica impulsado con motores a gas. Para suplir este requerimiento de energía se recurrió a la empresa Unión Temporal Generación Colombia (UTGC) con la cual se firmó el contrato 5203103 (SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA A TRAVÉS DE CENTROS DE GENERACIÓN CON GAS PARA LOS CAMPOS DE PRODUCCIÓN DE CANTAGALLO Y YARIGUÍ), quienes iniciaron labores a principios de 2009 con cuatro generadores de 1,75 MW cada uno para suplir la demanda de energía (de acuerdo a cálculos previamente realizados por Ecopetrol).

Figura 2. Potencia por equipo según placa (1,75 MW) y Potencia Instalada (7 MW).



Fuente: Autor de este trabajo.

Figura 3. Moto-generadores CUMMINS de 1,75 MW.

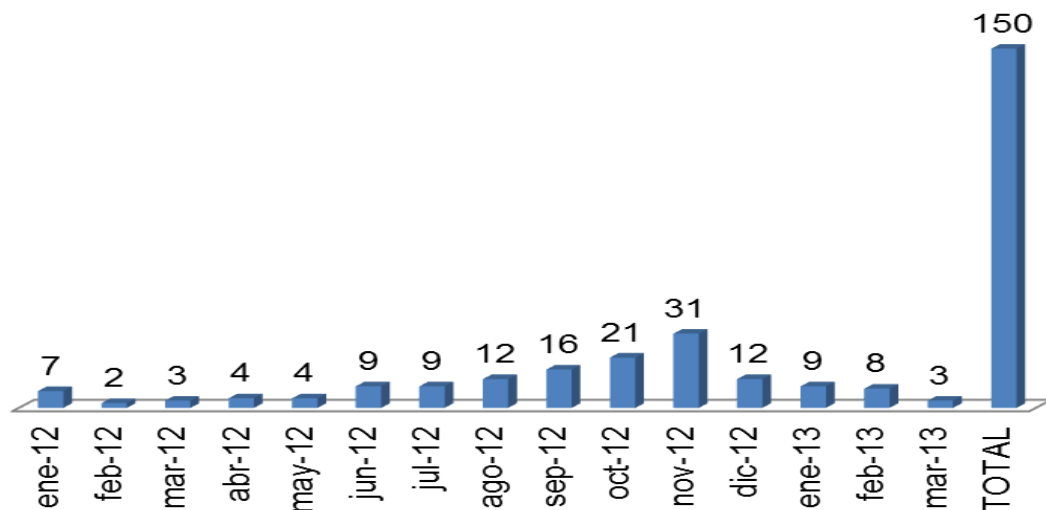


Fuente: Autor de este trabajo.

Con el fin de que la UTGC genere la energía requerida a un costo más económico, Ecopetrol suministra el gas combustible necesario para operar los motores reciprocantes que mueven los generadores. En Diciembre de 2010 arrancó la primera bomba de inyección impulsada por un motor de 1500 hp, la segunda bomba entró en funcionamiento en julio de 2011 presentando el Centro de Generación un funcionamiento normal con una carga aproximada de 4,2 MW con buenos indicadores de confiabilidad y disponibilidad en las máquinas de generación eléctrica. En mayo de 2012 entra en operación la tercera bomba de inyección llegando la carga a alrededor de 5,7 MW, trayendo afectación directa sobre la operación del Centro de Generación, provocando desviaciones de temperatura y detonaciones en los motores de combustión interna que mueven los generadores, lo que repercute en la salida del Centro de Generación, impactando seriamente los indicadores de disponibilidad de la PIA, operando presuntamente el Centro de Generación con alrededor de un 80% de la carga nominal.

Conforme se muestra en la **Figura 4**, a partir de la entrada en servicio de la tercera bomba inyectora de agua en el mes de mayo del 2012, se percibió un aumento exponencial en la frecuencia de fallas de los moto-generadores, llegando hasta 31 pérdidas de suministro eléctrico en el mes de noviembre del 2012, cuando ni siquiera se superaban las 9 faltas de suministro los meses anteriores. Luego, a partir de diciembre del 2012 se muestra un descenso en el número de faltas de suministro debido a la salida de dos moto-generadores para labores de mantenimiento correctivo.

Figura 4. Faltas de suministro de energía desde enero del 2012 hasta marzo del 2013, debido a fallas en los moto-generadores del Centro de Energía Eléctrica.



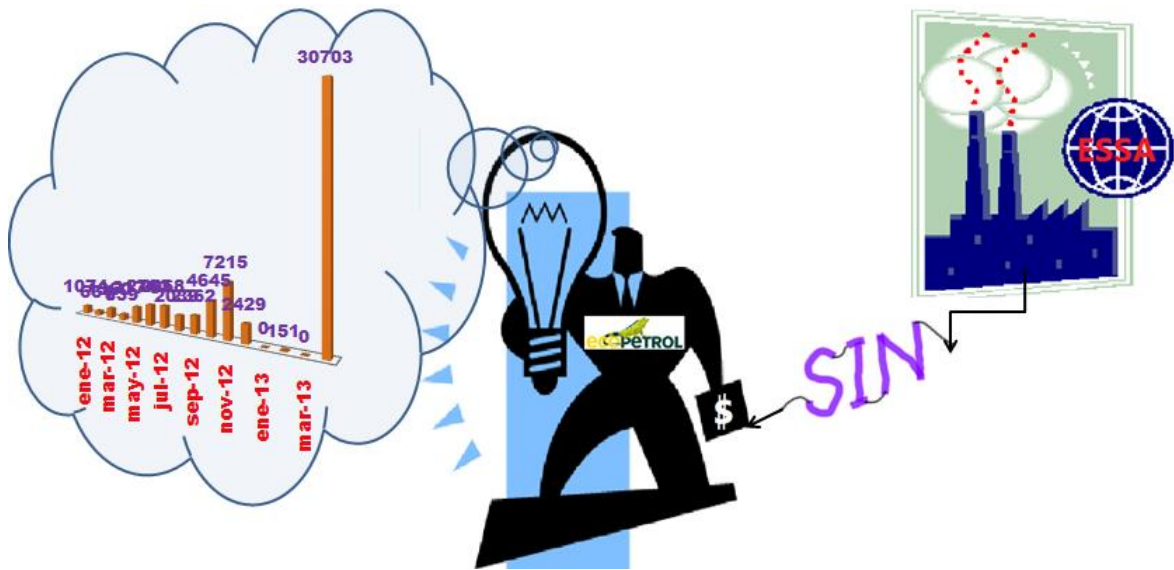
Fuente: GÓMEZ J. y LÓPEZ R. Reporte sobre el estado actual en centros de generación Cantagallo y Yariguí. Ecopetrol<sup>2</sup>.

Esta situación inesperada ocasionó también impacto en el indicador de diferida (es decir se incrementó la cantidad de barriles de crudo que dejan de producirse por

<sup>2</sup>Gómez J., y López R., 2013. Reporte sobre el estado actual centros de generación Cantagallo y Yariguí. Presentación en PowerPoint.

encima del valor máximo estipulado por Ecopetrol), obligando a Ecopetrol a comprar energía eléctrica más costosa en el mercado regulado, es decir a la ESSA ESP, a través del sistema de interconexión nacional SIN (Figura 5).

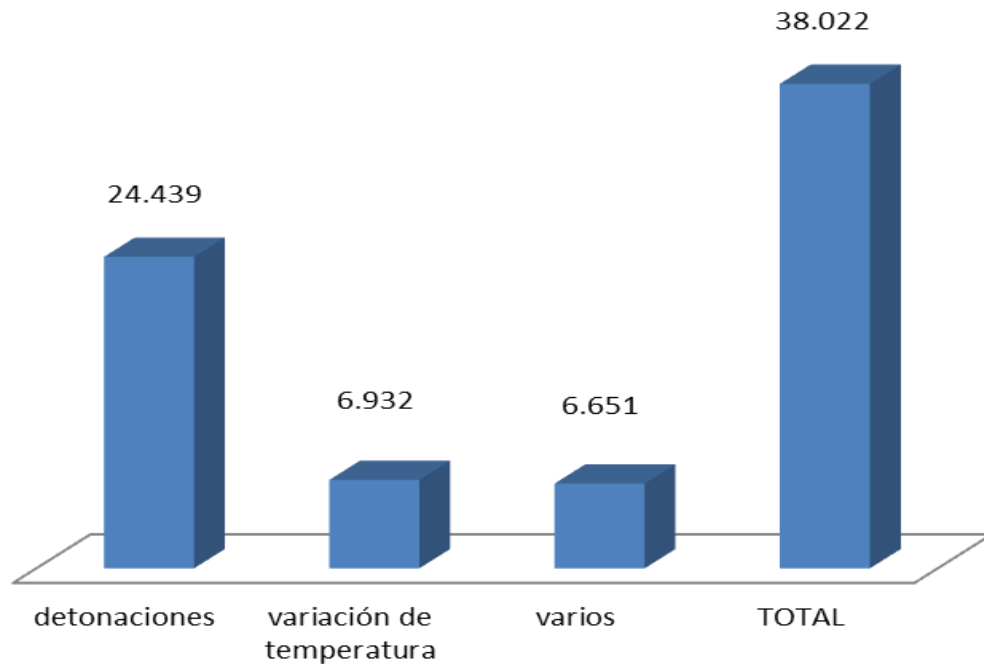
Figura 5. Excedente (1600 kWh aprox.) comprado a la ESSA ESP a través del SIN.



Fuente: Autor de este trabajo.

En la **Figura 6**, se puede observar la dimensión de las pérdidas en términos de cantidad de barriles de crudo no extraídos (diferida) asociada a los tipos de fallas sufridas por los moto-generadores, que llevaron a la pérdida del suministro de energía desde el año 2011 hasta el 2013. Se puede verificar en la figura que las detonaciones y los desvíos de temperatura fueron las principales responsables por un gran aumento en la cantidad de barriles de crudo no extraídos.

Figura 6. Cantidad de barriles de crudo no producidos (diferida) asociado al tipo de falla sufrida por Centro de Generación de Yaguirí desde el año 2011 hasta el 2013.



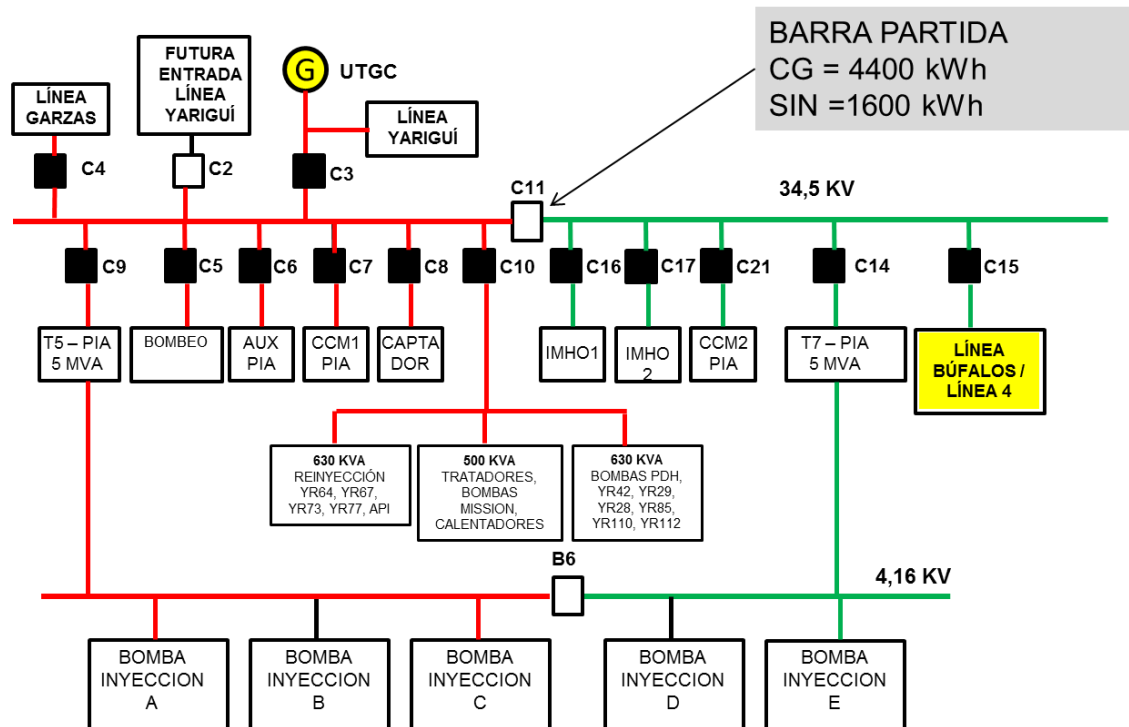
Fuente: GÓMEZ J. y LÓPEZ R. Reporte sobre el estado actual en centros de generación Cantagallo y Yariguí<sup>3</sup>.

Otra implicación de la baja disponibilidad y confiabilidad del centro de generación es la penalización por parte de Ecopetrol, a la UTGC, haciendo recaer sobre esta el pago del excedente de energía eléctrica que se debe comprar a la ESSA para la normal operación de la PIA (Figura 5), lo que generó bastante inconformidad a la UTGC, al punto de negarse a costear ese suministro adicional de energía, alegando que todo el problema radicaba en la mala calidad del gas combustible que Ecopetrol suministraba para la operación del centro de generación.

---

<sup>3</sup>Ibíd., ref. 8

Figura 7. Operación en modo Isla A de la planta de generación de energía en Yariguí – Cantagallo.



Fuente: Gómez J. y López R. Reporte sobre el estado actual en centros de generación Cantagallo y Yariguí. Ecopetrol<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>Ibíd., ref. 8

Figura 8. Demanda del Campo Yariguíes, Energía Mínima Horaria Instalada y Energía Mínima Horaria Contratada.



**Después de dividir con barra partida, se consumen:**

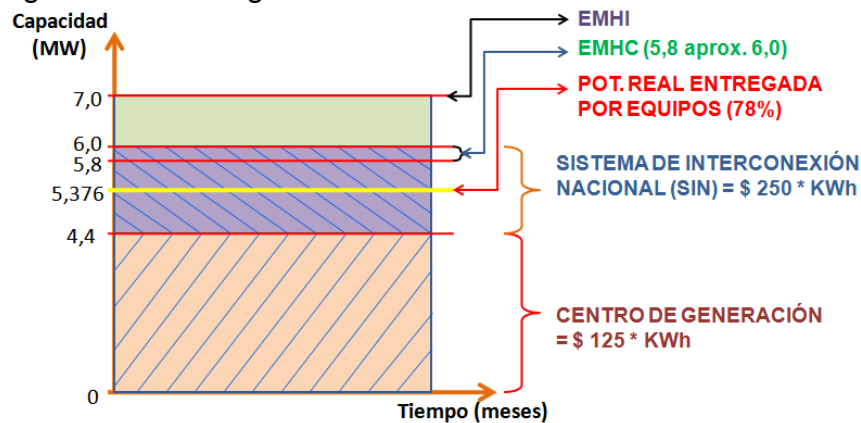
➤ 4,4 MW por el Centro de Generación

➤ 1,6 MW por el S. I. N.

Fuente: Autor de este trabajo.

Actualmente el Centro de Generación Yariguí opera en modo Isla A, (desde el 10 de febrero de 2013 hasta la fecha), es decir, alimentando dos bombas de la PIA y producción, exportando aproximadamente 4400 kWh. La carga restante (1600 kWh aproximadamente), es decir, una bomba de la PIA y la estación de bombeo, son alimentadas por la ESSA a través del SIN.

Figura 9. Modo de operación actual. Capacidad en MW vs. Tiempo en meses, en el centro de generación Yariguíes.



Fuente: Autor de este trabajo.

## 1.1 OBJETIVOS

**1.1.1. Objetivo general.** Este estudio pretende analizar la situación actual del Centro de Generación Yariguí, identificar los factores de afectación que originan la alta diferida, la baja disponibilidad y la confiabilidad del centro de generación, mediante la aplicación de la metodología “Análisis de Causa Raíz (RCA)”, tal como lo arroja la matriz definición tipo RCA<sup>5</sup> de Ecopetrol, basados en su recurrencia en el tiempo y el valor de diferida, el cual en el 2012 fue 14500 Bls de crudo/año, el equivalente a US\$ 725.000<sup>00</sup>, justificando la obligatoriedad de aplicar esta metodología claramente definida en el Manual de Ecopetrol para la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz para la solución de problemas<sup>6</sup>, de la mano de un grupo multidisciplinario de profesionales, quienes en varias sesiones construirán un árbol de fallas a fin de encontrar las diferentes causas que generan las fallas que ocasionan la salida del Centro de Generación, al intentar operar con más de dos bombas multietapa de la PIA y finalmente proponer soluciones, para que el suministro de energía eléctrica para la planta corra por cuenta solo del centro de Generación Yariguí, sin requerir la compra de energía a la ESSA, ya que se supone que los generadores de UTGC deberían proporcionar la energía requerida.

---

<sup>5</sup>GUERRERO R., 2010, Instructivo para el desarrollo de análisis de causa raíz, Superintendencia de operaciones del Rio. 7 Páginas.

<sup>6</sup> Ibíd.

Figura 10. Matriz de riesgos para RCA

Seguridad	CONSECUENCIAS					FRECUENCIA			SEVERIDAD
	Medio Ambiente (BOCD)	Producción (BOCD)	Producción (KPCD)	Producción (KBVD)	Costos Reparación (M\$)	1 vez cada 3 años o más	1 vez cada 2 años	1 vez o más por año	
Día Ausente del Trabajo / Fatalidad	> 100 bls	>900	> 1200	>4,5	> 75	Red	Red	Red	A
Caso de Trabajo Restringido	10 - 100 bls	700-900	800-1200	3,5-4,5	50 - 75	Yellow	Red	Red	B
Tratamiento Médico	1 - 10 bls	300-700	200-800	2-3,5	25 - 50	Yellow	Yellow	Yellow	C
Primeros Auxilios	0.1 - 1 bls	100-300	70-200	0,75-2	Oct-25	Green	Yellow	Yellow	D
No lesión	< 0.1 bls	<100	<70	<0,75	< 10	Green	Green	Green	E

1                      2                      3

RCA

REPARAR Y DOCUMENTAR EN ELLIPSE

REPORTE DE FALLA

Fuente: GUERRERO R. Instructivo para el desarrollo de análisis de causa raíz, Superintendencia de operaciones del Rio<sup>7</sup>.

**1.1.2. Objetivos específicos.** Con base en el procedimiento habitual, que comprende la aplicación de la metodología RCA, fueron definidos los siguientes objetivos específicos:

- Compilar el histórico de diferida (barriles de crudo que dejaron de producirse por la salida de operación de la PIA) y disparos (salida de operación de los generadores por desviaciones de temperatura, detonaciones y causas varias) de los grupos electrógenos del Centro de Generación Yariguí durante los años 2011 a 2013
- Identificar las causas raíces producto del árbol de fallas de las diferentes sesiones del RCA que ocasionan las frecuentes y repetitivas salidas de

<sup>7</sup>Ibíd.

operación de los grupos electrógenos del Centro de Generación Yariguí, cuando este suministra la carga total del Campo (Modo isla B).

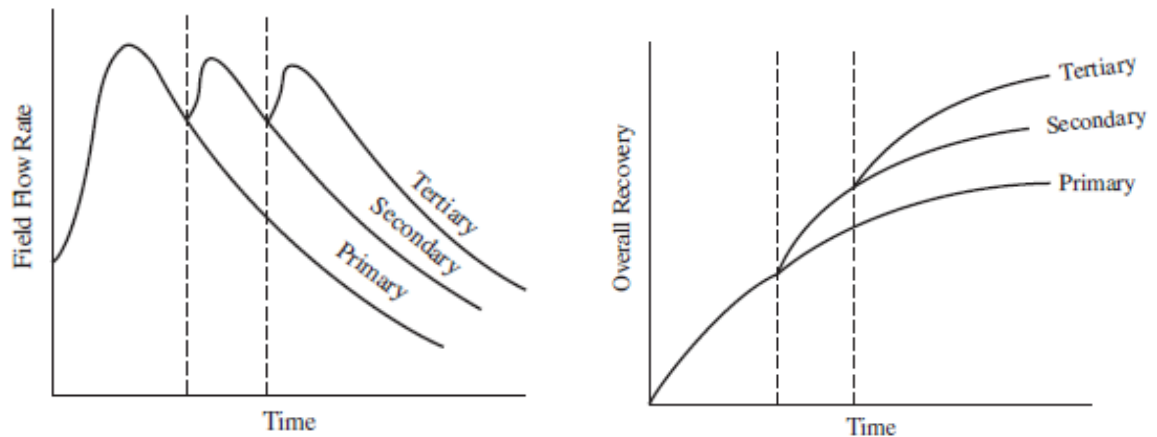
- Analizar los informes y estudios que se haya realizado a los equipos y que estén relacionados con la problemática del Centro de Generación Yariguí.
- Identificar aspectos relevantes del contrato entre Ecopetrol y Unión Temporal Generación Colombia UTGC que estén asociados a la problemática y al modo de operación actual.
- Proponer alternativas de solución a la problemática producto del RCA, para incrementar la disponibilidad y confiabilidad del Centro de Generación Yariguí.

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1 RECUPERACIÓN SECUNDARIA DE CRUDO

En algún momento en el tiempo de vida de un campo de extracción de crudo, como lo muestra la **Figura** , la presión caerá hasta un punto que no habrá suficiente presión subterránea para forzar el crudo hacia la superficie. En caso que exista mérito económico para extraer el crudo remanente en el reservorio de crudo, este es extraído usando métodos de recuperación secundaria

Figura 11. Relación entre cantidad y caudal de crudo recuperado para diferentes métodos de recuperación.



Fuente: AHMED T. Reservoir engineering handbook<sup>8</sup>.

Cuando una gran parte del crudo no se puede recuperar mediante métodos de recuperación primaria, entonces se debe escoger algún método para suministrar energía adicional para generar presión suficiente para forzar el flujo de crudo hacia

---

<sup>8</sup>AHMED T., 2006, Reservoir engineering handbook. Segunda Edición. Editorial Gulf Professional Publishing. 1212 Páginas.

la superficie. Generalmente, se ejecuta un proceso de recuperación secundaria que comprende la inyección de agua o gas dentro de la reserva de crudo para desplazar el crudo y de esa forma mantener o incrementar la presión en la reserva. Cuando se usa gas, generalmente se inyecta cerca a la superficie del reservorio, donde normalmente los gases de crudo se acumulan y forman bolsas de gas. La inyección de gas puede ser un método muy efectivo de recuperación en aquellos reservorios donde el crudo puede fluir libremente hasta el fondo por gravedad. Cuando esto no ocurre habrá que emplear otro método alternativo de recuperación<sup>9</sup>.

Los métodos de recuperación secundaria usan varias técnicas para asistir el proceso de recuperación de crudo en pozos empobrecidos o con baja presión. Algunas veces, se usan bombas sumergidas o en la superficie para llevar el crudo hasta la superficie. Otras técnicas de recuperación secundaria incrementan la presión del pozo mediante la inyección de agua o de algún gas, que puede ser aire<sup>10</sup>.

Ambos procesos de recuperación, proceso de recuperación primaria y proceso de recuperación secundaria, permiten la recuperación de un 25% a 35% del total de crudo remanente en el pozo. El proceso de recuperación primaria deja tanto como un 70% de la cantidad total de crudo existente en el pozo<sup>11</sup>.

Cuando se usa inyección de agua, generalmente se utilizan varios pozos de inyección y de producción. El fluido inyectado mantiene constante o aumenta la presión del reservorio, si es el caso de un reservorio agotado, y desplaza una porción del crudo remanente a los pozos de producción. Este proceso usualmente

---

<sup>9</sup>SPEIGHT J., 2009, Enhance Recovery Methods for Heavy Oil and Tar Sands. Primera Edición. Editorial Gulf Professional Publishing. Páginas 335.

<sup>10</sup> Ibíd.

<sup>11</sup> Ibíd.

incrementa la producción de crudo dos veces de lo que se espera del proceso de recuperación primaria<sup>12</sup>.

Generalmente, la selección apropiada de un patrón en la distribución de los pozos de inyección de agua depende de la cantidad y localización de pozos de inyección accesibles. Frecuentemente, los pozos de producción se pueden convertir en pozos de inyección. En otras circunstancias puede que sea necesaria o ventajosa la perforación de nuevos pozos de inyección<sup>13</sup>.

En el diseño de proyectos de recuperación secundaria, es una práctica habitual localizar los pozos de inyección y de producción en un patrón geométrico regular de forma que se forma un sistema de interconexión simétrico. Sin embargo, la localización relativa de los pozos inyectoros y los de producción depende, entre otros, de los siguientes aspectos<sup>14</sup>:

- Geometría del reservorio;
- Litología;
- Profundidad del reservorio;
- Porosidad;
- Permeabilidad;
- Continuidad de las propiedades de las rocas del reservorio;
- Magnitud y distribución de los fluidos de saturación;

---

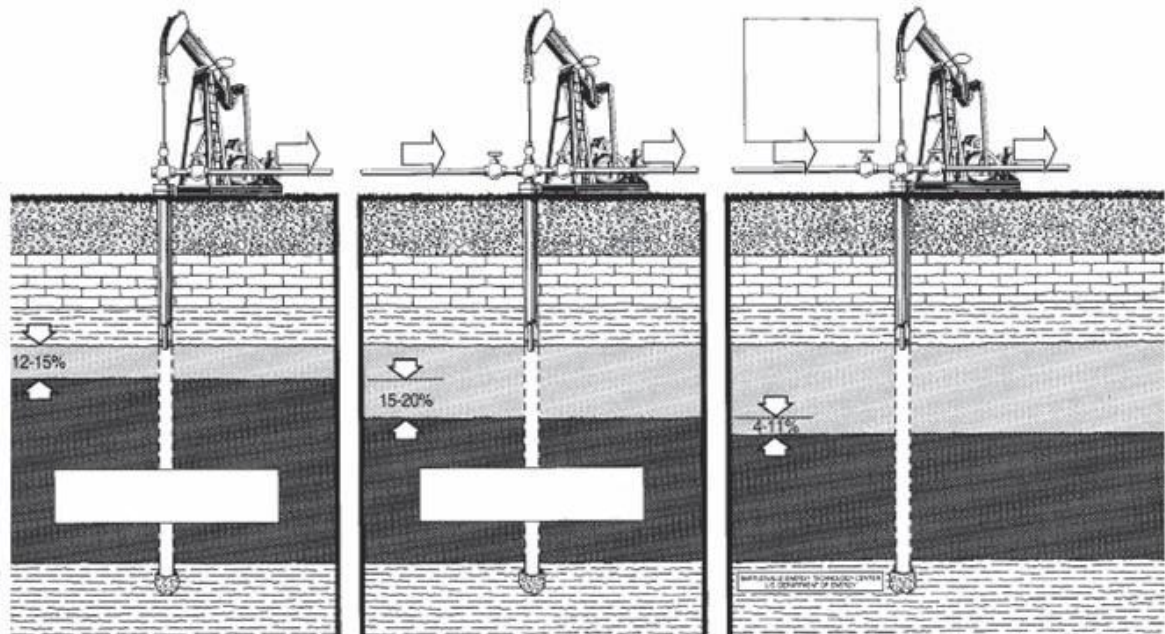
<sup>12</sup> *Ibíd.*

<sup>13</sup> *Ibíd.*

<sup>14</sup> *Ibíd.*

- Las propiedades del crudo;

Figura 12. Métodos de producción de crudo.



Fuente: SPEIGHT J. Enhance Recovery Methods for Heavy Oil and Tar Sands. Primera Edición<sup>15</sup>.

## 2.1. PLANTAS DE GENERACIÓN ELÉCTRICA

Se denomina plantas eléctricas o grupos generadores al conjunto de motor recíprocante y un alternador capaz de transformar la energía mecánica producida por el motor en energía eléctrica útil. Tanto el motor como el alternador están convenientemente montados y dotados con los componentes de supervisión y control necesarios para su funcionamiento autónomo y destinado al suplemento de energía eléctrica producida a partir del consumo de algún tipo de combustible,

<sup>15</sup> Ibíd.

como diésel o gas. En función de los consumidores de energía eléctrica a la cual se destinan, las plantas de generación de energía se construyen con características especiales que los hacen apropiados para diversas aplicaciones. Son varios los factores que se deben considerar antes de la implementación del sistema de generación eléctrica más adecuado. Los fabricantes de plantas eléctricas tienden a estandarizar sus productos, evitando entregas especiales sobre pedido, lo que en la práctica es inviable, ya que hay algunas situaciones especiales impuestos por el ambiente o la aplicación a la cual va dirigido la instalación de la planta de generación de energía que le exigen al fabricante la manufactura de plantas especialmente diseñadas. Hay otros factores como el ruido, la capacidad de operar en paralelo con otras plantas o con la red local de energía eléctrica, capacidad de partida y parada de forma automática, la telemetría y control remoto, son exigencias inherentes a los usuarios de las plantas eléctricas que deben ser atendidas. En todas estas situaciones, se debe realizar un análisis cuidadoso como parte del proyecto de instalación de una planta eléctrica<sup>16</sup>.

Para una correcta selección de un grupo generador, se deben responder satisfactoriamente algunas preguntas, como:

- ¿Qué potencia debe suministrar la planta eléctrica?

Para responder a esta pregunta se debe realizar una estimación de la carga eléctrica, es decir, la suma de toda la energía requerida para el funcionamiento normal de todos los equipos que estarían conectados a la red de suministro, incluyendo aquella porción de energía necesaria para el suministro de los servicios

---

<sup>16</sup>AGRIZZI F., 2007, Estudo técnico-econômico de implantação de um grupo gerador de emergência em fábrica de refrigerantes. Projeto de graduação da Universidade Federal do Espírito Santo para a obtenção do grau de engenheiro eletricista. 53 Páginas.

básicos, como la luz, el agua y el uso de herramientas habituales, como los equipos de cómputo.

- ¿Cómo es el ambiente de servicio? (marítimo, terrestre, ambiente con riesgo de explosión)
- ¿Cuáles son las características del local? (temperatura ambiente, altitud, presión atmosférica, nivel de contaminación del aire)

Establecer claramente las condiciones ambientales les permite a los encargados de la selección del grupo generador, la selección de la configuración del equipo más adecuada para que este pueda funcionar adecuadamente sin importar las inclemencias de las condiciones ambientales típicas del lugar donde será instalado el grupo generador. La habitual es construir una infraestructura especialmente diseñada donde instalar el grupo generador y los equipos de la red eléctrica.

Por otro lado, las condiciones ambientales son cruciales para un buen proceso de ignición y buen funcionamiento del generador. Todas las plantas eléctricas, independiente del combustible empleado, requieren aire para el proceso de combustión. Una disminución de la cantidad de aire pueden llevar a una parada del motor de la planta eléctrica.

Un aumento de la altitud o de la temperatura ambiente supone una disminución de la densidad del aire y por tanto de la cantidad de aire necesario para que el motor pueda hacer la correcta proporción de aire y combustible. Una incorrecta proporción en la mezcla tiene consecuencias en la eficiencia y la potencia del motor de la planta eléctrica.

Cuando la instalación de las plantas eléctricas se deben hacer en condiciones geográficas y atmosféricas que no son las ideales para la obtención del máximo de potencia y eficiencia del equipo, y sí además el combustible disponible no posee buenas propiedades para evitar el fenómeno del golpeteo, cada fabricante

de plantas eléctricas establece una serie de factores de reducción de potencia o factores de “derrateo” que deberán tenerse en cuenta para estimar la potencia de la planta eléctrica cuando la calidad del combustible no es la ideal y cuando las condiciones geográficas y atmosféricas son desfavorables.

- ¿Cuál es la eficiencia y el grado de emisiones considerado como aceptable?

Actualmente existe una creciente preocupación sobre el futuro del suministro de energía, también como el cambio climático causado por el uso insostenible de la energía. Por estas razones, se han estado usando y desarrollando combustibles alternativos para reemplazar los combustibles tradicionales<sup>17</sup>.

El uso de gas natural posee una serie de ventajas ambientales, cuando es comparado con el Diesel o la gasolina. Las plantas eléctricas con motores de combustión interna que funcionan con gas natural como combustible alcanzan niveles de CO<sub>2</sub> por debajo que los motores Diesel a la misma proporción aire/combustible, manteniendo casi la misma eficiencia térmica en condiciones de exceso de aire (lean burn)<sup>18,19</sup>. Las emisiones de CO<sub>2</sub> de los motores a gas se pueden reducir a más del 20% comparado con los motores a gasolina de la misma potencia<sup>20</sup>.

El material particulado y las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) son altamente nocivos a la salud y el medio ambiente cuando están presentes en grandes concentraciones. Los motores de gas natural producen menos material

---

<sup>17</sup>Malenshek M. y Olsen D., 2009, Methane number testing of alternative gaseous fuels. Editorial Elsevier, Revista Fuel, Vol. 88, Páginas 650–656.

<sup>18</sup> Ibid.

<sup>19</sup>Cho H. M. y He B.-Q., 2007, Spark ignition natural gas engines — A review. Editorial Elsevier, Revista Energy Conversion and Management, Vol. 48, Páginas 608–618

<sup>20</sup>Ibid.

particulado que los motores Diesel, ya que el gas natural no posee compuestos aromáticos e impurezas que los combustibles derivados del petróleo<sup>21</sup>.

- ¿Qué tipo de combustible se utilizará y cuál su resistencia al fenómeno de golpeteo?

La resistencia al golpeteo del gas natural combustible se mide por el índice de metano. Cuanto mayor el índice de metano tiene el gas, mayor será su resistencia a las detonaciones. Y cuanto mayor la resistencia las detonaciones el motor puede usar relaciones de compresión más altas para aumentar la eficiencia térmica del motor<sup>22</sup>. En la **Figura** se pueden observar una estimativa del número de metano para diferentes tipos de gases. En el gráfico sobresalen los gases de digestor y los gases de relleno por tener un índice de metano mayor que 100; mientras que un gas natural típico posee un índice de metano entre 70 y 100.

- ¿Cuál es el régimen de operación? (¿El grupo generador es la única fuente de energía o existe una red local? ¿Cuántas horas se deberá operar por día?)
- ¿Cuáles son los riesgos relacionados con la interrupción del suministro de energía?

Una vez se hayan dado respuesta a cada una de las interrogantes anteriores, se podrá calcular la potencia del motor. Actualmente, el propio fabricante ofrece una guía paso-a-paso para resolver las interrogantes anteriores y realizar la selección correcta del grupo generador<sup>23</sup>.

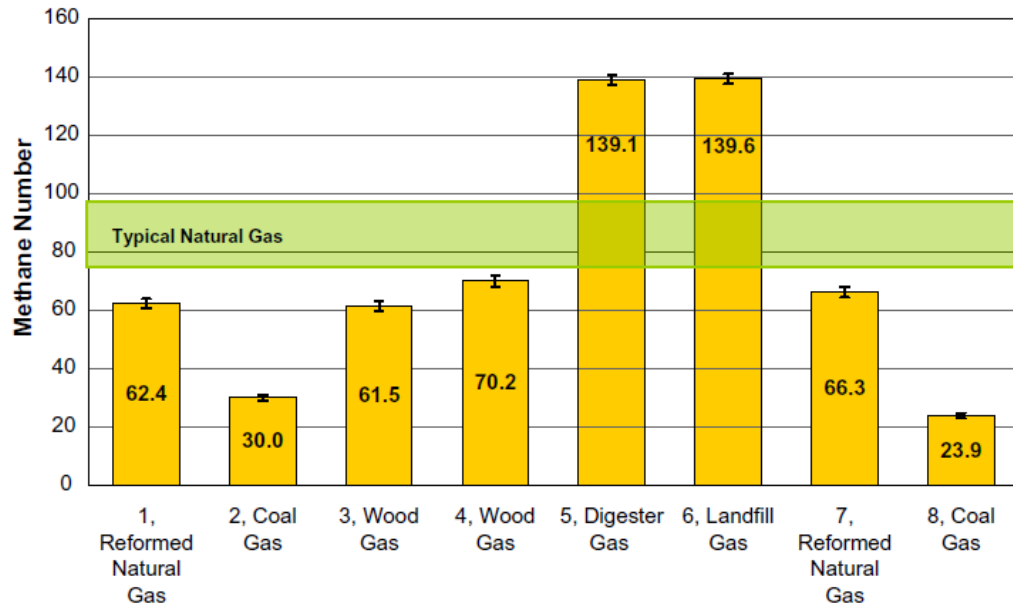
---

<sup>21</sup> Ibid.

<sup>22</sup> Malenshek M. y Olsen D., 2009, Methane number testing of alternative gaseous fuels. Editorial Elsevier, Revista Fuel, Vol. 88, Páginas 650–656

<sup>23</sup> Ibid., ref. 22

Figura 13. Números de metano para diferentes gases combustibles.



Fuente: MALENSHEK M. y OLSEN D. Methane number testing of alternative gaseous fuels<sup>24</sup>.

## 2.2. FENÓMENO DE COMBUSTIÓN ANORMAL O “GOLPETEO”

El fenómeno de golpeteo en los motores de combustión interna, también conocido vulgarmente como “picado” o “cascabeleo”, es un fenómeno anormal de combustión de la mezcla de aire y combustible cuyo síntoma principal se distingue por sonidos metálicos fuertes y frecuentes durante el funcionamiento del motor, pero que además genera efectos adversos a la integridad física de la máquina y su rendimiento<sup>25,26</sup>.

<sup>24</sup> Ibid.

<sup>25</sup> Heywood J., 1988, Internal combustion engine fundamentals. Editorial McGraw-Hill. 917 Páginas.

<sup>26</sup> Zhen X., Wang Y., Xu S., Zhu Y., Tao C., Xu T. y Song M., 2012, The engine knock analysis – An overview. Editorial Elsevier, Revista Applied Energy, Vol. 92, Páginas. 628–636.

Un evento normal de combustión en un motor se puede describir como el movimiento de un frente de llama turbulento, que comienza desde la bujía de ignición y se desplaza a través de la mezcla aire/combustible siguiendo las directrices de la cinemática química de las reacciones de oxidación. Durante la combustión, el remanente de la mezcla aire/combustible no encendido por el frente de la llama se denomina “fin de gas”<sup>27</sup>.

Hay dos teorías aceptadas sobre el fenómeno del golpeteo, la teoría de la auto ignición y la teoría de la detonación<sup>28</sup>.

Durante la operación normal de un motor de combustión interna, el frente de llama se propaga a través del fin de gas, consumiendo la mezcla de aire y combustible remanente de forma controlada. Contrario a esto, según la teoría de la auto ignición el fin de gas se enciende antes que la llegada del frente de llama, debido a la aparición de puntos calientes producidos por una distribución poco uniforme de la temperatura del combustible dentro de los cilindros, y que entre otras cosas, produce una perturbación en la distribución de la presión en el interior de los cilindros del motor y que altera su frecuencia normal de vibración, lo que se traduce en aquel ruido metálico frecuente o golpeteo característico<sup>29,30,31</sup>.

Aquellos puntos calientes o de alta temperatura pueden ser vistos en condiciones especiales de laboratorio gracias a técnicas científicas de vanguardia gracias a los adelantos científicos relacionados con la toma de imágenes a altas velocidades, como la visualización del fenómeno de detonación mediante el sistema de

---

<sup>27</sup> *Ibíd.*

<sup>28</sup> Abu-qudais M., 1996, Exhaust gas temperature for knock detection and control in spark ignition engine. Editorial Elsevier, Revista Energy conversion and management, Vol 37, Páginas 1383–1392.

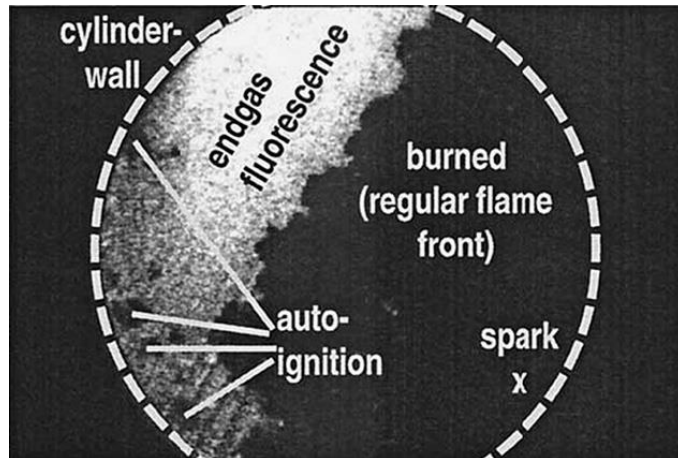
<sup>29</sup> *Ibíd.*, ref. 31

<sup>30</sup> *Ibíd.*, ref. 32

<sup>31</sup> *Ibíd.*, ref. 34

fluorescencia inducida por láser (LIF). La Figura 14 es un ejemplo de ese tipo de imágenes de alta velocidad en la cual es posible observar el mismo instante del fenómeno de detonación a partir de cuatro puntos de auto ignición, mientras que el lugar del encendido por la chispa de ignición se muestra marcado por una cruz<sup>32</sup>.

Figura 14. Imagen obtenida de un ciclo de detonación mediante el sistema LIF.



Fuente: ZHEN X., WANG Y., XU S., ZHU Y., TAO C., XU T. y SONG M. The engine knock analysis – An overview<sup>33</sup>.

En cambio, la teoría de la detonación asume que el fenómeno del golpeteo ocurre debido a la propagación del frente de llama, que se acelera desde la bujía de ignición hasta el otro lado de la cámara de combustión a velocidades supersónicas y creando ondas de choque<sup>34</sup>.

Entre las otras cosas que puede sufrir el motor durante el fenómeno de golpeteo es el aumento considerable de la presión y la temperatura en el interior de los cilindros. La combinación de alta presión y alta temperatura en continuos periodos

---

<sup>32</sup> Ibid., ref. 32

<sup>33</sup> Ibid., ref. 32

<sup>34</sup> Ibid., ref. 34

de operación del motor puede básicamente destruir los componentes presentes en los cilindros y en la cámara de combustión del motor<sup>35,36</sup>.

Los síntomas inmediatos de un motor que sufre del fenómeno del golpeteo son los siguientes<sup>37,38</sup>.

- Ruidos metálicos fuertes y frecuentes;
- Perdida de desempeño del motor;
- Incremento en la polución del aire;

Si el fenómeno de golpeteo no es corregido, existe el riesgo que en poco tiempo el motor sufra las siguientes fallas en la integridad de sus componentes<sup>39,40</sup>.

- Rotura de los anillos de los pistones
- Erosión de la cabeza de los cilindros
- Derretido de los pistones

La auto ignición del fin de gas produce un aumento repentino de la presión y una alta temperatura en el interior de los cilindros, disminución de la eficiencia energética del motor, incremento considerable en el consumo de combustible y también daños en la estructura del motor a largo plazo<sup>41</sup>.

---

<sup>35</sup> Ibid., ref. 31.

<sup>36</sup> Ibid., ref. 32.

<sup>37</sup> Ibid., ref. 31.

<sup>38</sup> Ibid., ref. 32.

<sup>39</sup> Ibid., ref. 31.

<sup>40</sup> Ibid., ref. 32.

<sup>41</sup> Ibid., ref. 32.

Debido a todos estos efectos perjudiciales producidos por el fenómeno anormal de la detonación, los fabricantes de motores de combustión interna se esfuerzan por diseñar este tipo máquinas para que operen libres de detonaciones. El fenómeno de detonación depende de varias variables, entre las cuales está el diseño de la cámara de combustión, la temperatura del aire de entrada al motor, la presión y las propiedades del combustible<sup>42,43</sup>.

**2.3.1. Métodos de detección.** Existen diversos métodos para la detección del fenómeno del golpeteo, los cuales se pueden clasificar dentro de dos grandes métodos llamados métodos directos y métodos indirectos. Los métodos directos están basados en la medición directa y el estudio de los parámetros de combustión existentes dentro de los cilindros del motor, los cuales están influenciados por el fenómeno del golpeteo. Los otros métodos están basados en la medición indirecta, por ejemplo, a través de la medición de las vibraciones del bloque del motor<sup>44</sup>.

Además, la detección del fenómeno del golpeteo se puede realizar con base en diferentes métodos, como el análisis de la presión interna de los cilindros, análisis de las vibraciones del motor, análisis de corrientes iónicas, radiación de luz y análisis de emisión acústica, análisis de transferencia de calor, análisis de temperatura, entre otros. En seguida se explicaran los métodos más aplicados<sup>45</sup>.

---

<sup>42</sup> Ibid., ref. 31.

<sup>43</sup> Ibid., ref. 32.

<sup>44</sup> Ibid., ref. 31.

<sup>45</sup> Ibid.

#### **2.3.1.1. Métodos basados en el análisis de la presión interna del cilindro.**

Este método de análisis directo sirve para analizar la presión interna de los cilindros del motor con el objetivo de estudiar el proceso de combustión que puede estar influenciado por el fenómeno del golpeteo. Este método generalmente se usa como referencia para la calibración de sensores empleados en las estrategias basadas en la detección del fenómeno del golpeteo mediante dichos instrumentos. Las curvas típicas de alta frecuencia provocadas por el fenómeno de golpeteo están relacionadas con las frecuencias de resonancia de las cámaras de combustión, las cuales se excitan por los repentinos aumentos de presión<sup>46</sup>.

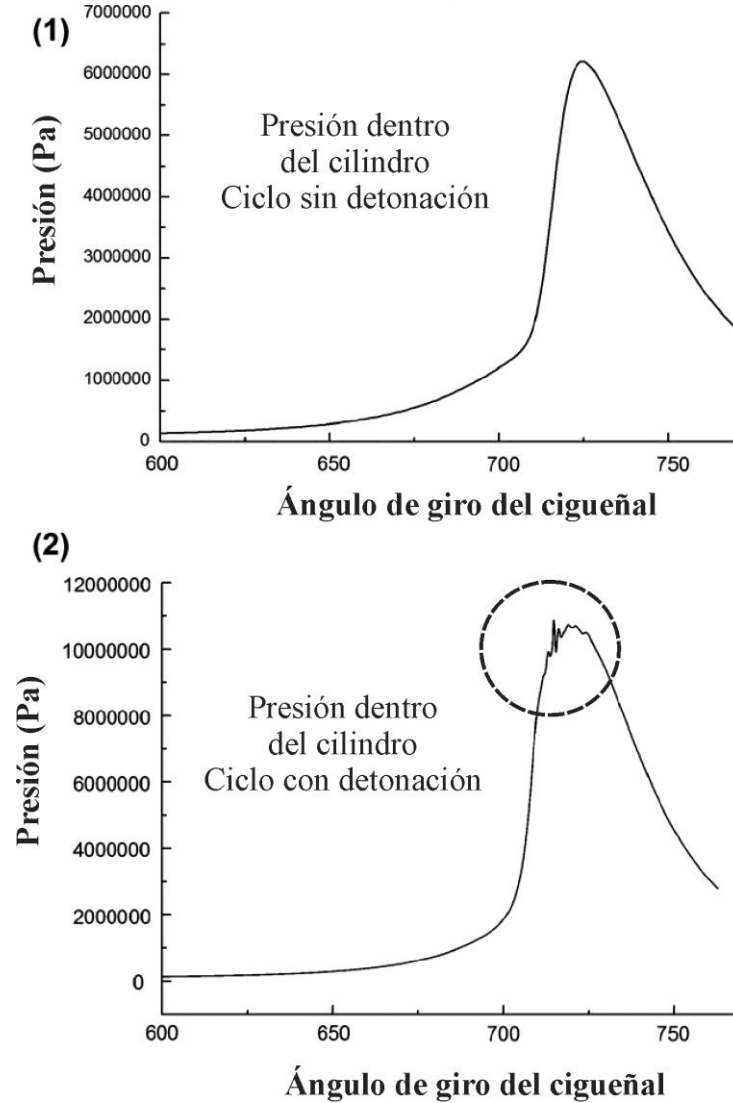
La **Figura 25** muestra que es posible observar gráficamente las perturbaciones causadas por fenómenos de detonación en un motor de combustión interna a través de la instalación de sensores de presión a lo largo de los cilindros del motor.

La aplicación de este método implica el uso de programas computacionales para realizar el procesamiento de las señales de presión. Y generalmente, la definición empleada para de la intensidad del fenómeno de golpeteo es la amplitud máxima observada sobre las señales filtradas de la presión interna de los cilindros del motor.

---

<sup>46</sup> *Ibíd.*

Figura 25. Ciclos típicos de detonación y deflagración.



Fuente: ZHEN X., WANG Y., XU S., ZHU Y., TAO C., XU T. y SONG M. The engine knock analysis – An overview<sup>47</sup>.

### 2.3.1.2. Métodos basados en el análisis de vibraciones del bloque del motor.

Este método es para determinar la ocurrencia del fenómeno de golpeteo mediante

---

<sup>47</sup>Ibíd.

la medición del nivel de vibraciones del motor. Cuando el golpeteo aparece se crearán ondas de presión dentro de las cámaras de combustión. Las ondas de presión pueden radiar sonido dentro de una frecuencia audible que excita la frecuencia de vibraciones del motor y producen la señal audible del golpeteo<sup>48</sup>.

Las frecuencias de las oscilaciones dependen en gran medida del tamaño y la forma de la cámara de combustión, los modos de resonancia y la velocidad de las ondas dentro de la cámara, la cual varía durante el proceso de combustión para diferentes condiciones de operación del motor<sup>49</sup>.

Los sensores de vibración no intrusivos (que no se instalan dentro de los cilindros del motor) poseen muchas ventajas, como la durabilidad y el bajo costo. Por tanto, con el desarrollo de sensores de vibración los métodos de detección basados en el análisis de vibraciones se convierten en los más prácticos para su uso en los motores de combustión interna<sup>50</sup>.

**2.3.1.3. Métodos basados en la temperatura del gas de emisión.** El fenómeno de golpeteo se puede detectar mediante el monitoreo de la temperatura de los gases de emisión. Se observa que hay una clara correlación entre el fenómeno de golpeteo y la temperatura de los gases de emisión. En las condiciones de combustión donde se produce el fenómeno del golpeteo se ha observado una reducción en la temperatura de los gases de emisión. Esta técnica de detección del fenómeno de golpeteo puede llegar a ser eficiente por las siguientes razones<sup>51</sup>:

---

<sup>48</sup> Ibid.

<sup>49</sup> Ibid.

<sup>50</sup> Ibid.

<sup>51</sup> Ibid.

- Porque la señal no será afectada por el ruido del motor, así que la detección puede ser más clara;
- Es más rápido y conveniente;
- Se puede aplicar en todo tipo de motores.

**2.3.1.4. Métodos basados en el análisis de radicales y especies.** Hoy en día, las emisiones de luz provocadas por las reacciones químicas generadas por el fin de gas se pueden usar para analizar las causas que provocan la auto-ignición del gas aún no consumido (quemado). Mediciones espectroscópicas y de quimio-luminiscencia permiten identificar radicales de CH, HCO, HCHO y OH como indicadores de las diferentes fases de la combustión. Por ejemplo, con la formación y concentración de HCHO se pueden detectar puntos calientes en el gas aún no quemado (end gas). Por otro lado, radicales de CH y OH pueden ser indicadores de una combustión normal. Así, mediante la base del análisis de radicales intermedios y especies es posible detectar el fenómeno de golpeteo<sup>52</sup>.

**2.3.1.5. Métodos de análisis basados en la transferencia de calor.** Es bien conocido que, cuando el golpeteo acontece, la transferencia de calor se incrementa en la cámara de combustión. Se ha encontrado que cuando la intensidad del golpeteo está por encima de 0,2 MPa éste tiene influencia sobre la transferencia de calor. Cuando la intensidad del golpeteo está por encima de los 0,6 MPa la transferencia de calor puede ser 2,5 veces mayor que el presente en un proceso de combustión normal. En general, la combustión en condiciones de golpeteo genera mucho más flujo de calor a través de la pared del cilindro que en

---

<sup>52</sup> Ibid.

condiciones de combustión normal. Esto favorece la detección del fenómeno de golpeteo mediante el análisis de transferencia de calor<sup>53</sup>.

**2.3.1.6. Formas de evitar el fenómeno de golpeteo.** Hay distintas variables que afectan el fenómeno de golpeteo en un determinado motor, como el avance de la chispa de ignición, la velocidad del motor, la relación aire/combustible, la calidad del combustible, la temperatura y la presión de entrada del aire atmosférico, entre otros factores más. El fenómeno de golpeteo es uno de los temas más debatidos y menos entendidos relacionados con el proceso de combustión en los motores de combustión interna<sup>54,55,56</sup>.

El fenómeno de golpeteo normalmente es controlado introduciendo un combustible que posea un mayor índice de metano, es decir, un combustible con mayor resistencia al fenómeno del golpeteo. El golpeteo también se puede controlar atrasando la chispa de ignición, la relación de compresión del motor o implementando un sistema de recirculación de los gases de emisión<sup>57,58,59,60,61,62</sup>.

---

<sup>53</sup> *Ibíd.*

<sup>54</sup> *Ibíd.*, ref. 34, p. 19

<sup>55</sup> HUSSAIN J., PALANIRADJA K., ALAGUMURTHI N. y MANIMARAN R., 2012, Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Performance and Emission characteristics of a Three Cylinder Direct Injection Compression Ignition Engine. Editorial Elsevier, Revista Alexandria Engineering, Vol. 51, Páginas 241–247.

<sup>56</sup> ZHEN X., WANG Y., XU S., y ZHU Y., 2013, Numerical analysis on knock for a high compression ratio spark-ignition methanol engine. Editorial Elsevier, Revista Fuel, Vol. 103, Páginas 892–898.

<sup>57</sup> CHO H. M. y HE B.-Q., 2007, Spark ignition natural gas engines — A review. Editorial Elsevier, Revista Energy Conversion and Management, Vol. 48, Páginas 608–618. Página 17

<sup>58</sup> *Ibíd.*, ref. 34, p. 19

<sup>59</sup> *Ibíd.*, ref. 61, p. 25

<sup>60</sup> *Ibíd.*, ref. 62, p. 25

<sup>61</sup> BRECQ G., BELLETTRE J., y TAZEROUT M., 2003, A new indicator for knock detection in gas SI engines. Editorial Elsevier, Revista International Journal of Thermal Sciences, Vol. 42, Páginas 523–532.

### 2.3. INDICADORES DE GESTIÓN EN MANTENIMIENTO

El objetivo del mantenimiento es conservar todos los bienes que componen los eslabones del sistema directa e indirectamente relacionados a los servicios, en las mejores condiciones de funcionamiento, con un buen nivel de confiabilidad, calidad y al menor costo posible. Una de las herramientas claves para lograr estos objetivos es la medición del desempeño para ser efectivos. Las métricas de desempeño deben darnos no sólo un panorama sobre cómo se está llevando a cabo la gestión del mantenimiento, sino que deben servir para realizar proyecciones respecto al desempeño de las operaciones de mantenimiento en el futuro<sup>63,64</sup>.

**2.4.1. Disponibilidad.** La disponibilidad de un equipo es el tiempo total durante el cual el equipo está operando satisfactoriamente, más el tiempo que estando en receso, puede trabajar sin contratiempos durante un período. El objetivo más importante del mantenimiento científico es lograr la máxima disponibilidad de todos los equipos. La disponibilidad se define como la probabilidad de que un equipo o sistema sea operable satisfactoriamente a lo largo de un periodo de tiempo dado. La disponibilidad depende de la confiabilidad y de la mantenibilidad.

---

<sup>62</sup>HUDSON C., Gao X., y STONE R., 2001, Knock measurement for fuel evaluation in spark ignition engines. Editorial Elsevier, Revista Fuel, Vol. 80, Páginas 395–407.

<sup>63</sup>TORRES, D., 2007. Mantenimiento: Su implementación y gestión. Segunda Edición. Editorial Universitat, Argentina. 339 Páginas.

<sup>64</sup>VERGEL H., 2012, Aplicación de la metodología de análisis de causa raíz (RCA) para la identificación del mar actor de las excavadoras Caterpillar 345 y 345D en la empresa Drummond Ltd. Universidad Industrial de Santander. Monografía para la obtención del grado de especialista en gerencia del mantenimiento. 86 Páginas.

Tener como objetivo una alta disponibilidad, significa reducir al máximo el número de paradas para obtener una operación exitosa, económica y rentable. En la mayoría de los casos, un mejoramiento de la confiabilidad y de la mantenibilidad, lleva asociado una mayor inversión inicial, pero resultará una mayor disponibilidad del equipo a lo largo de su vida útil y como consecuencia, un menor costo neto total del ciclo de vida<sup>65,66,67</sup>.

**2.4.2. Confiabilidad.** La confiabilidad puede ser definida como la “confianza” que se tiene de que un componente, equipo o sistema desempeñe su función básica, durante un período de tiempo preestablecido, bajo condiciones estándares de operación. Otra definición importante de confiabilidad es; probabilidad de que un ítem pueda desempeñar su función requerida durante un intervalo de tiempo establecido y bajo condiciones de uso definidas<sup>68</sup>.

**2.4.3. Mantenibilidad.** Es la probabilidad de que un equipo pueda ser puesto en condiciones operacionales en un período de tiempo dado, cuando el mantenimiento es efectuado de acuerdo con unos procedimientos preestablecidos. También es definido como la probabilidad de que un equipo que ha fallado, pueda ser reparado en un periodo de tiempo dado<sup>69,70,71</sup>.

---

<sup>65</sup> Ibid., ref. 69, p. 26

<sup>66</sup> Ibid., ref. 70, p. 26

<sup>67</sup> GRAJALEs D. H. M., SÁNCHEZ Y. O., PINZÓN M., Aplicadas M., and Mantenimiento A. L., 2006. La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. Revista Scientia et Technica de la Universidad Tecnológica de Pereira, Vol 11, Págs 155–160.

<sup>68</sup> Ibid.

<sup>69</sup> Ibid., ref. 69.

<sup>70</sup> Ibid., ref. 70.

## 2.4. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE FALLAS

Existen diferentes técnicas útiles para la resolución de problemas en las investigaciones de causa raíz. En cuanto que existen diversas metodologías similares asociadas con estas técnicas; de todas formas existen algunas diferencias<sup>72</sup>. A continuación se realizará una presentación general de los métodos o técnicas más comunes para realizar un análisis de falla basado en causa raíz<sup>73</sup>.

**2.5.1. Análisis de Modos de Falla y Efectos de Falla.** El análisis de modos de falla y efectos, también conocido por las siglas en Inglés FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) es un procedimiento de diseño-evaluación utilizado para identificar potenciales modos de falla y determinar sus respectivos efectos sobre el desempeño del sistema. Este procedimiento documenta formalmente los procedimientos y genera un historial que sirve como base para mejoras futuras. Por tanto, el procedimiento FMEA es una secuencia lógica de pasos que empieza con el análisis de los componentes, también llamados subsistemas de nivel más bajo<sup>74</sup>.

En este procedimiento de análisis se asume un punto de vista en el cual se identifican los potenciales modos de falla, junto con los respectivos mecanismos que llevan a la aparición de esas fallas. El efecto que pueda producir de cada modo de falla potencial se rastrea hasta el nivel del sistema. Luego, a cada modo de falla y su respectivo efecto sobre el sistema se le asigna una clasificación basada en la probabilidad de ocurrencia, severidad y complejidad. Por último, se

---

<sup>71</sup> Ibid., ref. 73.

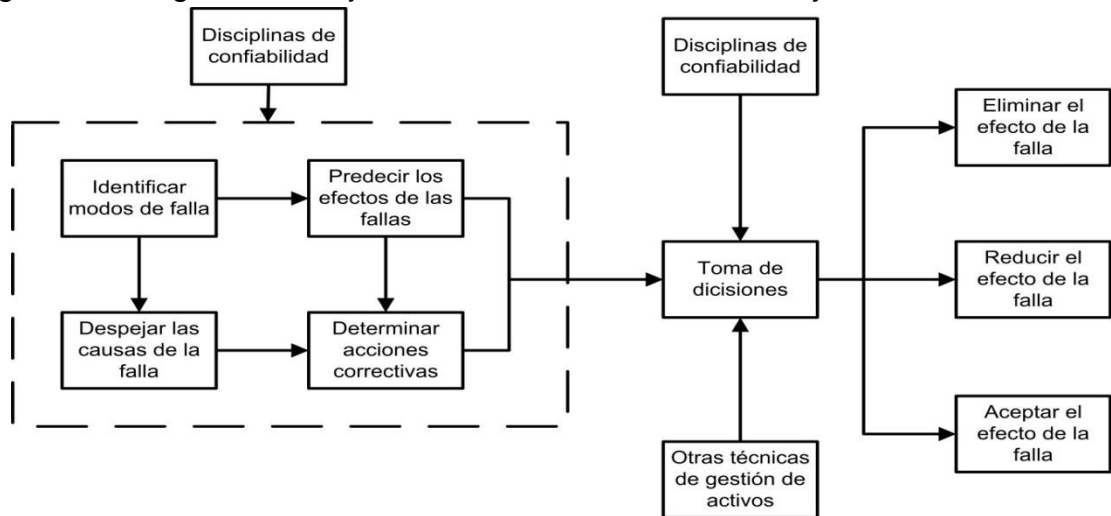
<sup>72</sup>MOBLEY K., 1999, Root cause failure analysis. Editorial Newnes. 306 Páginas.

<sup>73</sup> Ibid.

<sup>74</sup> Ibid.

recomienda diseñar las acciones pertinentes para prevenir la ocurrencia de aquellos modos y efectos de falla clasificados en el rango más alto de probabilidad de ocurrencia<sup>75</sup>.

Figura 16. Diagrama de flujo del análisis de modos de falla y efectos de falla.



Fuente: MOBLEY K. Root cause failure analysis<sup>76</sup>.

Dos grandes limitaciones restringen en el uso de FMEA. Primero, los árboles lógicos empleados para este tipo de análisis están basados en la probabilidad de falla a un nivel de componente. Segundo, un análisis FMEA completo es altamente costoso. Los árboles lógicos basados en la probabilidad de las fallas son un problema, debido a que los datos disponibles respecto al comportamiento de los componentes están enmarcados en unas condiciones específicas *standard*, y frente a esto no se pueden aplicar técnicas de extrapolación para predecir el comportamiento de los componentes en condiciones diferentes a las condiciones *standard*<sup>77</sup>

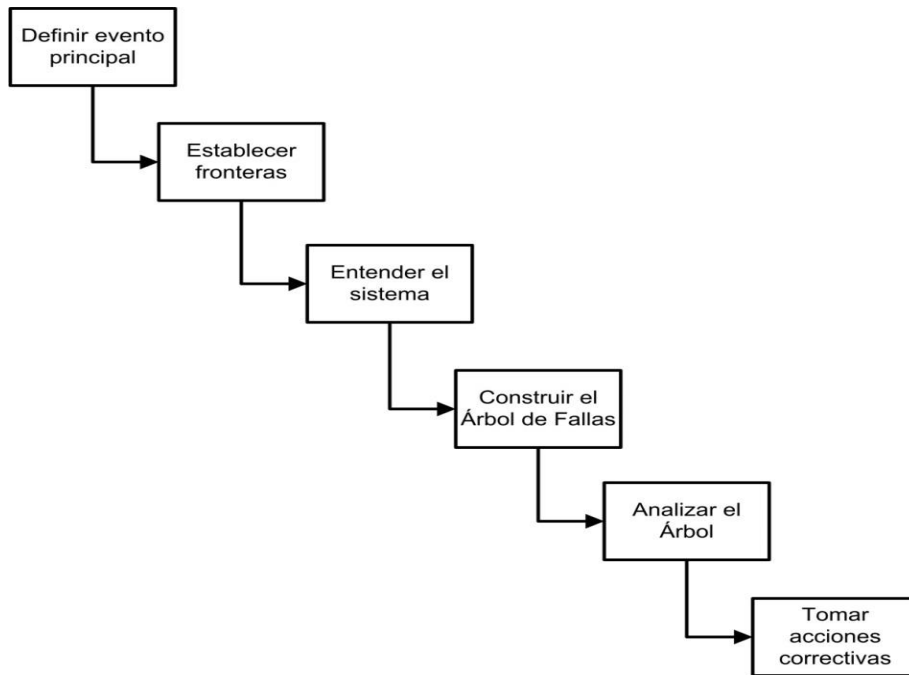
<sup>75</sup> Ibid.

<sup>76</sup> Ibid.

<sup>77</sup> Ibid.

**2.5.2. Análisis del Árbol de Fallos.** El análisis del Árbol de Fallos es un método para analizar la seguridad y confiabilidad de un sistema. El método proporciona una base objetiva para el análisis del diseño del sistema, justificando cambios en el sistema; desempeñando estudios de compensación, analizando modos de fallas frecuentes y demostrando conformidades entre seguridad y requerimientos del entorno. Este método se diferencia del FMEA en que el método se restringe a identificar los elementos del sistema y los eventos que llevan a un evento particular indeseado<sup>78</sup>

Figura 37. Proceso típico de un Árbol de Fallas.



Fuente: MOBLEY K. Root cause failure analysis<sup>79</sup>

---

<sup>78</sup> Ibid.

<sup>79</sup> Ibid.

Varias técnicas de confiabilidad son inductivas y enfocadas principalmente a garantizar que los componentes cumplan con las funciones para las cuales fueron diseñadas. El análisis del Árbol de Fallos es análisis detalladamente deductivo que generalmente requiere considerable información sobre el sistema. Eso garantiza que todos los aspectos críticos del sistema son identificados y controlados. Este método representa gráficamente la lógica booleana asociada a un sistema particular de falla, llamado de evento principal, y fallas básicas o causas, llamadas de eventos primarios. Los eventos principales pueden ser amplios, como fallas que abarcan todo el sistema o fallas en componentes específicos<sup>80</sup>.

El análisis de Árbol de Fallos proporciona alternativas para desempeñar un análisis cuantitativo y cualitativo de la confiabilidad del sistema. Esto le ayuda al analista a entender de forma deductiva el sistema de fallas y señalar aquellos aspectos del sistema que son importantes respecto a la falla de interés. El análisis proporciona información respecto al funcionamiento del sistema<sup>81</sup>.

El Árbol de Fallas modela gráficamente y presenta de forma lógica varias combinaciones de eventos posibles en un sistema, que puedan llevar al evento principal. El término “evento” denota la dinámica de cambio de estado que se produce en un elemento del sistema, el cual puede ser algún componente físico, programa de cómputo, seres humanos y componentes ambientales. Un evento de falla es un estado anormal del sistema; mientras que un evento normal es aquel evento que se espera que ocurra<sup>82</sup>.

---

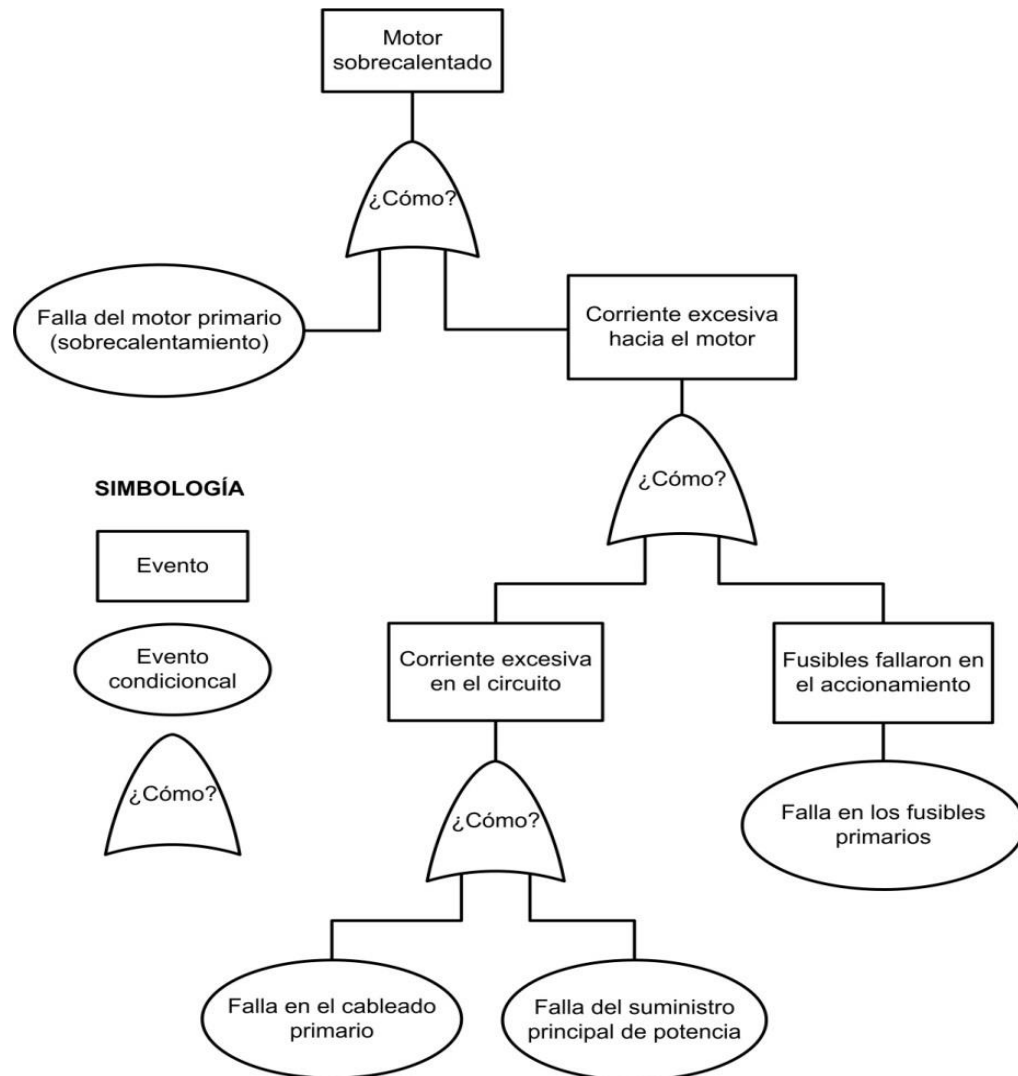
<sup>80</sup> *Ibíd.*

<sup>81</sup> *Ibíd.*

<sup>82</sup> *Ibíd.*

La estructura de un Árbol de Fallas se muestra en la **Figura 8**. El evento indeseado aparece en la cima como evento principal y se relaciona con más eventos de falla por medio de declaraciones de fallas y funciones lógicas<sup>83</sup>.

Figura 18. Ejemplo de Árbol de Fallas.

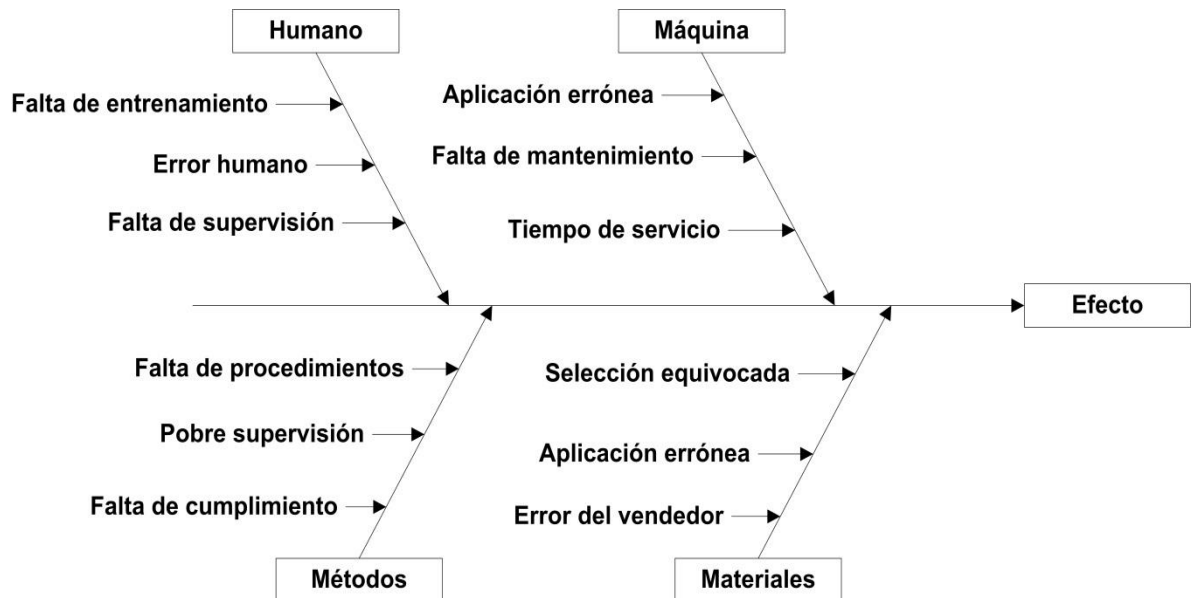


Fuente: MOBLEY K. Root cause failure analysis<sup>84</sup>.

<sup>83</sup> Ibíd.

**2.5.3. Análisis de Causa Raíz.** El análisis de causa y efecto es un enfoque gráfico al análisis de fallas. También es conocido como análisis de espina de pescado, el cual se deriva de la forma en que se grafican las relaciones entre los factores que influyen en un evento específico. Usualmente, en el análisis de espina de pescado se grafican cuatro clasificaciones de causas potenciales (por ejemplo: humano, máquina, material y método) pero puede incluir cualquier combinación de categorías<sup>85</sup>. Un ejemplo de este tipo de gráfico de muestra en la **Figura .**

Figura 19. Diagrama Espina de Pescado.



Fuente: MOBLEY K., 1999, Root cause failure analysis<sup>86</sup>.

<sup>84</sup> Ibid.

<sup>85</sup> Ibid.

<sup>86</sup> Ibid.

Como en la mayoría de los métodos de análisis de fallas, este abordaje se basa en una evaluación lógica de acciones o cambios que llevan a un evento específico, como las fallas en maquinaria. La única diferencia entre este abordaje y otros métodos es el uso de un gráfico con forma de espina de pescado que relaciona entre sí las acciones específicas o cambios y el evento resultante<sup>87</sup>.

Este abordaje tiene una seria limitación. El gráfico no proporciona una secuencia clara de los eventos que llevan a la falla. Sin embargo, en el gráfico de espina de pescado se visualizan las posibles causas que pueden contribuir a generar el evento. Mientras que esto es útil, en el gráfico no se aíslan los factores específicos que causan el evento. Otros abordajes proveen las condiciones para despejar los cambios específicos, omisiones o acciones que causan las fallas, accidentes u otros eventos por investigar<sup>88</sup>.

**2.5.4. Análisis de Secuencia de Eventos.** Cierta número de programas computacionales se pueden usar para generar los diagramas de análisis de secuencia de eventos, por ejemplo *Microsoft Visio*. Como parte del programa de análisis de fallas basado en causa raíz, hay que seleccionar el software más adecuado, desarrollar un formato en el cual se defina el significado de los símbolos empleados, como se muestra en el **Cuadro 1**, y asegurarse de incluir en el diagrama cada uno de los eventos que están siendo investigados<sup>89</sup>.

El uso de un software desde el comienzo de una investigación ayuda al investigador a organizar la información recolectada, identificar información faltante

---

<sup>87</sup> *Ibíd.*

<sup>88</sup> *Ibíd.*

<sup>89</sup> *Ibíd.*

o conflictiva, incrementar su comprensión a través del relacionamiento de los eventos y los incidentes, y vislumbrar las causas potenciales de las fallas<sup>90</sup>.

El diagrama de secuencia de eventos debe ser un documento dinámico, generado poco después de haberse reportado el problema y que debe modificarse continuamente hasta que la falla o evento indeseado se resuelva completamente. La **Figura** es un ejemplo de ese tipo de diagramas<sup>91</sup>.

El uso apropiado de este tipo de diagramas incrementa la precisión de los diagnósticos de los problemas y la efectividad del equipo encargado de resolver las fallas. Para obtener el máximo beneficio de esta técnica, se debe ser consistente, meticoloso en la elaboración del diagrama y seguir las siguientes directrices<sup>92</sup>.

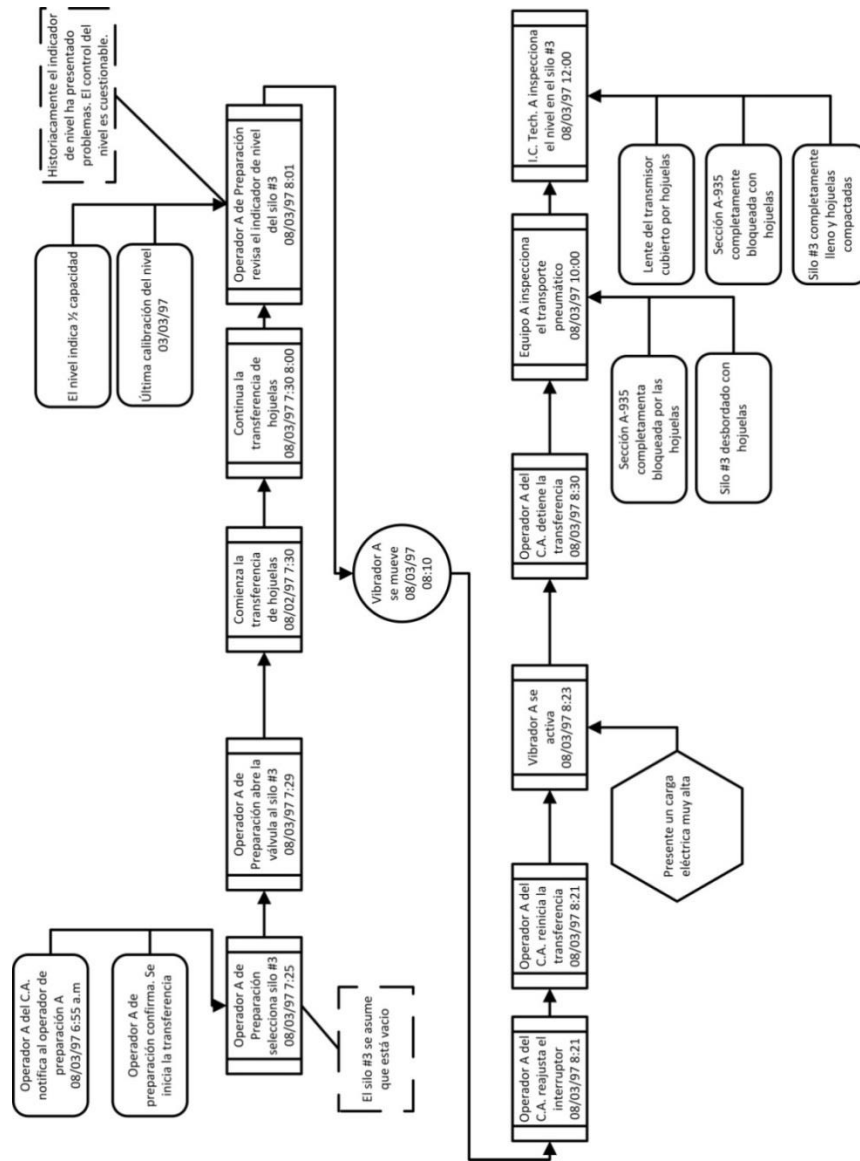
---

<sup>90</sup> *Ibid.*

<sup>91</sup> *Ibid.*

<sup>92</sup> *Ibid.*

Figura 20. Diagrama típico de secuencia de eventos.



Fuente: MOBLEY K. Root cause failure analysis<sup>93</sup>.

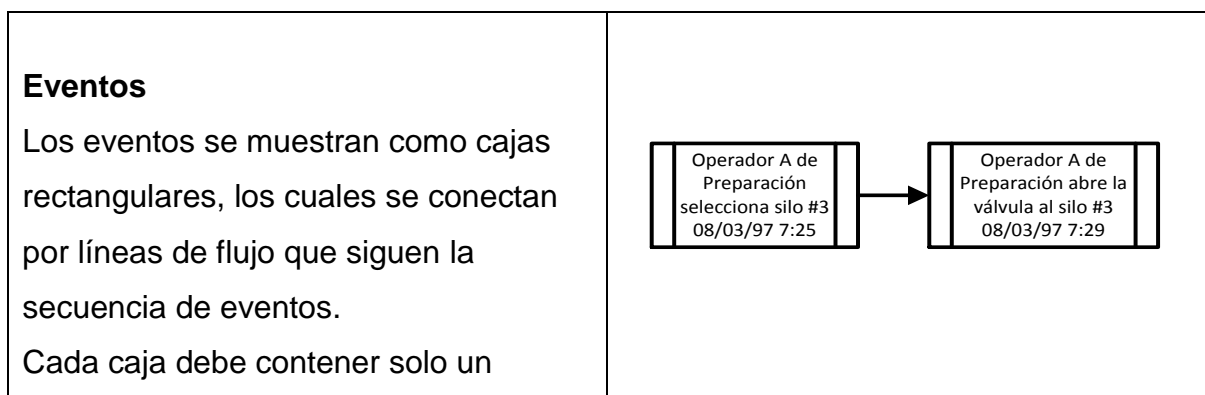
**Orden lógico:** Muestre los eventos en un orden lógico desde el principio hasta el final. Al comienzo el diagrama de secuencia de eventos debe incluir todos los eventos pertinentes, incluyendo aquellos que no se pueden confirmar. En la

93 Ibíd.

medida que la investigación progrese, se debe refinar el diagrama para solo muestre aquellos eventos que se confirmaron como relevantes respecto a la falla o evento indeseado<sup>94</sup>.

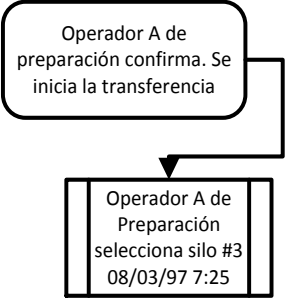
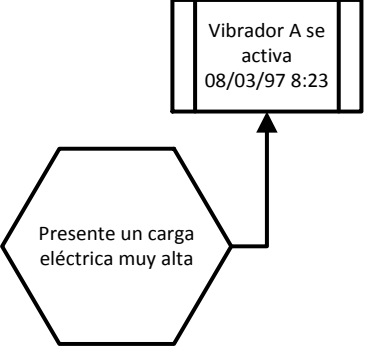
**Descripciones activas:** En el diagrama de secuencia de eventos, las cajas de eventos deben contener acciones en vez de descripciones pasivas del problema. Por ejemplo, un evento debe decir: “Operador A oprime botón de encendido de la bomba” y no “Se encendió la bomba equivocada”. Como regla general, en cada caja de eventos solo debe estar un sujeto y un verbo. En vez de colocar “Operador A oprime el botón de parada de la bomba y verifica la válvula” se deben hacer dos cajas de evento. La primera caja debe decir “Operador A oprime el botón de parada de la bomba” y la segunda caja debe decir “Operador A verifica la válvula”. Se recomienda no usar nombres en el diagrama; en vez de eso, mejor usar las funciones del cargo o asignar un código para cada persona involucrada en los eventos o fallas. Por ejemplo, para tres operadores se deben asignar los nombres Operador A, Operador B y Operador C<sup>95</sup>.

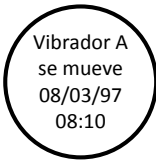
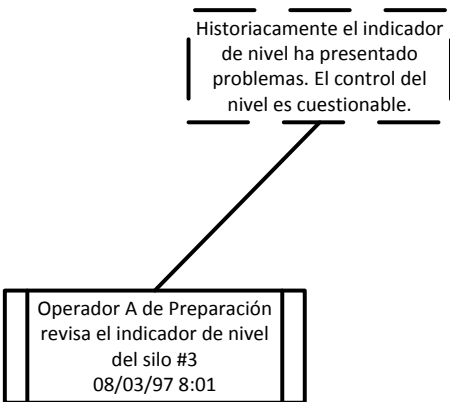
Cuadro 1. Símbolos empleados en el diagrama de análisis de eventos.



<sup>94</sup> Ibid.

<sup>95</sup> Ibid.

<p>evento, la fecha y el tiempo en que ocurrió.</p>	
<p><b>Calificadores</b></p> <p>Cada evento de debe aclarar mediante el uso de bloques ovalados los cuales proveen información pertinente sobre el evento.</p> <p>Cada ovalo debe contener solamente un calificador que provee alguna aclaración, restricción u otra condición que pueda influenciar el evento.</p>	
<p><b>Funciones de fuerza mayor</b></p> <p>Los factores que puedan haber contribuido al evento deben mostrarse como una caja de forma hexagonal.</p> <p>Cada caja hexagonal debe contener solo una función de fuerza mayor definida de forma concisa.</p> <p>Las funciones de fuerza mayor deben estar conectadas a un evento específico usando líneas de dirección que confirme su asociación con el evento.</p>	

<p><b>Incidente</b></p> <p>Las cajas de incidente contienen una breve declaración de la razón por la cual se está realizando la investigación.</p> <p>Las cajas incidente se deben insertar en el lugar apropiado dentro de la secuencia de eventos y deben estar conectados a las cajas de eventos usando líneas de dirección.</p> <p>Debe haber solo una caja de incidente incluida en cada investigación.</p>	
<p><b>Suposiciones</b></p> <p>Las condiciones o factores de contribución no confirmadas se pueden incluir en el diagrama mediante anotaciones. Este método permite incluir múltiples suposiciones o cuestiones aun no respondidas que pueden ayudar a la aclaración de un evento.</p>	

Fuente: MOBLEy K. Root cause failure analysis<sup>96</sup>.

<sup>96</sup> Ibid.

**Precisión:** Describa cada evento, factor de fuerza mayor y cada clarificador de forma precisa y concisa. Si no es posible realizar una descripción de forma concisa y se deben emplear suposiciones para clarificar, entonces habrá que incluir las descripciones en forma de anotaciones. Mientras la investigación progresa, cada suposición y colaborador no confirmado del evento se debe confirmar o discontinuar. Como resultado, cada evento, clarificador y factor de fuerza mayor se reducirán a una descripción más concisa<sup>97</sup>.

**Definir eventos y factores de fuerza mayor:** Se deben incluir en el diagrama de secuencia de eventos todas las clarificaciones que proporcionen un mejor entendimiento de los antecedentes o soportar la información necesaria para definir acertadamente los eventos y factores de fuerza mayor. Por ejemplo, cada evento debe incluir la fecha y la hora, lo cual permite especificar mejor el orden de la secuencia de los eventos<sup>98</sup>.

Cuando no resulta posible confirmar la veracidad de alguna clarificación, se deben emplear suposiciones que hayan contribuido a los eventos. Sin embargo, a lo largo de la investigación se debe realizar el esfuerzo para eliminar estas suposiciones y reemplazarlas por hechos confirmados en el diagrama de secuencia de eventos<sup>99</sup>.

## **2.5. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (RCFA).**

La metodología de análisis de causa raíz, también conocida por las siglas en Inglés RCFA (Root Cause Failure Analysis Methodology), es una secuencia lógica

---

<sup>97</sup> Ibid.

<sup>98</sup> Ibid.

<sup>99</sup> Ibid.

de pasos que le permite al investigador despejar los hechos que rodean las fallas. Adicional a esto, una vez que el problema ha sido enteramente definido, el análisis de causa raíz determina, de forma sistemática, el mejor curso de acción que resolverá el problema, además de asegurar de que no se repetirá<sup>100</sup>.

El primer paso necesario en la aplicación de esta metodología de análisis es la obtención de una definición clara de la falla, problema potencial o evento indeseado luego de su notificación. Una vez hecha la notificación sobre la existencia de una falla, para efectuar su definición se recomienda seguir las etapas que se muestran en el diagrama de flujo de la **Figura** <sup>101</sup>.

Como sigue, estas son las etapas representativas que componen el la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz<sup>102</sup>.

1. Reporte de la falla
2. Clasificación de la falla
3. Obtención de información
4. Revisión del diseño
5. Revisión de la aplicación y del mantenimiento
6. Observaciones y mediciones
7. Determinar la causa raíz
8. Análisis de costo-beneficio

---

<sup>100</sup> *Ibíd.*

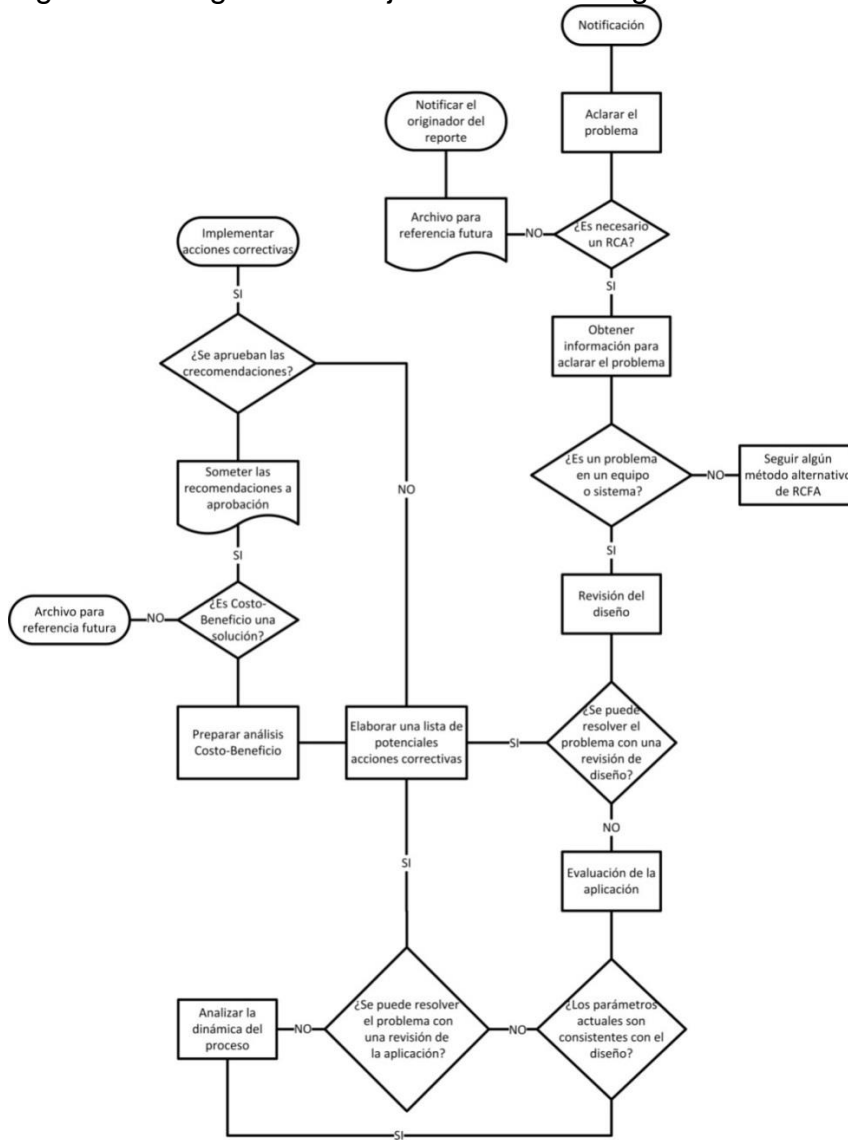
<sup>101</sup> *Ibíd.*

<sup>102</sup> *Ibíd.*

9. Reporte y recomendaciones

10. Verificar la acción correctiva

Figura 21. Diagrama de flujo de la metodología de análisis de causa raíz.



Fuente: MOBLEY K. Root cause failure analysis<sup>103</sup>.

<sup>103</sup> Ibíd.

**2.6.1. Reporte de la falla.** Por tanto, el primer paso es la notificación inicial de que ha ocurrido alguna falla o incidente. Generalmente, este reporte será verbal, escrito o una notación en la bitácora de producción. En la mayoría de los casos, el comunicado no contendrá una descripción completa del problema y más bien será una descripción breve de los síntomas observados por la persona que hace el reporte<sup>104</sup>.

Un factor que limita severamente la efectividad del análisis de falla es la ausencia de un formato estandarizado para el reporte de fallas. El uso de un formato que ayuda a delimitar el problema potencial o evento indeseado, reduce ampliamente el esfuerzo requerido para completar el análisis de falla<sup>105</sup>.

**2.6.2. Clasificación de la falla.** Una vez que la falla o incidente se ha reportado, el siguiente paso es identificar y clasificar el tipo de problema. La clasificación más común para los tipos de problemas son los siguientes: daño o falla en el equipo, desempeño de la operación, desempeño económico, seguridad, cumplimiento de normas<sup>106</sup>.

Clasificar el evento como un tipo de problema específico le permite al analista determinar el mejor método para resolver el problema. Cada tipo de problema requiere un enfoque de análisis de falla ligeramente diferente<sup>107</sup>.

Hay que tener en cuenta que la clasificación inicial del tipo de falla generalmente es la parte más difícil del análisis de falla. Muchas plantas carecen de un sistema

---

104 *Ibíd.*

105 *Ibíd.*

106 *Ibíd.*

107 *Ibíd.*

de seguimiento y de reporte que detecte y defina con precisión las variaciones de las condiciones de operación<sup>108</sup>.

La clasificación que usualmente garantiza la aplicación de un análisis de causa raíz está asociada con la falla crítica en un equipo de producción, maquinaria o sistema. Generalmente, cada incidente que resulta en la falla total o parcial de una máquina o proceso del sistema garantiza la aplicación de un análisis de causa raíz. Este tipo de incidentes pueden tener un impacto muy negativo en el desempeño de la planta, por tanto, usualmente se justifica el esfuerzo para analizar por completo el evento y determinar la causa raíz<sup>109</sup>.

Los eventos que resultan en un daño físico a un equipo de la planta o sistema son los más fáciles de clasificar. Usualmente, una inspección visual de la máquina o sistema no provee una clara evidencia de su modo de falla<sup>110</sup>.

**2.6.3. Obtención de información.** La etapa de obtención de información debe aclarar el reporte del evento indeseado o problema. Esta fase del RCFA incluye entrevistas al personal, recolección de evidencia física y elaborar el análisis de la secuencia de eventos, el cual es necesario para proporcionar un claro entendimiento del problema<sup>111</sup>.

El proceso de entrevistas es el primer método utilizado para establecer las condiciones de frontera del incidente y es una clave importante para cualquier

---

<sup>108</sup> *Ibíd.*

<sup>109</sup> *Ibíd.*

<sup>110</sup> *Ibíd.*

<sup>111</sup> *Ibíd.*

investigación. Es crucial que el investigador sea buen escuchador y buen entrevistador con habilidades diplomáticas<sup>112</sup>.

Para incidentes significativos, se deben entrevistar el personal clave para obtener una vista completa del evento, además de todos aquellos involucrados con el evento o incidente y aquellos que tienen conocimiento directo o indirecto que puedan ayudar a clarificar el evento. La siguiente es una lista parcial de los que deberían ser entrevistados<sup>113</sup>:

- Todo el personal relacionado directamente con el incidente.
- Supervisores y gerentes de aquellos relacionados con el incidente. Se incluye a los gerentes contratistas.
- Personal que no está relacionado directamente con el incidente, pero que poseen experiencia.
- Técnicos expertos, personal en entrenamiento, proveedores y fabricantes de equipos.

También es necesario verificar la información derivada de las entrevistas. Una forma es la verificación visual de las prácticas utilizadas por los encargados de producción y de mantenimiento que se desempeñan en el área que está siendo investigada<sup>114</sup>.

Las entrevistas de grupo son ventajosas en ciertas instancias. Este tipo de reunión o ejercicio en grupo para la resolución de problemas es muy útil para conseguir un intercambio de ideas de personas con diferentes especialidades (mantenimiento,

---

<sup>112</sup> *Ibíd.*

<sup>113</sup> *Ibíd.*

<sup>114</sup> *Ibíd.*

producción, ingeniería, etc). Tal intercambio puede ayudar a resolver el evento indeseado o problema<sup>115</sup>.

**2.6.4. Revisión del diseño.** Es esencial entender claramente los parámetros de diseño y las especificaciones de los sistemas asociados con la falla de un equipo o sistema. A menos que el investigador sepa claramente para qué fue diseñada la máquina o sistema de producción, además de sus limitaciones, sería imposible filtrar la causa del problema o evento indeseado en el equipo o sistema que se esté investigando. La información que se obtiene en la revisión del diseño proporciona una línea de referencia útil para investigar y resolver enteramente los problemas existentes en los equipos de una planta<sup>116</sup>.

El objetivo de la revisión del diseño es establecer las características operativas específicas de las máquinas o sistemas de producción relacionadas con los eventos indeseados. La evaluación debe definir claramente la función o funciones específicas para las cuales fueron diseñados los sistemas o máquinas. Además, la revisión debe establecer el rango de operación aceptable que la máquina o sistema puede tolerar sin presentarse desvíos aparentes en su desempeño<sup>117</sup>.

**2.6.5. Revisión de la aplicación y del mantenimiento.** El siguiente paso en el análisis de fallas es la revisión de la aplicación con el objetivo de asegurarse de que la máquina o sistema se está utilizando para la aplicación correcta. La

---

<sup>115</sup> *Ibíd.*

<sup>116</sup> *Ibíd.*

<sup>117</sup> *Ibíd.*

información obtenida durante la revisión del diseño debe ser empleada para verificar la correcta aplicación de los equipos<sup>118</sup>.

En plantas o empresas donde son producidos múltiples bienes por las máquinas o sistemas que están siendo investigadas, es esencial que se analice el rango de aplicación completo de esas máquinas o sistemas. El análisis debe incluir el estudio de todas las variaciones de operación en todo el rango de productos que se fabrican. La razón para esto es que los problemas que se estén investigando pueden estar directamente relacionados a una o más de las configuraciones de los equipos en la fabricación de los productos. Si no se analiza el espectro completo de operaciones existe el riesgo potencial de pasar por alto la causa raíz de las fallas o eventos indeseados<sup>119</sup>.

Entre los factores que habitualmente se evalúan en una revisión de la aplicación y del mantenimiento son: la instalación, el rango de operaciones, las prácticas y procedimientos de operación, el historial de mantenimiento y los procedimientos de mantenimiento<sup>120</sup>.

**2.6.6. Observaciones y mediciones.** Si la revisión de la aplicación y del mantenimiento no fue conclusiva, será necesario un análisis adicional que consistirá en la cuantificación de las desviaciones de las prácticas de mantenimiento y operación respecto a lo considerado aceptable<sup>121</sup>.

---

<sup>118</sup> *Ibíd.*

<sup>119</sup> *Ibíd.*

<sup>120</sup> *Ibíd.*

<sup>121</sup> *Ibíd.*

Después de establecer las potenciales desviaciones en las condiciones de operación que pueden contribuir con las fallas en los equipos, el próximo paso es verificar que estos factores sean contribuyentes reales. El mejor método de confirmación es la medición de los parámetros de funcionamiento de las máquinas o sistemas de producción asociados a las fallas<sup>122</sup>.

La evaluación de cualquier evento o incidente que resultó en la falla parcial o total de una máquina, componente o sistema debe incluir un análisis exhaustivo de las piezas o componentes defectuosos. El método de análisis dependerá del modo de falla y del tipo de máquina o componente defectuoso<sup>123</sup>.

En la mayoría de los casos, los componentes defectuosos deben ser reemplazados inmediatamente para minimizar el impacto sobre la producción. Si este es el caso, será beneficioso un análisis del sistema relacionado con el incidente. Si el análisis se realiza poco tiempo después de haber hecho el reemplazo de la máquina o de los componentes defectuosos, habrá evidencia residual que ayudará a la investigación. Esto es especialmente cierto en aquellos casos donde las variaciones en los parámetros de operación, como las variaciones del producto y las prácticas operacionales, contribuyen a la aparición de fallas<sup>124</sup>.

Muchos tipos de seguimientos y mediciones se pueden llevar a cabo, pero los más efectivos incluyen mediciones de vibraciones, cuantificación de los parámetros del proceso e inspecciones visuales. El análisis de vibraciones, junto con la recopilación de datos de las variables del proceso, proporciona el medio más eficaz para determinar los efectos de tales variaciones del proceso. Un completo análisis multicanal de los equipos y sus sistemas proporcionan la información

---

<sup>122</sup> *Ibíd.*

<sup>123</sup> *Ibíd.*

<sup>124</sup> *Ibíd.*

necesaria para evaluar alguna contribución potencial a la falla de los equipos y sus sistemas<sup>125</sup>.

**2.6.7. Determinación de la causa raíz.** En este punto de la investigación, las etapas anteriores, como los diagramas de secuencia de eventos y árboles lógicos debieron haber identificado las funciones de fuerza mayor que pudieron haber contribuido al problema. Esta información debería haber proporcionado al investigador el conocimiento suficiente para elaborar una lista de las razones potenciales o probables que contribuyeron a la falla<sup>126</sup>.

Un método que se puede usar para analizar los factores potenciales que pudieron causar o contribuir a la falla, es el análisis de causa y efecto. La representación gráfica de las variables o factores identificados por el investigador usando el diagrama de espina de pescado proporciona un medio para evaluar las potenciales causas o causa raíz<sup>127</sup>.

La ventaja del diagrama de espina de pescado es que fuerza al investigador a agrupar de forma lógica cada uno de los factores identificados durante la investigación. Este proceso puede automáticamente ayudar a eliminar algunos factores y descubrir otros asuntos que deben ser atendidos. Una vez que todos los factores identificados han sido graficados, el investigador o el equipo de investigación puede analizar cada uno sistemáticamente<sup>128</sup>.

---

<sup>125</sup> *Ibíd.*

<sup>126</sup> *Ibíd.*

<sup>127</sup> *Ibíd.*

<sup>128</sup> *Ibíd.*

**2.6.8. Evaluación de las potenciales acciones correctivas.** El proceso RCFA define una o más acciones correctivas potenciales que podrían resolver el problema o falla bajo investigación. El próximo paso en el análisis es determinar cuál de las acciones correctivas debe ser implementada. Estas acciones pueden incluir un amplio rango de posibilidades, desde hacer nada hasta reemplazo de la máquina o sistema. Generalmente, es empleado un árbol lógico de decisión para visualizar todas las potenciales acciones correctivas<sup>129</sup>.

No todas las acciones se pueden justificar financieramente. En algunos casos, el impacto de la falla o evento es menor que el costo de una acción correctiva. En este caso, el RCFA debe documentar el incidente para una referencia futura y comentar que no fue implementada alguna acción correctiva<sup>130</sup>.

**2.6.9. Análisis de costo-beneficio.** Un completo análisis de costo-beneficio es el paso final anterior a la recomendación del curso de acción a tomar. Es necesario comparar costos con los beneficios derivados de las acciones correctivas que están siendo consideradas. Por ejemplo, diversas fallas en maquinaria son el directo resultado de una incorrecta aplicación de las máquinas. En estas circunstancias la mejor solución será el reemplazo de la máquina por otra diseñada específicamente para la aplicación, sin embargo, esta solución generalmente es muy costosa y debe requerir de la modificación de la instalación del sistema<sup>131</sup>.

Un análisis de costo beneficio es simplemente la comparación del costo actual asociado con la actividad de mantenimiento con los beneficios derivados de las

---

<sup>129</sup> *Ibíd.*

<sup>130</sup> *Ibíd.*

<sup>131</sup> *Ibíd.*

acciones de mantenimiento. La cantidad de datos históricos disponibles determina el nivel de detalle del análisis. Sí hay suficiente información disponible, el análisis puede incluir todos los costos asociados con el área, la máquina o el sistema siendo investigado<sup>132</sup>.

Si bien esto puede parecer sencillo, elaborar un preciso análisis de costo-beneficio algunas veces es muy difícil. En parte, esto se debe a la falta de datos históricos detallados para las diversas máquinas y sistemas de producción dentro de una empresa. Como resultado, tanto los datos sobre costos, como el consumo de energía, costos de reparación e intervalos de reparación no están disponibles para el investigador. Sin esta información, es casi imposible definir enteramente el costo de producción actual o histórica del sistema de producción<sup>133</sup>.

El análisis debe incluir el efecto del problema “aguas abajo” en la planta de producción. Desde que todas las plantas están integradas en cierto grado. El problema en un área de la planta generalmente tiene un impacto directo en todas las áreas de la planta<sup>134</sup>.

**2.6.10. Reporte y recomendaciones.** La siguiente tarea requerida en el RCFA es el reporte que incluye la descripción completa del incidente o evento, identificación de las causas específicas y las recomendaciones para su corrección. El reporte debe incluir la siguiente información<sup>135</sup>:

- Resumen del incidente.

---

<sup>132</sup> *Ibíd.*

<sup>133</sup> *Ibíd.*

<sup>134</sup> *Ibíd.*

<sup>135</sup> *Ibíd.*

- Condiciones iniciales de la planta.
- Evento desencadenador.
- Descripción del incidente.
- Acciones correctivas inmediatas.
- Causas y acciones correctivas a largo plazo.
- Reportes externos diligenciados.
- Lecciones aprendidas.
- Referencias y anexos.
- Descripción del investigador o equipo investigador.
- Revisión y aprobación del equipo investigador.
- Lista de distribución.

**2.6.11. Verificar las acciones correctivas.** Una vez que la acción correctiva ha sido implementada, la tarea final necesaria para un RCFA robusto es verificar que la acción correctiva realmente solucionó el problema. Después de que la acción correctiva se haya implementado, una serie de exámenes de confirmación se deben conducir para asegurar una operación fiable del equipo o de la aplicación corregida<sup>136</sup>.

---

<sup>136</sup> *Ibíd.*

Para la maquinaria más común de una planta, un análisis de vibraciones multicanal en tiempo real debe confirmar la acción correctiva. Una serie de mediciones de vibraciones se pueden realizar e implementar para medir la dinámica operativa de la instalación nueva o la instalación modificada. Una serie de mediciones puede incluir el rango completo de las condiciones operativas del sistema, incluyendo cualquier cambio en las prácticas operativas que formen parte de las acciones correctivas recomendadas. Los resultados de esta serie de exámenes confirmarán la validez de las correcciones y proporcionarán la seguridad de que la operación del sistema modificado es fiable<sup>137</sup>.

---

<sup>137</sup> *Ibíd.*

### 3. APLICACIÓN DEL RCA EN ECOPETROL S. A.

Si bien cada empresa define sus propios delineamientos respecto a la forma de realizar sus investigaciones para la corrección y prevención de fallas, ECOPETROL tiene definido toda una serie e instructivos para la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz., además de instructivos y manuales para la identificación, jerarquización, seguimiento y eliminación de malos actores. Todas estas normativas están referencias de la siguiente manera<sup>138</sup>:

- ECP-ICP-GCM-M-001 Manual para la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz para la solución de problemas.
- ECP-ICP-GCM-I-001 Instructivo para la identificación y jerarquización de malos actores.
- ECP-ICP-GCM-I-002 Instructivo de aplicación de la metodología ACR para la eliminación de malos actores.
- ECP-ICP-GCM-I-003 Instructivo de seguimiento a la eliminación de malos actores.
- SOC-I-316 Instructivo para el desarrollo de análisis de causa raíz. Superintendencia de operaciones central.
- Formato para ejecución de reportes de falla.
- Formato para ejecución de análisis de causa raíz.

---

<sup>138</sup> *Ibíd.*, ref. 11

El instructivo para el desarrollo de análisis de causa raíz en la Superintendencia de operaciones del Rio especifica detalladamente las responsabilidades de ejecución y validación para cada una de las actividades alineadas a la metodología Unificada de Ecopetrol S. A<sup>139</sup>.

Según la **Figura** , donde se presentan los pasos a seguir para el atendimento de fallas en la Superintendencia de Operaciones del Rio, una vez que acontece un evento de falla, los profesionales de mantenimiento de Ecopetrol S. A. y los ingenieros de confiabilidad son los responsables de la selección adecuada de la técnica de análisis de causa raíz con base en ciertos criterios establecidos por Ecopetrol y consignados en una matriz de riesgos.

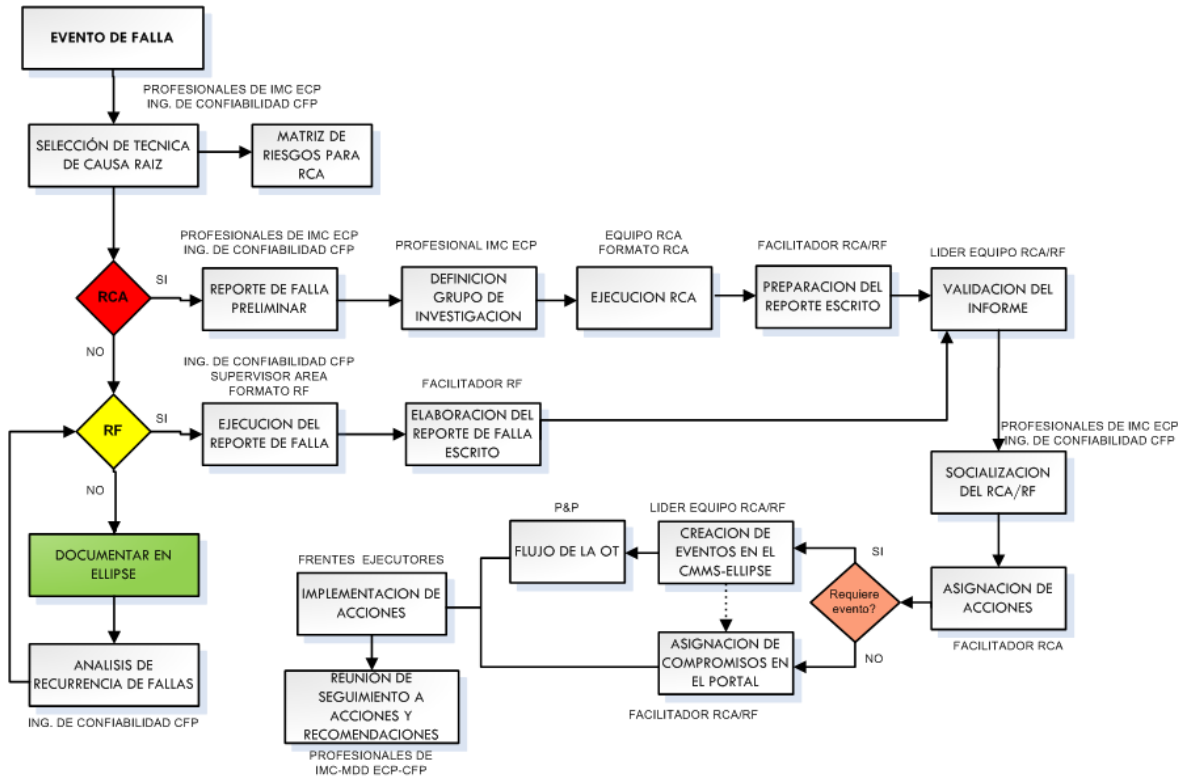
Esta matriz de riesgos para RCA (**Figura** ), está dividida en dos grandes partes: El tipo de consecuencia y la frecuencia de ocurrencia. Dependiendo de estos dos criterios, los ingenieros de confiabilidad y mantenimiento toman la decisión sobre aplicar un RCA, realizar un reporte de falla o reparar y realizar la documentación respectiva en el sistema Ellipse.

En la matriz de riesgos, en el grupo de las consecuencias existe una clasificación de 5 tipos de afectaciones, cada una de las cuales con cinco niveles de severidad. Entre estos efectos están los concernientes a la seguridad industrial, efectos sobre el medio ambiente, efectos sobre la producción y efectos sobre los costos de reparación. Por otro lado, en el grupo compuesto por las frecuencias de ocurrencia, se clasifican las eventualidades en aquellas que poseen una frecuencia de una vez cada tres años, una vez cada dos años y una vez por año.

---

<sup>139</sup> *Ibíd.*

Figura 22. Diagrama de Flujo RCA para la Superintendencia del Operaciones del Rio.



Fuente: GUERRERO R. Instructivo para el desarrollo de análisis de causa raíz, Superintendencia de operaciones del Rio<sup>140</sup>.

Conforme muestra la **Figura** , aquellas fallas que atenten contra la seguridad, pérdidas importantes en la producción o costos elevados de mantenimiento, ameritan ser sometidas a un proceso de análisis de causa raíz de forma inmediata. Y cuando las consecuencias suponen efectos tolerables, en términos de producción y costos, entonces se realiza un reporte de falla o simplemente se realiza la correspondiente acción correctiva.

En el caso que la falla amerite la aplicación de un análisis de causa raíz, los ingenieros de mantenimiento y confiabilidad deberán realizar un informe preliminar

<sup>140</sup> *Ibíd.*, ref. 11.

de la falla y organizar un grupo de investigación que será el encargado de trabajar en equipo para desarrollar el análisis de causa raíz. Según el instructivo para la aplicación de la metodología RCA, el análisis deberá realizarse a más tardar entre los 15 días siguientes al evento de la falla y además se deberá disponer de apenas 1 hora en lo posible para elaborar dicho análisis<sup>141</sup>.

Figura 23. Matriz de riesgos para RCA.

Seguridad	CONSECUENCIAS					FRECUENCIA			SEVERIDAD
	Medio Ambiente (BOCD)	Producción (BOCD)	Producción (KPCD)	Producción (KBWD)	Costos Reparación (M\$)	1 vez cada 3 años o más	1 vez cada 2 años	1 vez o más por año	
Día Ausente del Trabajo / Fatalidad	> 100 bls	>900	> 1200	>4,5	> 75	Red	Red	Red	A
Caso de Trabajo Restringido	10 - 100 bls	700-900	600-1200	3,5-4,5	50 - 75	Yellow	Red	Red	B
Tratamiento Médico	1 - 10 bls	300-700	200-600	2-3,5	25 - 50	Yellow	Yellow	Yellow	C
Primeros Auxilios	0,1 - 1 bls	100-300	70-200	0,75-2	Oct-25	Green	Yellow	Yellow	D
No lesión	< 0,1 bls	<100	<70	<0,75	< 10	Green	Green	Green	E
						1	2	3	

RCA  
 REPORTE DE FALLA  
 REPARAR Y DOCUMENTAR EN ELLIPSE

Fuente: GUERRERO R. Instructivo para el desarrollo de análisis de causa raíz, Superintendencia de operaciones del Rio<sup>142</sup>.

Luego, del análisis de causa raíz se elaborará un informe y su respectiva validación por parte del líder del grupo de investigación. Por último, se socializa el informe final del análisis de causa raíz y se toman las acciones correctivas respectivas para solucionar la causa y causas del problema.

<sup>141</sup> Ibíd.

<sup>142</sup> Ibíd., ref. 11.

Para confirmar sí las acciones correctivas planteadas realmente tienen efecto sobre la prevención de los eventos de fallas, se aplica un protocolo de seguimiento a estas acciones que se extiende por un período de 2 meses, lo cual puede incluir la elaboración de algunos análisis técnicos.

Dentro del desarrollo del proceso de Análisis de Causa Raíz, se estimaran los tiempos de entrega descritos en la siguiente tabla:

Cuadro 2. Tiempos de ejecución en el proceso RCA.

<b>Actividad</b>	<b>Tiempo máximo de ejecución</b>
Elaboración del reporte de falla preliminar	48 horas después de ocurrida la falla
Elaboración del RCA	15 días después de ocurrida la falla.
Validación del Informe	48 horas después de haber sido entregado el RF/RCA.
Reunión de socialización de RF/RCA	7 días después de validado el informe.
Cargue de acciones y generación de eventos	Inmediato después de reunión de sociabilización
Reunión de seguimiento de acciones y recomendaciones	Dos meses (Tercera semana del mes)

Fuente: GUERRERO R. Instructivo para el desarrollo de análisis de causa raíz, Superintendencia de operaciones del Rio<sup>143</sup>.

De acuerdo al procedimiento *ECP-ICP-GCM-M-001 Manual para la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz para la solución de problemas*, las

---

<sup>143</sup> *Ibíd.*, ref. 11.

siguientes son las herramientas que se utilizan para la implementación del Análisis de Causa Raíz<sup>144</sup>.

Cuadro 3. Herramientas para la implementación del RCA.

Herramienta	Aplicación
Matriz del riesgo del Análisis de Causa Raíz (RCA)	Matriz de riesgo para RCA
Línea de tiempo	Reporte de falla preliminar
Diagrama de Pareto	Análisis de recurrencia de fallas
Recolección de Datos	Reporte de falla preliminar
Análisis de Árbol de Falla	Ejecución RCA

Fuente: GUERRERO R. Instructivo para el desarrollo de análisis de causa raíz, Superintendencia de operaciones del Río<sup>145</sup>.

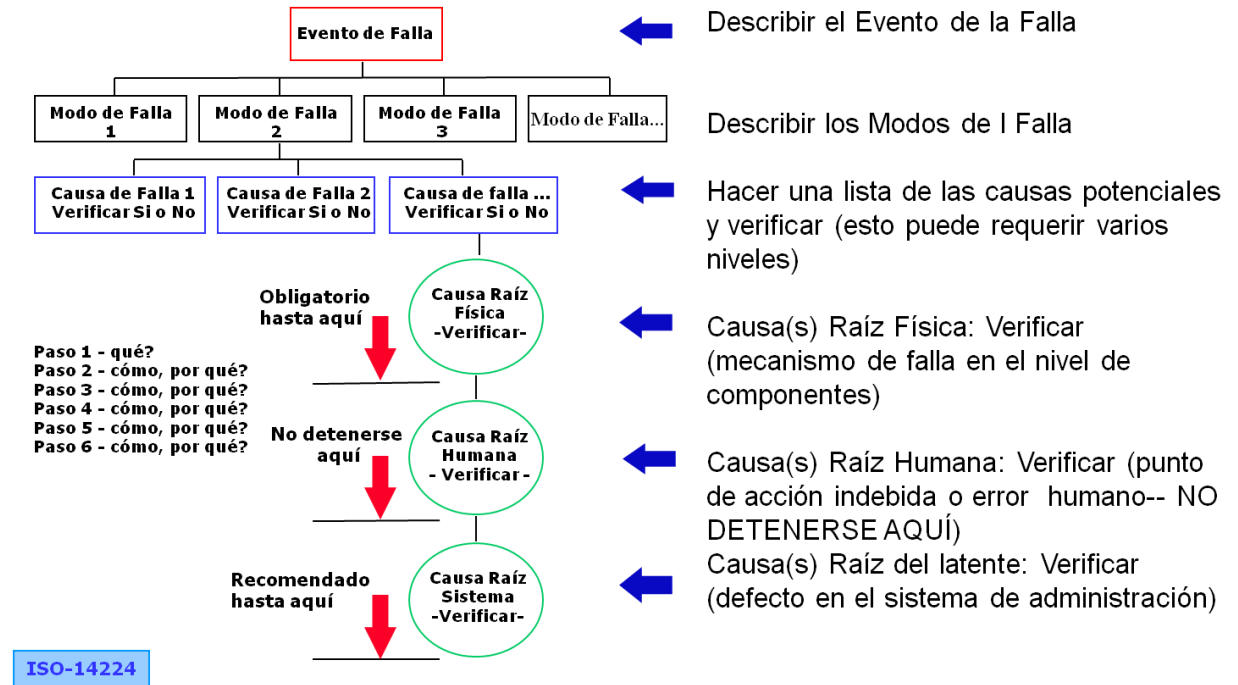
La herramienta de Árbol Lógico de Fallas permite representar gráficamente las relaciones de causa y efecto que nos conduce a descubrir los eventos de falla y cuál fue la causa raíz del problema. En la **Figura** se hace un descripción sobre cómo se debe emplear el Árbol lógico de fallas para el análisis de causa raíz. En el tope del árbol se describe el evento de falla, luego hacia abajo se consignan los posibles modos de falla. A su vez, para cada modo de falla se escriben hacia abajo las causas potencias del modo de falla. Y para cada causa potencial se realizan verificaciones a nivel de componentes del sistema, a nivel de error humano y a nivel del sistema administrativo.

---

<sup>144</sup> Ibíd.

<sup>145</sup> Ibíd.

Figura 24. Descripción del árbol lógico de fallas.



Fuente: Instructivo para el desarrollo de análisis de causa raíz, Superintendencia de operaciones del Rio. Ecopetrol.<sup>146</sup>

### 3.1. REPORTE PRELIMINAR DE FALLAS

Así como está consignado en el manual para la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz para la solución de problemas, una vez que las consecuencias del problema por falta de disponibilidad de los moto-generadores del centro de generación de energía tuvieron efectos graves sobre la producción de barriles de crudo, los ingenieros de mantenimiento de confiabilidad y mantenimiento de Ecopetrol determinaron la clara necesidad de aplicar un

<sup>146</sup> Ibíd.

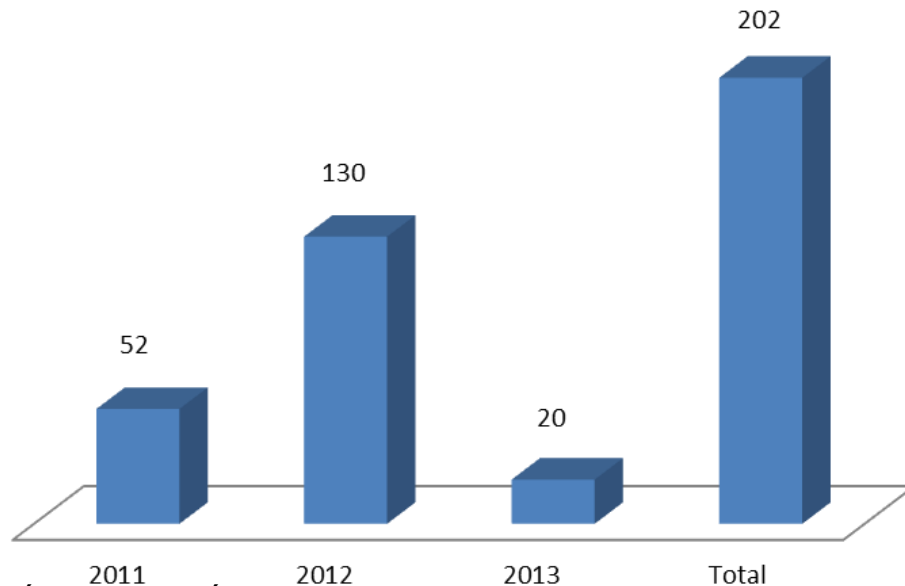
procedimiento de análisis de causa raíz según los lineamientos de la matriz de riesgos establecidos por la empresa.

Entonces, se realizó el informe preliminar de fallas, para lo cual se recaudó una gran cantidad de información necesaria para elaborar la línea de tiempo y el análisis de la ocurrencia de las fallas, con el objetivo de socializar en orden los eventos de falla con el grupo de análisis de causa raíz y generar una visión detallada de la magnitud y complejidad del problema.

La línea de tiempo consistió en el agrupamiento de todos los registros de las fallas relacionadas con la pérdida de disponibilidad del centro de generación de energía y su efecto sobre la producción de crudo. Por otro lado, el análisis de frecuencia de fallas consistió en agrupar los tipos de fallas que ocasionaron pérdidas de disponibilidad junto con su grado de ocurrencia, es decir, las frecuencias con que aconteció cada tipo de falla.

Las siguientes dos figuras, **Figura 4** y **Figura 5**, representan un resumen de la línea de tiempo de los eventos de falla y el número de ocurrencias por cada tipo de falla. En la **Figura 4** se muestra el total de eventos de falla que ocasionaron pérdida de disponibilidad del centro de generación de energía entre el año 2011 y el 2013, el cuál fue de 202 fallas en total. La mayoría de estas fallas, es decir, 130 fallas, acontecieron en el año 2012 con la puesta en marcha de las bombas de inyección de agua del campo de recuperación secundaria en Yaguirí. En el año 2013 se observa una disminución en el número de fallas, pero como consecuencia de las medidas optadas para proteger la producción de crudo, que consistió en contrarrestar la demanda de energía a través de la red eléctrica nacional.

Figura 4. Cantidad de fallas en el Centro de Generación de Yaguirí entre el año 2011 y 2013.



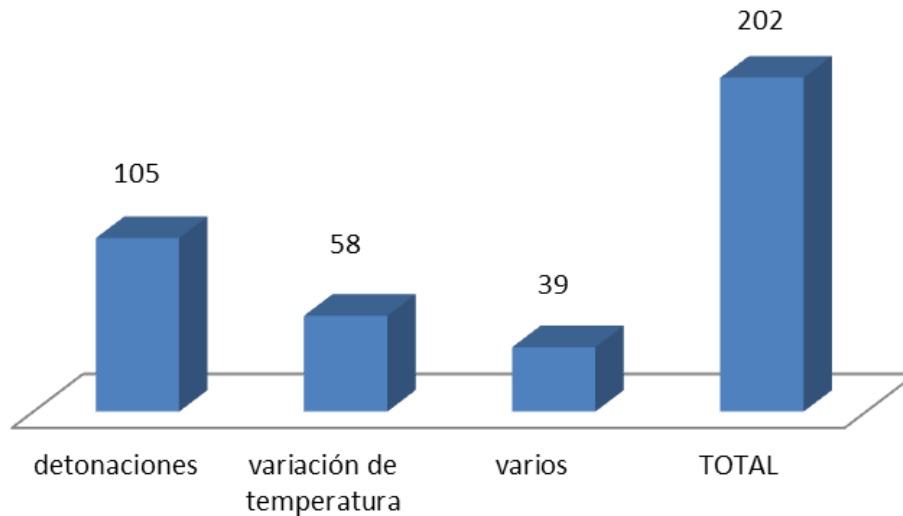
Fuente: GÓMEZ J., y LÓPEZ R. Reporte sobre el estado actual centros de generación Cantagallo y Yariguí<sup>147</sup>.

En la **Figura 5** se observan los eventos de falla agrupados por tipo y su respectivo número de ocurrencia desde el año 2011 y el 2013. Las fallas por detonaciones representaron aproximadamente el 52% del total de eventos de falla, seguido por las fallas ocasionadas por variaciones de temperatura con un 29% del total de eventos de falla y, por último, otros tipos de fallas de diversa naturaleza con un 19% del total de eventos de falla. Así que, en base a estos datos, el análisis de causa raíz se debía enfocar en terminar el origen del problema de las detonaciones y de la variación de temperatura.

---

<sup>147</sup> *Ibíd.*, ref. 8.

Figura 5. Tipo y cantidad de fallas presentadas en los motores del Centro de Generación de Yaguirí entre el año 2011 y 2013.



Fuente: GÓMEZ J., y LÓPEZ R. Reporte sobre el estado actual centros de generación Cantagallo y Yariguí<sup>148</sup>.

### 3.2. ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ (RCA)

Frente al escenario descrito anteriormente, se conformó un grupo de investigación para realizar el análisis de causa raíz, integrado por un conjunto interdisciplinario de profesionales tanto de Ecopetrol, como de empresas contratistas relacionadas con las áreas afectadas por la falta de disponibilidad del centro de generación de energía eléctrica de Yaguirí.

Entre los profesionales seleccionados para formar parte del grupo de investigación, responsable por el análisis de causa raíz, estuvieron los siguientes:

- Operador de los generadores de energía;
- Operadores de la Planta de inyección de agua;

---

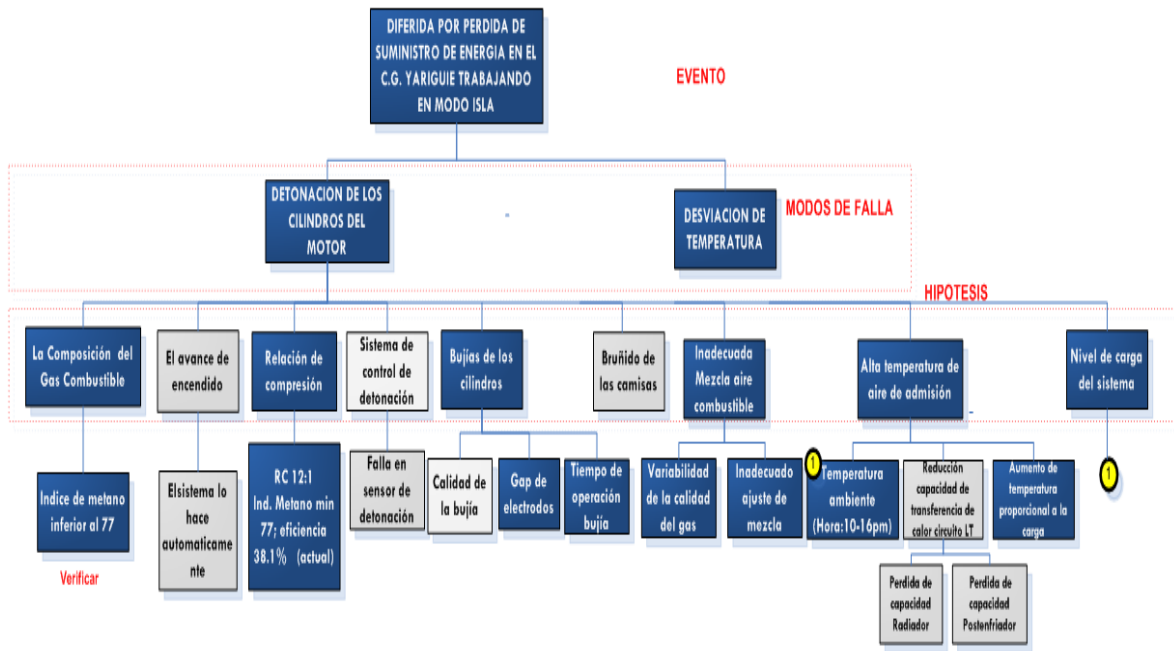
<sup>148</sup> *Ibíd.*, ref. 8.

- Representantes de los fabricantes de CUMMINS;
- Personal de mantenimiento de Unión temporal Generación Colombia – UTGC;
- Personal de mantenimiento del área eléctrica, mecánica e instrumentación de Ecopetrol;
- Personal de mantenimiento del área eléctrica, mecánica e instrumentación de Confipetrol.

Una vez realizado el ejercicio de socialización de los eventos de falla con el grupo investigador, este aplicó las herramientas de análisis para indagar sobre las causas potenciales que generan los problemas por detonación y desviación de temperatura en los moto-generadores de la planta de generación de energía, además de proponer las correspondientes actividades de corrección y estrategia a emplear para verificar si dichas correcciones dieron resultado en la disminución de los eventos de falla.

Entre las técnicas empleadas por el grupo de análisis de causa raíz estuvo la elaboración del árbol lógico de fallas tal como se muestra en la **Figura 6**. En la tercera línea de casillas del árbol lógico de fallas se resaltan las hipótesis más probables, es decir, las causas potenciales que general los problemas de detonación y de desviación de temperatura, según el criterio de los profesionales que integran el grupo de análisis de falla. Y en la cuarta fila de casillas se resaltan en azul aquellas acciones correctivas que deben ser implementadas para solucionar las causas potenciales.

Figura 6. Árbol lógico de fallas elaborado durante la sesión de análisis de causa raíz.



Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí<sup>149</sup>.

En el Cuadro 4 se muestran las recomendaciones hechas por los miembros del grupo de análisis de fallas, las cuales que se deben tener en cuenta para determinar cuál o cuáles de las hipótesis planteadas resulta ser verdadera, mediante la implementación de unas acciones de verificación y seguimiento del desempeño de los moto-generadores del centro de generación de energía.

<sup>149</sup>Ecopetrol S. A., 2012, Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí. 40 Páginas.

Cuadro 4. Hipótesis de posibles causas de falla y recomendaciones hechas en la sesión de análisis de causa raíz.

HIPOTESIS	CAUSA RAIZ	RECOMENDACIONES
La Composición del Gas Combustible	Índice de metano inferior al 77	<b>Acción de verificación:</b> Evaluar el índice de metano con las cromatografías actuales. Sugerencia: Tomar cromatografía en diversos horarios. Verificar el punto de rocío de agua en el gas
Relación de compresión	Relación de Compresión 12:1 Índice Metano min 77; eficiencia 38.1% (actual)	Evaluar alternativa de cambiar relación de compresión a 11.4:1. Índice de metano 67 Costo estimado de la inversión: \$75000 USD/ maquina + IVA. En parada de 30000 horas.
Bujías de los cilindros	Tiempo de operación bujía Gap de electrodos	<b>Acción de verificación:</b> Confirmar mediante informe técnico si las bujías están relacionadas con el modo de falla de detonación, y de qué forma lo hacen. Verificar en códigos de alarma si se han presentado los eventos de desviación de temperatura-detonaciones, y cual ha ocurrido primero. Enviar informe sobre el historial de fallas.
Inadecuada Mezcla aire combustible	Variabilidad en la calidad del gas	Medir emisiones de gases cada 3000 horas, y solicitar ajuste de la mezcla según resultado. Sugerencia: En caso de requerir ajuste, evaluar periodicidad de la medición de emisiones. Hacer seguimiento diario por un mes. Instalación de facilidades para la toma de muestra en caso de que no se puedan soltar tapones.
Alta temperatura de aire de admisión	Temperatura ambiente (Hora:10-16pm)	Realizar estudio de temperatura de manifold de admisión versus carga. Efectuar estrategia de operación para bajar carga en horas críticas.(10 am - 3:00 pm)
Nivel de carga del sistema	Fluctuaciones de carga	Graficar cargas versus eventos acontecidos para evaluar la carga máxima de trabajo en los equipos y compararlas según manual de fabricante

Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí<sup>150</sup>.

### 3.3. ACCIONES DE VERIFICACIÓN

Los factores particularmente esenciales para analizar la calidad de la combustión para múltiples condiciones de funcionamiento son la proporción de la mezcla de aire y combustible, y la calidad de la composición de la mezcla. Por tanto, en este

<sup>150</sup> Ibid.

caso fue particularmente importante el análisis de los componentes del gas utilizado como combustible y el análisis de la calidad del proceso de combustión en cada uno de los moto-generadores mediante análisis de gases.

**3.3.1. Análisis del índice de metano.** En el manual de operación y mantenimiento de las unidades moto-generadoras, el fabricante es muy claro al decir que sus motores pueden funcionar con gas natural con índice de metano 50, el cuál es un combustible de baja calidad, comparado con uno que posea índice de metano 77 en promedio. El índice de metano indica la susceptibilidad del combustible a las detonaciones, cuanto menor el índice de metano será peor la calidad del combustible y el fabricante exige un índice de metano mínimo de 77 para un funcionamiento adecuado para los moto-generadores<sup>151</sup>.

En base al índice de metano del combustible, se debe seleccionar un motor configurado para operar a una determinada relación de compresión, carga y mezcla de aire/combustible para evitar el fenómeno de las detonaciones y sacar obtener el mejor rendimiento del motor.

En relación a esto, se recomendó la verificación del índice de metano del gas combustible empleado en las unidades generadoras mediante un análisis de cromatografía. Este método permite determinar la composición del gas y a partir de la proporción de los diferentes gases que componen del gas combustible, se puede determinar el valor del índice de metano con ayuda de software especializado.

Las muestras de gas para análisis composicional fueron tomadas por personal del ICP siguiendo el procedimiento establecido para toma de muestras de gas cuyo fin es el análisis cromatográfico.

---

<sup>151</sup>Cummins Inc, 2012, Generator set data sheet 1750 kW continous. Especificaciones técnicas.

Para su análisis, se siguió el método estándar GPA 2286 para cuantificar los componentes presentes hasta C<sub>12+</sub> y algunos inertes como dióxido de carbono, nitrógeno y oxígeno, además se calcularon las propiedades fisicoquímicas a 60°F y 14.65 psia.

El resultado del análisis composicional presenta de manera general al metano como componente principal y los demás son hidrocarburos entre C<sub>2</sub> y C<sub>12+</sub>, así como gases inorgánicos CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>.

Como propiedades calculadas se reportan para cada una de las muestras analizadas el peso molecular, GPM, BTU Bruto, BTU Neto, gravedad específica, densidad y factor de compresibilidad. Las constantes para los cálculos fueron tomadas del G.P.A.2145 del 2003 (P=14.696 psia y T=60 °F) a condiciones ideales. Los parámetros volumétricos fueron calculados a P=14.65 psia y T=60 °F.

Para hallar el índice de metano se utilizaron dos programas computacionales. El primero utilizado fue la herramienta en línea recomendada por Cummins, fabricante de las unidades generadoras. Y el segundo programa fué *Methane calculator* 3.2, donde la entrada de datos debe estar en la unidad de porcentaje másico.

En los dos cuadros siguientes, **Cuadro 5** y **Cuadro 6**, se pueden observar los resultados del cálculo del índice de metano. Siendo conservativo se concluye que el índice de metano del gas suministrado a los generadores oscila entre 73 a 77<sup>152,153</sup>.

---

<sup>152</sup>Ecopetrol S. A., 2012, Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí. 40 Páginas.

<sup>153</sup>CASTILLA L., 2013, Segundo reporte de socialización: RCA Centro de generación Yaguiríes. Presentación en PowerPoint.

Cuadro 5. Cálculo del índice de metano con la herramienta de Cummins en línea.

SAMPLE ID	200781814	200792026	200808930
MATERIAL TYPE	GAS NATURAL	GAS NATURAL	GAS NATURAL
FECHA DE MUESTREO	10/08/2012 16:30	12/09/2012 11:30	26/10/2012 10:30
IDENTIFIC. MUESTRA	GAS NATURAL SALIDA SCRUBBER CITY GATE	GAS NATURAL SALIDA SCRUBBER CITY GATE	GAS NATURAL SALIDA SCRUBBER CITY GATE
INDICE DE METANO	77.2	77.1	76.7

Fuente: Castilla L. Segundo reporte de socialización: RCA Centro de generación Yaguiries <sup>154</sup>.

Cuadro 6. Resumen de los resultados del análisis del índice de metano.

FECHAS	INDICE DE METANO GAS NATURAL SALIDA SCRUBBER CITY GATE YARIGIES
10/08/2012 16:30	73
12/09/2012 11:30	73,1
26/10/2012 10:30	72,8

Fuente: CASTILLA L. Segundo reporte de socialización: RCA Centro de generación Yaguiries <sup>155</sup>. Ecopetrol S. A. Análisis de muestra de gas natural C12+ <sup>156</sup>.

**3.3.2. Análisis de la mezcla aire/combustible.** Con el objetivo de determinar alguna desproporción inadecuada de la mezcla de aire y gas combustible, se propuso implementar, como medida de verificación, una serie de mediciones diarias de temperatura de los gases de emisión, porcentaje de oxígeno y cantidad

<sup>154</sup> Ibid.

<sup>155</sup> Ibid., ref. 158.

<sup>156</sup> Ecopetrol S. A., 2011. Análisis de muestra de gas natural C12+. Elaborado el 31/10/2011 por el laboratorio de cromatografía.

óxidos de nitrógeno en partes por millón en cada uno de los moto-generadores del centro de generación de energía.

Como la muestra el Cuadro, en la ficha de especificaciones del equipo, el fabricante de los moto-generadores indica cuál debería ser la magnitud ideal de cada una de las variables anteriores como indicación de que el motor está funcionando adecuadamente en diferentes cargas y por tanto está realizando una proporción adecuada de la mezcla de aire/combustible.

**Cuadro 7. Datos sobre las emisiones de los moto-generadores según el fabricante.**

Los datos anteriores deben compararse con la siguiente tabla extraída de la ficha técnica de los GENSET.

Exhaust Emissions						
NOx emissions (wet)	4	ppm	152	153	158	215
NOx emissions (@ 5% O2)	4	mg/Nm3	500	500	512	673
CH4 emissions (wet) (affected by gas composition)	4	ppm	1525	1525	1575	1740
CH4 emissions (@ 5% O2) (affected by gas composition)	4	g/Nm3	1.75	1.73	1.77	1.90
CO emissions (wet)	4	ppm	557	561	574	618
CO emissions (@ 5% O2)	4	g/Nm3	1.12	1.12	1.13	1.18
O2 emissions (dry)	4	%	9.4	9.3	9.2	8.8

De derecha a izquierda, los valores de las columnas corresponden a los % de carga: 50%, 75%, 90% y 100%.

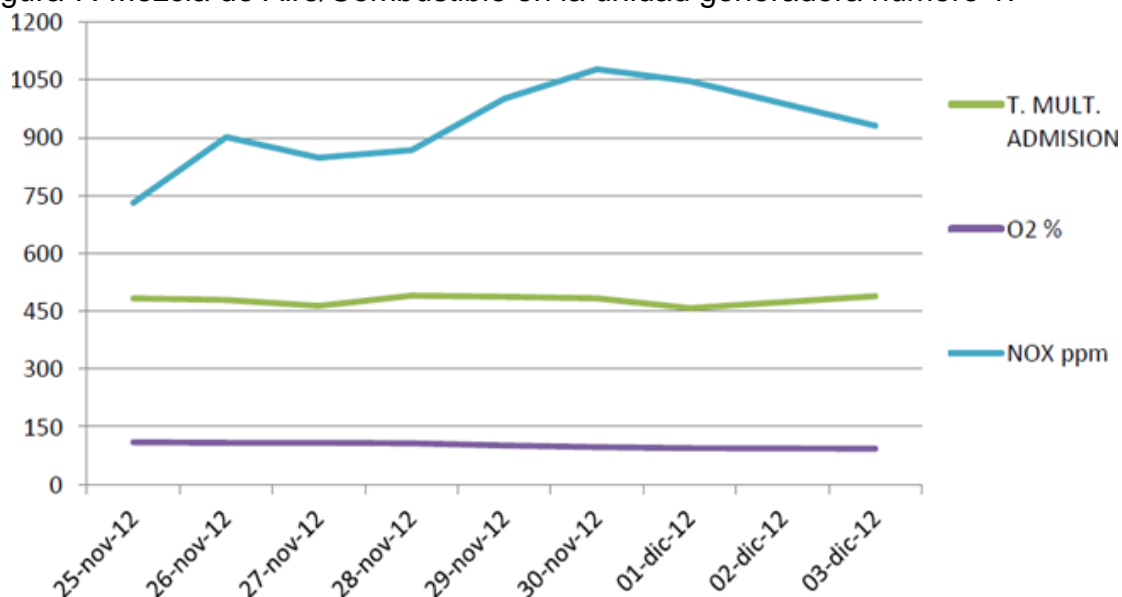
Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguiri<sup>157</sup>.

Si existe una clara diferencia entre los valores medidos y los valores indicados por el fabricante, se podría decir que los motores no estarían funcionando adecuadamente debido a algún problema relacionado con el proceso de combustión. No obstante, las mediciones, cuyos resultados se muestran en las siguientes figuras permiten concluir que los datos recopilados no muestran una evidencia clara que permita hacer alguna afirmación conclusiva sobre algún problema relacionado con el proceso de combustión del gas combustible empleado en las cuatro unidades de generación eléctrica.

<sup>157</sup>Ibid., ref. 158.

Sobre las mediciones de temperatura en el múltiple de admisión, las mediciones de O<sub>2</sub> y emisiones de NO<sub>x</sub> para cada una de las unidades durante 9 días seguidos, apenas se puede decir que la temperatura en el múltiple de admisión y los niveles de O<sub>2</sub> se mantuvieron sin muchas variaciones durante los días de verificación. No obstante en los gráficos se puede observar una variación de los niveles de NO<sub>x</sub>, pero estas variaciones normales en las emisiones de NO<sub>x</sub>, corresponden al aumento o disminución de la demanda de potencia del motor. Cuando la demanda de potencia aumenta, la cantidad de mezcla aire/combustible que necesita el motor es mayor. Y la consecuencia de un aumento de mezcla aire/combustible es un aumento en las emisiones de NO<sub>x</sub> al ambiente.

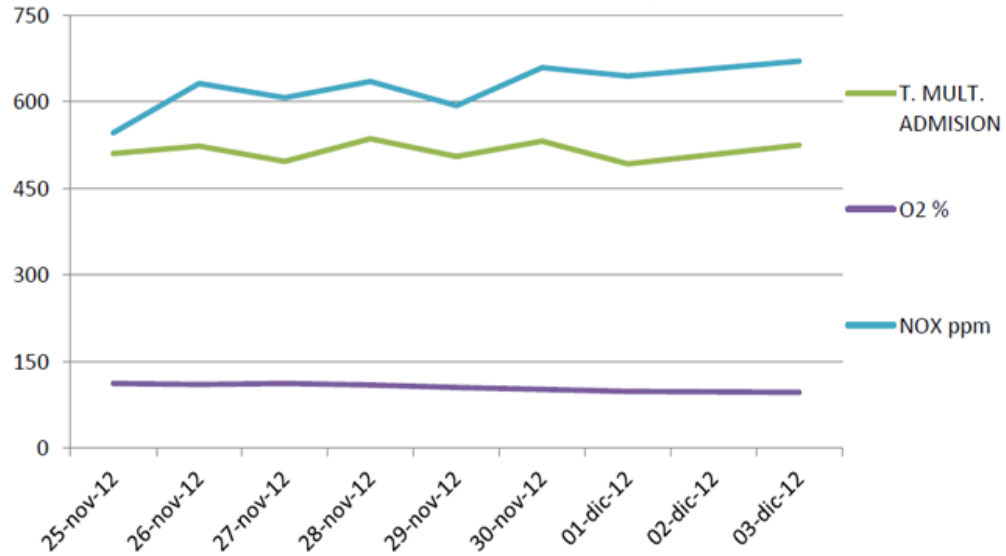
Figura 7. Mezcla de Aire/Combustible en la unidad generadora número 1.



Fuente: Ecopetrol S. A., 2012, Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí<sup>158</sup>.

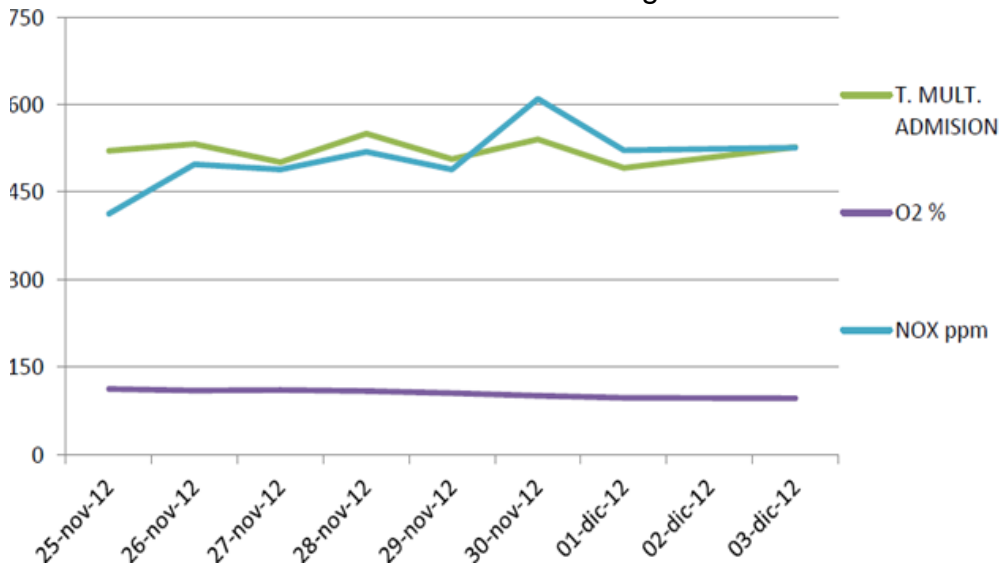
<sup>158</sup> Ibíd.

Figura 8. Mezcla de Aire/Combustible en la unidad generadora número 2.



Fuente: Ecopetrol S. A., 2012, Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí<sup>159</sup>.

Figura 9. Mezcla de Aire/Combustible en la unidad generadora número 3.

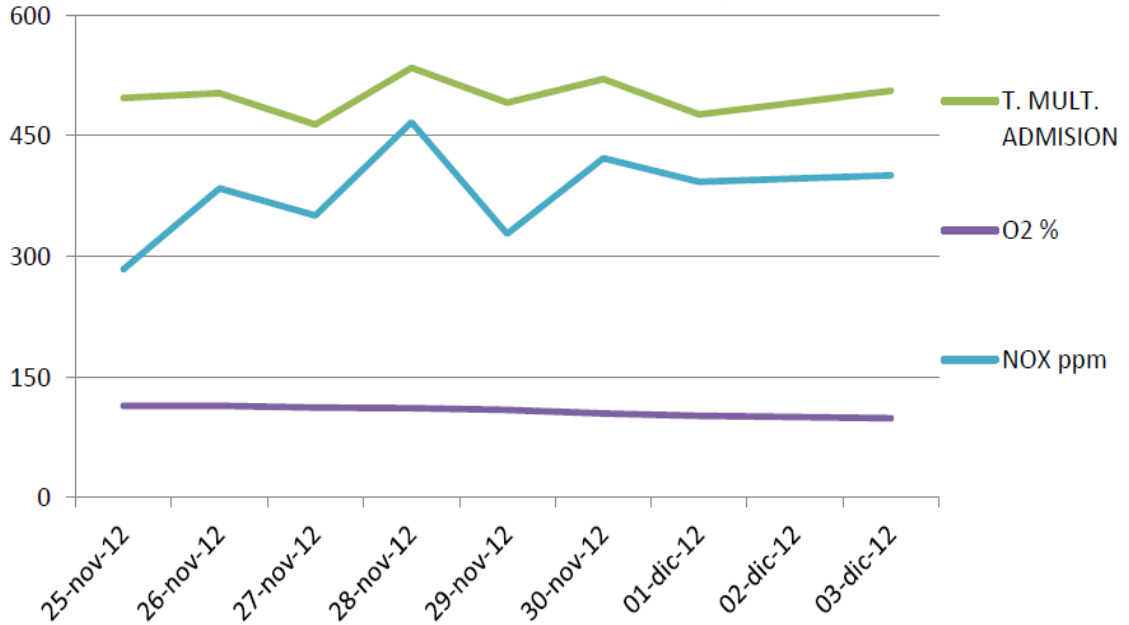


Fuente: Ecopetrol S. A., 2012, Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí<sup>160</sup>.

<sup>159</sup> Ibíd.

<sup>160</sup> Ibíd.

Figura 10. Mezcla de Aire/Combustible en la unidad generadora número 4.



Fuente: Ecopetrol S. A., 2012, Reporte final sobreaanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí<sup>161</sup>.

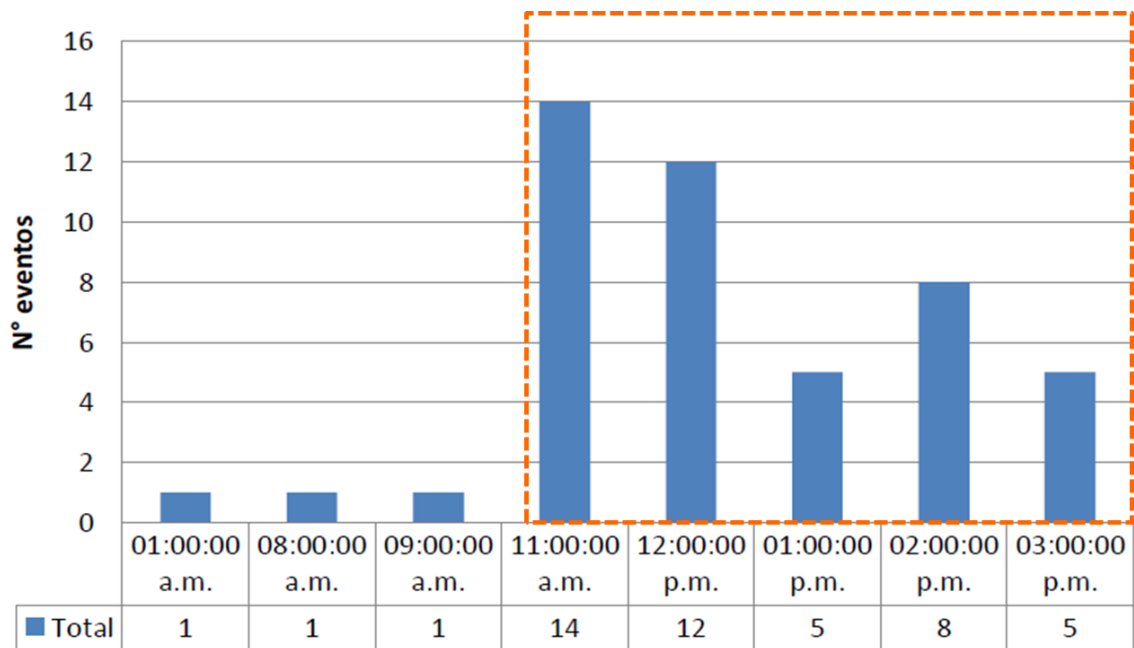
**3.3.3. Revisión de la temperatura de aire de admisión.** La revisión de la temperatura del está en que el aire caliente pesa menos por poseer menos moléculas en un determinado volumen de aire, que moléculas en el mismo volumen de aire a menor temperatura. Y cuando los motores consumen aire caliente hay menos moléculas de aire para quemar con el combustible. Esto causa una combustión incompleta y por tanto una pérdida de desempeño en el motor. Por otro lado, el aire caliente también promueve la aparición del fenómeno de las detonaciones, además de la carga del motor, su velocidad y relación de compresión<sup>162</sup>.

<sup>161</sup> *Ibíd.*

<sup>162</sup> *Ibíd.*, ref. 68

Para determinar la correlación entre la temperatura del aire de admisión y el número de fallas por detonaciones se empezó por determinar las horas críticas donde ocurren la mayor cantidad de fallas por causa del fenómeno del golpeteo o detonaciones. El resultado de la investigación se puede observar en la **Figura 11**. Todos los análisis se basaron en información desde el 1 de abril hasta el 18 de noviembre de 2012. Se concluye en base a la información recolectada que el 93,6 % de los eventos ocurridos por detonación ocurren entre la 10 am y las 3:30 00 pm.

Figura 11. Número de eventos presentados en cada hora del día.



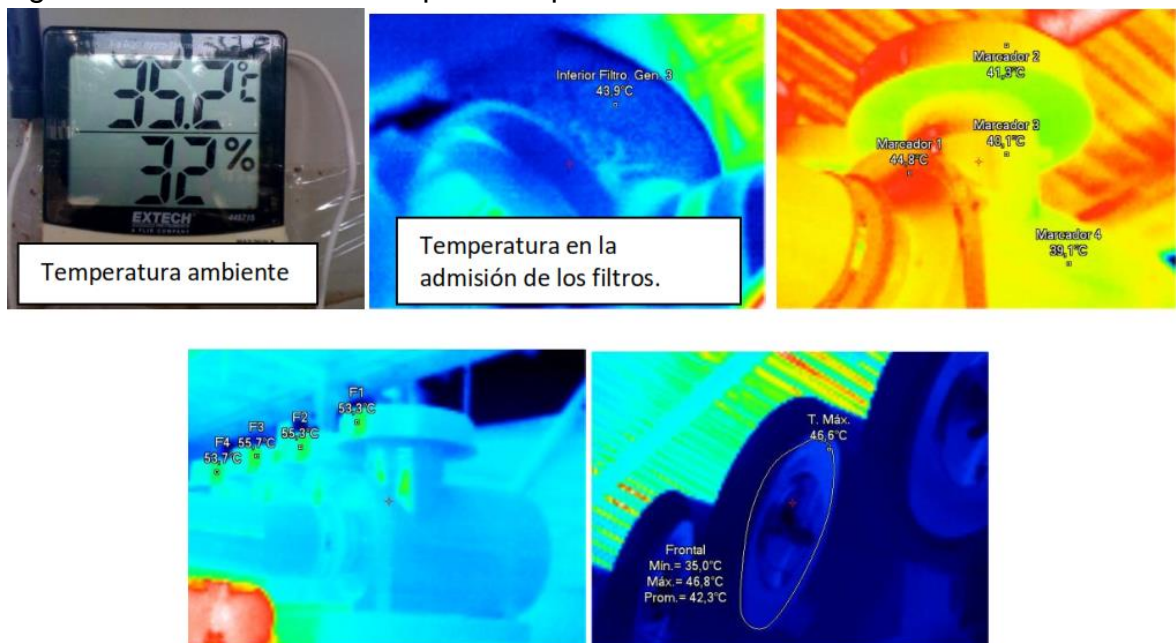
Fuente: Ecopetrol S. A., 2012, Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí<sup>163</sup>.

Luego, durante esas horas críticas se realizaron mediciones de temperatura con infrarrojo a la entrada de los filtros de aire de cada uno de los motores de las unidades generadoras, como se muestra en la **Figura 12**. Con estas mediciones se

<sup>163</sup> Ibid.

evidenció que la temperatura del aire de admisión se encuentra por encima de la temperatura ambiente aproximadamente 10 °C y durante las horas críticas, aquellas cuando ocurre el mayor número de detonaciones durante el día, la temperatura en los filtros de admisión alcanza los 50 °C. Por tanto, es posible que la temperatura de aproximadamente 50 °C sea un factor esté contribuyendo al fenómeno del golpeteo.

Figura 12. Mediciones de temperatura por en los filtros de admisión.



Fuente: Ecopetrol S. A. Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguiri<sup>164</sup>.

### 3.3.4. Factores de disminución de potencia recomendados por el fabricante.

Como se había comentado en las secciones anteriores, la calidad del combustible, la altitud, la temperatura ambiente y la forma que es transmitida la potencia del generador son factores que contribuyen a la disminución de la potencia del motor,

<sup>164</sup> Ibíd.

debido a que la unidad generadora, según las especificaciones del fabricante, no está operando en condiciones ideales en cuanto a la calidad del combustible, temperatura y altitud respecto al nivel del mar.

Aplicando la guía paso-a-paso que ofrece el manual de operación y mantenimiento de las unidades generadoras, se calculó la eficiencia del motor teniendo en cuenta los factores de disminución de potencia, también conocidos como factores de derrateo, en función de la altura sobre el nivel del mar, índice de metano del gas combustible.

Como se muestra en la **Figura 13**, para una altura de 175 metros a nivel del mar y una temperatura en los filtros de admisión de aproximadamente 50 °C, el factor de derrateo es de aproximadamente 0,91%.

Respecto al factor de derrateo debido a la baja calidad del combustible, se escogió un factor igual a 90% que corresponde a un gas combustible con índice de metano igual 71.

La función que está cumpliendo el motor en la unidad de generación también supone un factor de derrateo debido a la pérdida de eficiencia relacionadas con la transmisión de potencia del motor al generador. Ese factor usualmente se asume como del 95%.

En los siguientes cuadros (**Cuadro 8** y **Cuadro 9**) se muestra el cálculo de la potencia que entrega cada unidad generadora teniendo en cuenta los factores de derrateo. Se tiene que la eficiencia de cada equipo, en las condiciones presentes en la planta de generación, es del 78%. Para este 78% de eficiencia, cada unidad generadora tiene la disponibilidad en entregar 1344 kW de potencia, es decir, 5376 kW entregados por las cuatro unidades generadoras. Y si se tiene en cuenta que el Centro de Generación necesita usar 110 kW para su propio funcionamiento,

significa que las cuatro unidades generadoras pueden entregar en total 5266 kW y no los 7000 kW que necesita la planta de inyección de agua.

Figura 13. Factores de derrateo por calidad del combustible y modo de funcionamiento.

Barometer		Altitude		Table B *																
In Hg	mbar	Feet	Meters	Derate Multiplier Off Grid (Island or Load Share)																
20.7	701	9843	3000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
21.4	723	9022	2750	0.71	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
22.1	747	8202	2500	0.76	0.72	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
22.8	771	7382	2250	0.81	0.77	0.72	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
23.5	795	6562	2000	0.86	0.81	0.77	0.71	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
24.3	820	5741	1750	0.91	0.86	0.82	0.76	0.70	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
25.0	846	4921	1500	0.96	0.92	0.87	0.82	0.77	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
25.8	872	4101	1250	1.00	0.98	0.93	0.87	0.82	0.73	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
26.6	899	3281	1000	1.00	1.00	0.96	0.94	0.87	0.79	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
27.4	926	2461	750	1.00	1.00	0.99	0.98	0.95	0.85	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
28.3	954	1640	500	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92	0.75	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
29.1	983	820	250	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	0.83	0.70	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
29.5	995	492	150	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.90	0.82	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30.0	1012	0	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.92	0.87	0.72	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
				°C	20	25	30	35	40	45	50	55	60							
				°F	68	77	86	95	104	113	122	131	140							
				Air Filter Inlet Temperature																

Methane Number Capability Load (Percent of Rated)			
100%	90%	75%	50%
77	71	63	52

DERRATEO POR BAJO INDICE DE METANO

DERRATEO POR ALTA TEMPERATURA

\* Based on SAE standard ambient pressure vs. altitude. Assumes LT return temperature is 10C above air filter inlet.

Fuente: Cummins Inc, 2012, Generator set data sheet 1750 kW continuous. Especificaciones técnicas<sup>165</sup>.

Estos resultados tienen una implicación importante, ya que evidencian una mala selección del tamaño de los motores en base a la calidad del combustible disponible y la localización de las unidades generadoras.

<sup>165</sup> Ibid., ref. 157.

Cuadro 8. Cálculo de la eficiencia del equipo.

RELACION DE COMPRESION 12:1	CARGA (RATA DE PORCENTAJE)
	Peor escenario
Factor derrateo por índice de metano	90%
Factor derrateo por temperatura	91%
Factor derrateo por operación trabajando en modo isla	95%
<b>% de eficiencia del equipo</b>	<b>78%</b>
Potencia a la salida del Generador	5376 KW
Consumo de potencia de la planta	110 KW
Kilowatios entregado a ECOPETROL	5266 KW

Fuente: Ecopetrol S. A., 2012, Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí<sup>166</sup>.

Cuadro 9. Potencia de salida de cada generador.

% eficiencia = Factor derrateo IM x Factor derrateo Temp x Factor derrateo por operación **78%** **1344KW**

60Hz via GEARBOX	See Note	Units	100%	90%	75%	50%
<b>General Data</b>						
Effective mechanical output with engine driven pumps	1	kW	1860	1649	1374	916
Gearbox mechanical output with engine driven pumps	1	kW	1821	1614	1345	897
Generator electrical output	2	kWe	1750	1551	1293	862

Fuente: Ecopetrol S. A., 2012, Reporte final sobreanálisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí<sup>167</sup>.

<sup>166</sup> Ibid., ref. 158.

<sup>167</sup> Ibid.

#### **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

La carga de operación del equipo, temperatura del aire de admisión y el índice de metano son factores que promueven la presencia de detonaciones en los equipos.

Para alcanzar el nivel de confiabilidad que la producción de Ecopetrol requiere, es necesario que los motores del Centro de Generación trabajen derrateados generando una potencia máxima por equipo de 1344 KW.

Los motores QSV91G marca Cummins actualmente instalados en el Centro de Generación no fueron seleccionados de acuerdo a las condiciones establecidas en los documentos del proceso de selección.

En los criterios de selección de un motor de combustión interna se debe tener en cuenta: El índice de metano de gas que alimenta el motor, la temperatura ambiente y la altura sobre el nivel del mar; se debe hacer simulando las condiciones más severas, contemplando estas variables que son fijas en el proceso se procede a seleccionar los equipos que resistan las condiciones donde van hacer instalados.

## 5. RECOMENDACIONES

Cambiar la relación de compresión de los motores a 11.4 a 1 para mejorar la eficiencia de las máquinas teniendo en cuenta el valor del índice de metano del gas del proceso.

Recubrir la línea de los gases de escape con aislante térmico para evitar que la radiación aumente la temperatura de admisión en los filtros de aire.

Instalación de un Moto-generator adicional para cumplir con la EHMC (6000 kW).

## BIBLIOGRAFÍA

ABU-QUDAIS M., 1996, Exhaust gas temperature for knock detection and control in spark ignition engine. Editorial Elsevier, Revista Energy conversion and management, Vol. 37, Páginas 1383–1392. Ref 34, página 19.

AGRIZZI F., 2007, Estudo técnico-econômico de implantação de um grupo gerador de emergência em fábrica de refrigerantes. Projeto de graduação da Universidade Federal do Espírito Santo para a obtenção do grau de engenheiro electricista. 53 Páginas. Página 16.

AHMED T., 2006, Reservoir engineering handbook. Segunda Edición. Editorial Gulf Professional Publishing. 1212 Páginas. Página 13.

BRECQ G., BELLETTRE J., y TAZEROUT M., 2003, A new indicator for knock detection in gas SI engines. Editorial Elsevier, Revista International Journal of Thermal Sciences, Vol. 42, Páginas 523–532.

CASTILLA L., 2013, Segundo reporte de socialización: RCA Centro de generación Yariquíes. Presentación en PowerPoint.

CHO H. M. y HE B.-Q., 2007, Spark ignition natural gas engines— A review. Editorial Elsevier, Revista Energy Conversion and Management, Vol.48, Páginas 608–618. Página 17.

Cummins Inc, 2012, Generator set data sheet 1750 kW continuous. Especificaciones técnicas.

Ecopetrol S. A., 2011. Análisis de muestra de gas natural C12+.Elaborado el 31/10/2011 por el laboratorio de cromatografía.

Ecopetrol S. A., 2012, Reporte final sobre análisis de causa raíz del fenómeno de las detonaciones en el Centro de Generación en Yaguirí. 40 Páginas.

GÓMEZ J., y LÓPEZ R., 2013. Reporte sobre el estado actual de los centros de generación Cantagallo y Yariguí. Presentación en PowerPoint. (Ibid p. 7).

GRAJALES D. H. M., SÁNCHEZ Y. O., PINZÓN M., Aplicadas M., and Mantenimiento A. L., 2006. La confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad, disciplinas modernas aplicadas al mantenimiento. Revista Scientia et Technica de la Universidad Tecnológica de Pereira, Vol. 11, Páginas 155–160.

GUERRERO R., 2010, Instructivo para el desarrollo de análisis de causa raíz, Superintendencia de operaciones del Rio. 7 Páginas.(ibíd., p. 9).

HEYWOOD J., 1988, Internal combustion engine fundamentals. Editorial McGraw-Hill. 917 Páginas. Ref 31, página 19.

HUDSON C., GAO X., y STONE R., 2001, Knock measurement for fuel evaluation in spark ignition engines. Editorial Elsevier, Revista Fuel, Vol. 80, Páginas 395–407.

HUSSAIN J., PALANIRADJA K., ALAGUMURTHI N. y MANIMARAN R., 2012, Effect of Exhaust Gas Recirculation (EGR) on Performance and Emission characteristics of a Three Cylinder Direct Injection Compression Ignition Engine. Editorial Elsevier, Revista Alexandria Engineering, Vol. 51, Páginas 241–247. Ref. 61, página 25.

MALENSHEK M. y Olsen D., 2009, Methane number testing of alternative gaseous fuels. Editorial Elsevier, Revista Fuel, Vol. 88, Páginas 650–656. Página 17.

MOBLEY K., 1999, Root cause failure analysis. Editorial Newnes. 306 Páginas.

MORA L., 2009, Mantenimiento Industrial Efectivo. Editorial COLDI Limitada.

SPEIGHT J., 2009, Enhance Recovery Methods for Heavy Oil and Tar Sands. Primera Edición. Editorial Gulf Professional Publishing. Páginas 335. Página 13.

TORRES, D., 2007. Mantenimiento: Su implementación y gestión. Segunda Edición. Editorial Universitas, Argentina. 339 Páginas.

VERGEL H., 2012, Aplicacion de la metodología de análisis de causa raíz (RCA) para la identificación del mar actor de los excavadores Caterpillar 345 y 345D en la empresa Drummond Ltda. Universidad Industrial de Santander. Monografía para la obtención del grado de especialista en gerencia del mantenimiento. 86 Páginas.

ZHEN X., WANG Y., XU S., ZHU Y., TAO C., XU T.ySONG M., 2012, The engine knock analysis – An overview. Editorial Elsevier, Revista Applied Energy, Vol. 92. Páginas 628–636. Ref. 32, página 19.

ZHEN X., WANG Y., XU S., y ZHU Y., 2013, Numerical analysis on knock for a high compression ratio spark-ignition methanol engine. Editorial Elsevier, Revista Fuel, Vol.103, Páginas 892–898. Ref. 62, página 25.