

**APLICACIÓN DE RCA PARA LOS POZOS DE PRODUCCIÓN DE CRUDO
CON SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO-SUMERGIBLE**

WILLIAM ANTONIO RAMÍREZ GARCÍA

RAÚL LEONARDO URREA RAMÍREZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2015**

**APLICACIÓN DE RCA PARA LOS POZOS DE PRODUCCIÓN DE CRUDO CON
SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO-SUMERGIBLE**

WILLIAM ANTONIO RAMÍREZ GARCÍA

RAÚL LEONARDO URREA RAMÍREZ

**Monografía de grado presentada como requisito para optar el título:
ESPECIALISTA EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO**

Director

DIEGO ORLANDO MERCHÁN PICO

Ingeniero Industrial

Especialista en Formulación y Evaluación de Proyectos

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA
2015**

DEDICATORIA

A mis amores Tata, Cristian y Laura por ser fuente de motivación e inspiración.

A mi mama Maria por su constante esfuerzo y apoyo incondicional.

A la memoria de mi padre Alfonso, mi orgullo, ejemplo de perseverancia en la superación diaria con infinitos despliegues de sabiduría.

A mis compañeros de especialización Raul, Fabián y Jorge con quienes compartí y disfrute entrañables momentos en los viajes hacia la ciudad de Bogotá.

William Ramirez

A mi esposa Carolina y a mi hija Camila por su constante apoyo incondicional y paciencia por el tiempo no compartido durante esta etapa

Raul Leonardo Urrea

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestros más sinceros agradecimientos:

Al ingeniero Diego Orlando Merchán por su valioso aporte en tiempo y conocimiento para llevar a cabo este proyecto.

Al ingeniero Raul Palacios, Gestor de Mantenimiento de Ecopetrol SOA quien nos brindó su apoyo incondicional desde el inicio hasta la finalización de todas las actividades.

A Confipetrol SAS por facilitarnos y colocar a disposición los recursos informáticos para la realización de esta monografía.

A todos y cada uno de los profesores de la especialización quienes dieron lo mejor de sí en cada uno de los ciclos de enseñanza.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO ORGANIZACIONAL	14
1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES APIAY	14
1.2 VARIADORES DE VELOCIDAD CENTRILIFT UBICADOS EN LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES APIAY	15
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	17
1.3.1 Planteamiento del Problema.	17
1.4 OBJETIVOS	17
1.4.1 Objetivo General.	17
1.4.2 Objetivos Específicos.	17
1.4.3 Justificación.	18
2. MARCO TEÓRICO	19
2.1 PERTURBACIÓN ALEATORIA	19
2.2 DISPONIBILIDAD DE EQUIPOS	19
2.3 CONFIABILIDAD DE EQUIPOS	19
2.4 CONFIABILIDAD OPERACIONAL	20
2.5 HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL	20
2.5.1 Análisis de Criticidad, (CA).	21
2.5.2 Inspección Basada en Riesgo, (RBI).	21
2.5.3 Análisis de Modo y Efectos de Falla, (FMEA).	21
2.5.4 Análisis de Causa Raíz, (RCA).	21
2.5.4.1 Objetivo del RCA.	21
2.5.4.2 Beneficios del RCA.	22
2.5.4.3 Limitantes del RCA.	22
2.6 ÁRBOL LÓGICO DE FALLA	22
2.6.1 Beneficios del Árbol Lógico.	22
2.6.2 Limitantes del Árbol Lógico.	23
2.7 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE FALLAS	23
2.7.1 Métodos Cuantitativos.	23
2.7.2 Métodos Cualitativos.	23
3. VARIADORES DE VELOCIDAD CENTRILIFT	24
3.1 ETAPA CONVERSORA	24
3.2 ETAPA DE FILTRADO	26
3.2.1 Condensadores del BUS D.C.	27

3.2.2. Resistencia de absorción.	27
3.2.3 Inductores	28
3.3 Etapa inversora.	29
4. ANÁLISIS DE DATOS	31
4.1 SISTEMA DE INFORMACIÓN	31
4.2 RECOLECCIÓN DE DATOS	31
4.3 Preparación de los Datos	44
4.4 Análisis de la recolección de datos.	44
4.4.1 Diagrama de Pareto.	47
4.5 IDENTIFICACION DEL MAL ACTOR	47
4.5.1 Descripción del sistema identificado como el mal actor.	47
5. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ	49
5.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ	49
5.1.1 Análisis de Evento.	50
5.1.2 Árbol de Falla.	50
5.2 Pasos del Árbol Lógico de Fallas.	50
5.2.1 Descripción del Evento	50
5.2.2 Modos de Falla	51
5.2.3 Hipótesis de Falla.	52
5.2.3.1 Perturbación Estacionaria	52
5.2.3.2 Variaciones de Tensión de Corta Duración.	53
5.2.4 Causas Físicas.	56
5.2.5 Causas Humanas.	57
5.2.6 Causas Latentes.	57
5.2.7 Recomendaciones emitidas para la eliminación de fallas.	58
6. CONCLUSIONES	60
BIBLIOGRAFÍA	61

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ubicación de los Variadores Centrilit en el Campo Apiay.	16
Tabla 2. Fallas o eventos generados en los variadores de velocidad de la Superintendencia de Operaciones Apiay	32
Tabla 3. Paradas inesperadas en los variadores de velocidad Centrilit.	45
Tabla 4. Mecanismos de Falla.	46
Tabla 5. Mecanismo de Falla más Frecuente.	46
Tabla 6. Fenómenos Electromecánicos.	54

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación geográfica de la Superintendencia de Operaciones Apiay.	14
Figura 2. Equipos de superficie para un pozo productor de crudo con bombeo electro-sumergible.	15
Figura 3. Aspectos de la Confiabilidad Operacional.	20
Figura 4. Variador de Velocidad Centrilift.	24
Figura 5. Etapas del variador de velocidad.	25
Figura 6. Etapas de un convertor.	25
Figura 7. Esquema con SCR.	26
Figura 8. Etapas de Filtrado.	27
Figura 9. Esquema de conexión de los condensadores.	27
Figura 10. Fotografía de un Inductor para variador Centrilift	28
Figura 11. Etapa Inversora.	28
Figura 12. Esquema del IGBT.	30
Figura 13. Diagrama de Pareto Mal Actor, Ecopetrol - Campo Apiay.	47
Figura 14. Pozo con mayor no-disponibilidad.	48
Figura 15. Árbol Lógico de Fallas.	51
Figura 16. Depresiones de Tensión.	55
Figura 17. Cresta.	55
Figura 18. Interrupciones.	56
Figura 19. Verificación de Causas Latentes.	57
Figura 20. Diagrama de curva del sistema de respaldo.	58

RESUMEN

TITULO: APLICACIÓN DE RCA PARA LOS POZOS DE PRODUCCIÓN DE CRUDO CON SISTEMA DE BOMBEO ELECTRO-SUMERGIBLE *

AUTOR(ES): WILLIAM ANTONIO RAMÍREZ GARCÍA Y RAÚL LEONARDO URREA RAMÍREZ

PALABRAS CLAVES: BOMBEO ELECTRO – SUMERGIBLE, EQUIPOS DE SUPERFICIE, VARIADOR DE VELOCIDAD, PERTURBACION ELECTRICA, MECANISMOS DE FALLA, ANALISIS DE CAUSA RAIZ (RCA), CONFIABILIDAD OPERACIONAL, ARBOL LOGICO DE FALLAS.

DESCRIPCION: Los continuos cambios en la industria petrolera que día a día determinan nuevas metas de producción en los diferentes campos de extracción de crudo requieren de soluciones y planes de mejora que representen un alto costo – beneficio para las organizaciones; este trabajo identifica a partir de la aplicación de la metodología de causa raíz una falla oculta en los variadores de velocidad de marca Centrilift, falla que genera un alto impacto económico debido a constantes diferidas de producción (determinadas por el tiempo que tarde cada pozo en ser reestablecido) y ocasionadas por fallas externas en el sistema eléctrico que afectan uno de los componentes de los equipos de superficie en el modelo de bombeo electro - sumergible.

La recolección y análisis de datos permitió evidenciar los mecanismos de falla presentes en los diferentes eventos eléctricos, a partir de dicha información se consolido el esquema de la metodología aplicada y se definió el mal actor propio de esta investigación, de tal forma que las recomendaciones emitidas permitieran vislumbrar el aumento de la confiabilidad, disponibilidad y continuidad operacional de cada uno de los variadores objeto del estudio.

Por último se sugiere la implementación de un sistema de respaldo eléctrico como alternativa de solución que permita mantener ininterrumpidamente los valores de tensión ideales para el correcto funcionamiento en la etapa de control del variador.

** Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en Gerencia de Mantenimiento. Director: Diego Orlando Merchán, Ingeniero Industrial.

ABSTRAC

TITLE: CAUSE ANALYSIS APPLICATION ROOT (RCA) FOR THE PRODUCTION WELLS OF CRUDE WITH ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPING SYSTEM

AUTHOR (S): WILLIAM ANTONIO RAMÍREZ GARCÍA AND RAÚL LEONARDO URREA RAMIREZ

KEY WORDS: ELECTRIC SUBMERSIBLE PUMPING, SURFACE EQUIPMENT, VARIABLE SPEED DRIVE, ELECTRICAL DISTURBANCE, FAILURE MECHANISMS, ROOT CAUSE ANALYSIS (RCA), OPERATIONAL RELIABILITY, FAILURE TREE ANALYSIS (FTA).

DESCRIPTION: The continuous changes in the oil industry that day determine new goals of production in the different fields of extraction of crude oil require solutions and improvement plans that represent a high cost - benefit to organizations; This work identifies the application of the methodology of cause root a hidden fault in a brand Centrilift variable speed, failure that generates a high economic impact due to deferred production constant (determined by the time that takes each well in being re-established) and caused by external fault in the electrical system that affect one of the components of the equipment of surface on the electric submersible pump model.

The compilation and analysis of data allowed evidence of failure mechanisms present in the different electrical events from such information was consolidated with the outline of the methodology applied and the bad actor of this research, is defined so that the recommendations would envisage increased reliability, availability, and continued operations of each variable object of the study.

Finally, it is suggested the implementation of a system of electric backrest alternative allowing continuously to maintain the ideal voltage settings for proper operation at the stage of the drive control.

** Monograph

** Mechanical - Physical Faculty, School of Mechanical Engineer, Maintenance Management Specialization. Director: Diego Orlando Merchán, Industrial Engineer

INTRODUCCIÓN

Actualmente, la Calidad de Servicio en el Sistema Eléctrico en la Superintendencia de Operaciones Apiay SOA, ha recobrado gran importancia debido al acelerado desarrollo de los sistemas de energía a nivel de consumo y la existencia de un incremento en la cantidad de cargas que se encuentran conectadas a la red eléctrica, la mayoría de éstas suelen ser sumamente sensibles; por esta razón y para minimizar los eventos no deseados, nace la imperiosa necesidad de implementar nuevos métodos para la planificación, diseño, operación y protección en los variadores de velocidad, alcanzando así altos niveles de calidad desde el punto de vista de desarrollo social y organizacional.

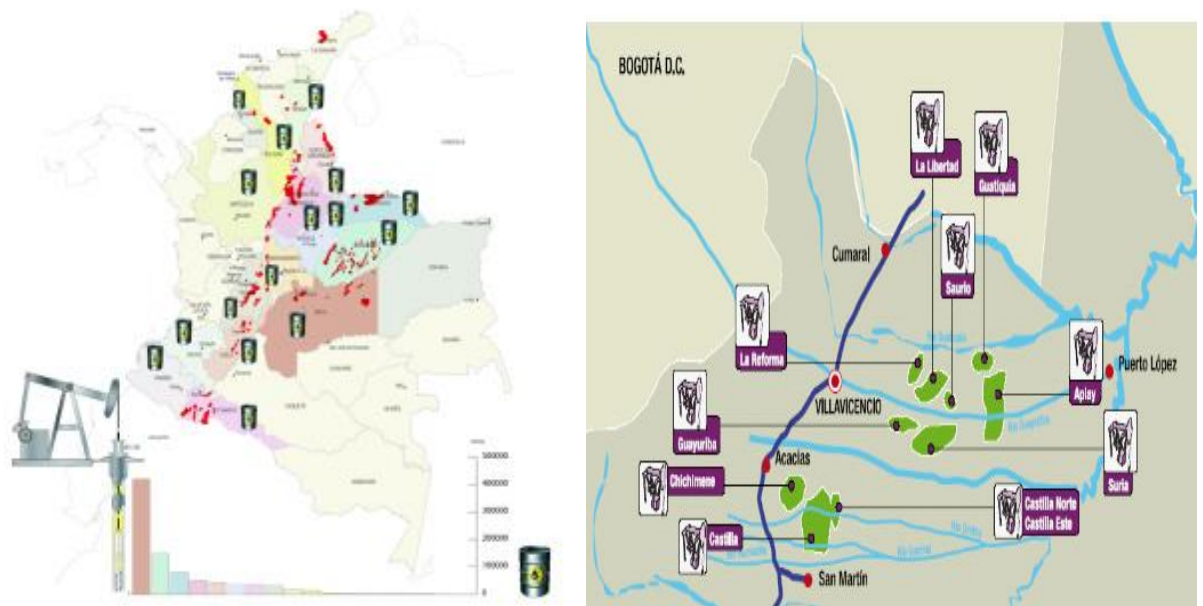
En el desarrollo del presente proyecto se tuvo como propósito fundamental mostrar la importancia de la aplicación de un Análisis de Causa Raíz (*RCA*, por sus siglas en inglés) como metodología para lograr un aumento en la Confiabilidad de los Variadores de Velocidad Centrifliff de la Superintendencia de Operaciones Apiay.

1. MARCO ORGANIZACIONAL

1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES APIAY

En la **figura 1**, se muestra la ubicación de la Superintendencia de Operaciones Apiay.

Figura 1. Ubicación geográfica de la Superintendencia de Operaciones Apiay.



Fuente: campos operados directamente por Ecopetrol en el Departamento del Meta. Consultado: 01 de septiembre de 2014. Disponible en: http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Meta_2004-2007/operacion.htm.

El Campo Apiay, en el Departamento del Meta, fue descubierto en 1981. Se encuentra ubicado a 32 Kilómetros de la ciudad de Villavicencio por la vía que conduce al municipio de Puerto López, Meta. En los 16 años de producción, los pozos del área de Apiay han generado regalías por 112.733 millones de pesos, de los cuales la Nación ha recibido 22.225 millones, el departamento 51.622 millones y los tres municipios productores 17.930 millones de pesos.

Actualmente, en el Campo Apiay se explotan los pozos Suria (con 29.000 barriles/día), Reforma (2.500 barriles/día) y Apiay (16.000 barriles/día). En producción de derivados de la zona de Apiay Ecopetrol explota 15 millones de pies cúbicos de gas por día, de los cuales, después de ingresar a la planta de proceso, entrega a la red domiciliaria de Villavicencio y Santafé de Bogotá unos 9 millones de pies cúbicos de gas seco por día. En Apiay, Ecopetrol también produce 1.200 barriles diarios de gas líquido (GLP).

1.2 VARIADORES DE VELOCIDAD CENTRIFUGA UBICADOS EN LA SUPERINTENDENCIA DE OPERACIONES APIAY

La Superintendencia de Operaciones Apiay cuenta con 90 pozos de producción de crudo por medio de lo que se denomina *levantamiento artificial*, lo cual consiste en levantar el fluido desde el fondo del pozo hasta el separador por medio de bombas electro-sumergibles. Para esta operación es necesario el uso de fuentes de energía alterna para alimentar los denominados *equipos de superficie*.

Figura 2. Equipos de superficie para un pozo productor de crudo con bombeo electro-sumergible.



Fuente: vista general de los componentes del sistema **BES**. Consultado: 01 de septiembre de 2014. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos63/bombeo-electrosumergible/bombeo-electrosumergible2.shtml>.

Los equipos de superficie instalados en pozo constan de un transformador reductor que reduce el voltaje de 34,5KV a 480V, un variador de frecuencia, un transformador elevador con multi-taps el cual eleva el voltaje necesario para la

alimentación de motor electro-sumergible, una caja de venteo que es la conexión del equipo de superficie con el equipo de fondo y finalmente el motor electro-sumergible.

Tabla 1. Ubicación de los Variadores Centrilit en el Campo Apiay.

POZO	DESCRIPCIÓN	POZO	DESCRIPCIÓN
AE2	Variador de Velocidad Centrilit	GY2	Variador de Velocidad Centrilit
AP20	Variador de Velocidad Centrilit	LB4	Variador de Velocidad Centrilit
AP22	Variador de Velocidad Centrilit	LBN1	Variador de Velocidad Centrilit
AP23	Variador de Velocidad Centrilit	LBN2	Variador de Velocidad Centrilit
AP24	Variador de Velocidad Centrilit	LBN7	Variador de Velocidad Centrilit
AP25	Variador de Velocidad Centrilit	PY1	Variador de Velocidad Centrilit
AP28	Variador de Velocidad Centrilit	S10	Variador de Velocidad Centrilit
AP3	Variador de Velocidad Centrilit	S13	Variador de Velocidad Centrilit
AP30	Variador de Velocidad Centrilit	S14	Variador de Velocidad Centrilit
AP32	Variador de Velocidad Centrilit	S16	Variador de Velocidad Centrilit
AP5	Variador de Velocidad Centrilit	S19	Variador de Velocidad Centrilit
AP6	Variador de Velocidad Centrilit	S20	Variador de Velocidad Centrilit
AP7	Variador de Velocidad Centrilit	S28	Variador de Velocidad Centrilit
APE4	Variador de Velocidad Centrilit	S31	Variador de Velocidad Centrilit
AU1	Variador de Velocidad Centrilit	S8	Variador de Velocidad Centrilit
AU2	Variador de Velocidad Centrilit	S9	Variador de Velocidad Centrilit
GT10	Variador de Velocidad Centrilit	SS12	Variador de Velocidad Centrilit
GT11	Variador de Velocidad Centrilit	SS15	Variador de Velocidad Centrilit
GT12	Variador de Velocidad Centrilit	SS16	Variador de Velocidad Centrilit
GT15	Variador de Velocidad Centrilit	SS17	Variador de Velocidad Centrilit
GT5	Variador de Velocidad Centrilit	SS18	Variador de Velocidad Centrilit
GT6	Variador de Velocidad Centrilit	SS19	Variador de Velocidad Centrilit
GT7	Variador de Velocidad Centrilit	SS21	Variador de Velocidad Centrilit
GV1	Variador de Velocidad Centrilit	SS22	Variador de Velocidad Centrilit
GV10	Variador de Velocidad Centrilit	SS23	Variador de Velocidad Centrilit
GV11	Variador de Velocidad Centrilit	SS27	Variador de Velocidad Centrilit
GV4	Variador de Velocidad Centrilit	SS3	Variador de Velocidad Centrilit
GV5	Variador de Velocidad Centrilit	SS4	Variador de Velocidad Centrilit
GV8	Variador de Velocidad Centrilit	SS5	Variador de Velocidad Centrilit
GY1	Variador de Velocidad Centrilit	SS8	Variador de Velocidad Centrilit

Convenciones: AE= Apiay Este; AP= Apiay; GT= Guatiquia; GV= Gavan; GY= Guayuriba; LB= Libertad; LBN= Libertad Norte; PY= Pompeya; S= Suria; SS= Suria Sur.

Fuente: Confipetrol S.A. (2014).

De los 90 pozos de producción, 60 tienen entre sus equipos de superficie *Variadores marca Centrilift*, su función es controlar la velocidad rotacional de un motor de inducción eléctrica para la extracción del crudo, en la Tabla 1, se muestra la ubicación de los Variadores Centrilift en los pozos de producción de crudo de la Superintendencia de Operaciones Apiay.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.3.1 Planteamiento del Problema. Los sistemas de distribución eléctrica, ocasionalmente se ven afectados por perturbaciones aleatorias, que generan una menor calidad en la señal de alimentación suministrada; esta señal debe ser idealmente una onda de tensión senoidal pura con una frecuencia constante. Sin embargo, en la realidad esto no sucede, ya que la onda de tensión se ve perturbada por fallas en los centros de generación y/o distribución, por impulsos eléctricos, variaciones rápidas o lentas de tensión, parpadeos (*flickers*), distorsiones armónicas, variaciones de frecuencia o, principalmente, por descargas atmosféricas.

Actualmente, en la Superintendencia de Operaciones Apiay, los variadores de velocidad o de frecuencia se ven afectados por las perturbaciones aleatorias inherentes a la red eléctrica de Ecopetrol, trayendo como consecuencia principal: pérdidas económicas importantes de producción, ocasionadas a partir de las paradas inesperadas en estos equipos.

Los variadores requieren un método de mantenimiento con el cual se logre aumentar su disponibilidad y confiabilidad, disminuyendo las *diferidas de producción*.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General. Aplicar el método RCA para los pozos de producción de crudo con sistema de bombeo electro-sumergible para aumentar su disponibilidad y confiabilidad, reduciendo las *diferidas de producción*, debido a paradas inesperadas por causa de perturbaciones aleatorias en la red eléctrica.

1.4.2 Objetivos Específicos.

- Realizar el levantamiento de la información sobre las diferentes causas de las *diferidas* en los Pozos de producción de crudo de la Superintendencia de Operaciones Apiay, y determinar cuáles son ocasionadas debido a perturbaciones eléctricas aleatorias que afectan la disponibilidad de los pozos de producción de crudo.

- Establecer los costos de cada una de las *diferidas* detectadas.
- Aplicar la metodología de Análisis de Causa Raíz (*RCA*).

1.4.3 Justificación. Con esta investigación se pretende mejorar la confiabilidad y disponibilidad en los variadores de velocidad, profundizando en un análisis económico para optimizar los recursos y reducir las *diferidas* por perturbaciones eléctricas aleatorias.

Como carácter metodológico se espera que el resultado del estudio contribuya a reducir las pérdidas económicas causadas por las perturbaciones aleatorias en la red eléctrica a partir de la formulación de un plan de mejora.

Se pretende utilizar la metodología del *RCA* con el objetivo de identificar el *mal actor* que ocasiona la falla en los variadores de velocidad Centrilift; una vez identificada, crear una estrategia para minimizar el número de fallas; reduciendo así las *diferidas* de producción y logrando una mayor confiabilidad y disponibilidad en los equipos.

2. MARCO TEÓRICO

A continuación, el grupo investigador presenta una definición clara y breve de los diferentes conceptos utilizados a lo largo del desarrollo del presente proyecto.

2.1 PERTURBACIÓN ALEATORIA

Es una distorsión pasajera en la red eléctrica, la cual tiene su origen en los elementos que constituyen la red. La consecuencia típica de estas perturbaciones es una caída de tensión transitoria, y en ocasiones un corte más o menos prolongado en algunas zonas de la red. Estas fallas pueden ser originadas por maniobras realizadas en la red, por descargas eléctricas atmosféricas, cortocircuitos, variaciones bruscas de carga en las líneas de tensión, transformadores cables, etc. o en la propia instalación.

2.2 DISPONIBILIDAD DE EQUIPOS

El principal objetivo de la disponibilidad de un equipo es desempeñar una función requerida bajo determinadas condiciones, en un momento determinado o durante un intervalo de tiempo específico; asegurando estándares de calidad, seguridad, y medio ambiente.

La filosofía de las técnicas de mantenimiento tiene como base detectar, o eliminar las causas que originan las fallas en los equipos por medio de metodologías como el Análisis de Causa Raíz, logrando eliminar el mal actor y aumentando la confiabilidad, la seguridad y la disponibilidad, a la vez que se reducen los costos de mantenimiento.

Para lograr un total control, se deben garantizar las cuatro áreas fundamentales de la confiabilidad operacional: confiabilidad en los procesos mediante una integridad operativa, confiabilidad humana a través de la competencia y el entrenamiento, confiabilidad en el diseño y confiabilidad en los equipos.

2.3 CONFIABILIDAD DE EQUIPOS

Es una de las formas de maximizar la confiabilidad operacional logrando resultados de mejora en procesos y optimizando costos mediante diferentes técnicas de mantenimiento que mejoran la disponibilidad de los equipos mediante análisis de probabilidad de falla, logrando de esta manera que los equipos cumplan con su función y un óptimo desempeño para lo cual fueron diseñados.

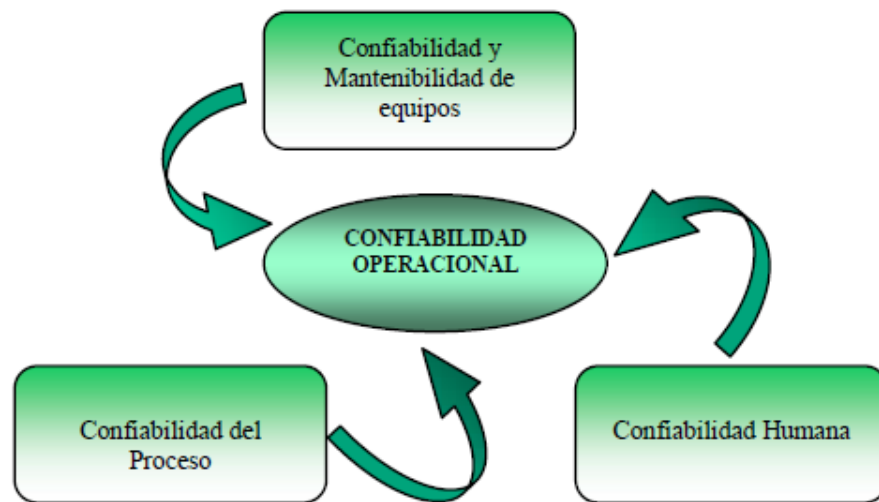
2.4 CONFIABILIDAD OPERACIONAL

Este concepto lleva implícita la capacidad de una instalación (procesos, tecnología, personas), para cumplir su función, o el propósito que se espera de ella, dentro de sus límites de diseño y bajo un específico contexto operacional. Incorpora en forma sistemática avanzadas herramientas de diagnóstico, metodologías de análisis y nuevas tecnologías, para optimizar la gestión, planeación, ejecución y el control de la producción.

2.5 HERRAMIENTAS DE CONFIABILIDAD OPERACIONAL

La confiabilidad como metodología de análisis debe soportarse sobre una serie de herramientas que permitan evaluar y poder determinar el nivel de operatividad, la magnitud del riesgo y las demás acciones de mantenimiento que se requiere para asegurar el activo.

Figura 3. Aspectos de la Confiabilidad Operacional.



Fuente: Los tres aspectos de la Confiabilidad Operacional. Consultado: 01 de septiembre de 2014. Disponible en: http://virtual.uptc.edu.co/drupal/files/112_ind_mant_gestion.pdf.

A continuación se presentan las principales herramientas utilizadas para determinar y garantizar la Confiabilidad Operacional.

2.5.1 Análisis de Criticidad, (CA). Es una metodología que permite establecer jerarquías entre instalaciones, sistemas, equipos y los elementos de un equipo en función con su impacto total sobre el negocio, obtenido del producto de la frecuencia de fallas por la severidad de su ocurrencia, sumándole sus efectos en la población, daños al personal, impacto ambiental, pérdida de producción y daños en la instalación.

Además, apoya la toma de decisiones para administrar esfuerzos en la gestión de mantenimiento, ejecución de proyectos de mejora, rediseños con base en el impacto en la confiabilidad actual y en los riesgos.

2.5.2 Inspección Basada en Riesgo, (RBI). Es una metodología que permite determinar la probabilidad de fallas de un equipo y la consecuencia que estas pudieran generar sobre la gente, el ambiente y los procesos.

2.5.3 Análisis de Modo y Efectos de Falla, (FMEA). Es una herramienta clave para mejorar la confiabilidad de procesos y productos. Esta metodología FMEA (*Failure Mode and Effects Analysis*), proporciona la orientación y los pasos para determinar los modos de falla potenciales de los componentes de un sistema. A partir de lo anterior, se establecen prioridades y se deciden acciones para intentar eliminar o reducir la posibilidad de que ocurran las fallas potenciales que más vulneran la confiabilidad del producto o el proceso.

2.5.4 Análisis de Causa Raíz, (RCA). Es una herramienta sistemática que se aplica con el objetivo de determinar las causas que originan las fallas, sus impactos y frecuencias de aparición para luego mitigarlas o eliminarlas totalmente en lugar de corregir los síntomas. Esta técnica puede ser empleada para analizar cualquier tipo de falla. Utiliza la lógica deductiva y un árbol lógico de falla.

2.5.4.1 Objetivo del RCA. Esta herramienta permite detectar:

- **Causas raíz física:** todas aquellas situaciones o manifestaciones de origen físico que afectan la continuidad operativa de los equipos o plantas.
- **Causas raíz humana:** errores cometidos por el factor humano y que inciden directa o indirectamente en la ocurrencia de la falla.
- **Causas raíz latente:** todos aquellos problemas que aunque nunca hayan ocurrido, es factible su ocurrencia.

2.5.4.2 Beneficios del RCA.

- Determina cuáles son las verdaderas raíces de la falla.
- Disminuye la repetitividad de fallas.
- Disminuye los impactos operacionales.
- Reduce las consecuencias en seguridad y medio ambiente.
- Optimiza los costos.
- Proporciona la capacidad de reconocer un patrón de fallas y evita la repetición de las mismas.
- Aumenta la confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad de los equipos.
- Mejora las condiciones de seguridad industrial y evita tiempos improductivos innecesarios.
- Disminuye el número de incidentes, reduce los impactos ambientales y los accidentes.
- Reduce las frustraciones del personal de mantenimiento y operaciones.

2.5.4.3 Limitantes del RCA.

- Disponibilidad del personal.
- Desconocimiento del líder del proceso.
- Entrenamiento técnico inadecuado a los integrantes del equipo de mantenimiento.
- Deficiencias en los procedimientos.
- Insuficiente Información sobre fallas en los equipos.
- Deficiente disciplina al interior del grupo RCA.

2.6 ÁRBOL LÓGICO DE FALLA

Es una herramienta que se utiliza para localizar e identificar los factores que causan o tienen el potencial de contribuir con la ocurrencia de un evento y poder prevenir la falla antes de que ocurra.

2.6.1 Beneficios del Árbol Lógico.

- Permite evaluar y mejorar la fiabilidad general del sistema.
- Evalúa la eficiencia y la necesidad de redundancia.

2.6.2 Limitantes del Árbol Lógico.

- El evento no deseado que se está evaluando tiene que ser previsto y todos los factores contribuyentes a la falla tienen que ser anticipados.

2.7 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE FALLAS

Son procedimientos para extraer las fallas a través de análisis cualitativos y cuantitativos que se evidencian mediante investigaciones y planteamiento de hipótesis con el fin de obtener resultados.

Estos métodos pretenden extraer la mayor información de los datos con el objetivo de conocer lo que está sucediendo, poder comprenderlo y explicarlo. Los métodos inductivos, generalmente, son asociados a la investigación cualitativa, mientras que los métodos deductivos son asociados a la investigación cuantitativa.

2.7.1 Métodos Cuantitativos. Se basan en el estudio de la estadística e indicadores asociados al proceso evaluado, siendo usual el modelo matemático riguroso para la presentación y el análisis de datos por medio de la representación gráfica. Su fundamento es encontrar la probabilidad de ocurrencia de fallas y pronosticar lo que pueda suceder en el futuro para la toma de decisiones.

2.7.2 Métodos Cualitativos. Son sistemáticos, con un procedimiento claro a seguir y generalmente se utilizan para encontrar las causas que originan las fallas en los procesos, sistemas o equipos mediante técnicas de observación y verificación.

3. VARIADORES DE VELOCIDAD CENTRILIFT

El principio básico del variador es transformar la energía eléctrica de frecuencia industrial en energía eléctrica de frecuencia variable para modificar la velocidad de una carga conducida, como la utilizada en electro-bombas, ventiladores, compresores, transportadores entre otras, con el fin de asegurar la exactitud requerida por el proceso. Esta variación de frecuencia se consigue mediante tres etapas en serie. Una primera etapa rectificadora o convertora que transforma la corriente alterna en continua (A.C. a D.C), una segunda etapa la cual consiste en filtrar el rizado del voltaje del *BUS DC*, y una tercera etapa que transforma la corriente continua en alterna (D.C. a A.C), con una frecuencia y una tensión regulables, la cual es llamada etapa inversora.

Figura 4. Variador de Velocidad Centrilit.

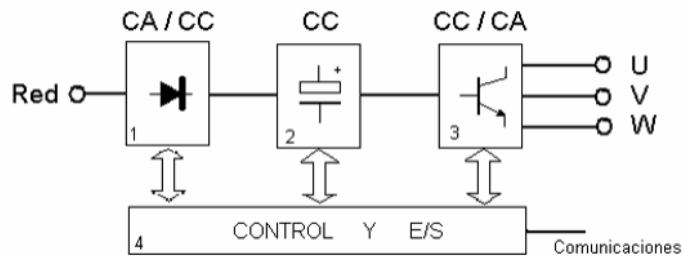


Fuente: tomado de “Manual del Variador Electrónico de Velocidad, Serie 3”. 2014. Disponible en:
<https://www.automationdirect.com/static/manuals/g3msp/g3msp.html>.

3.1 ETAPA CONVERSORA

La sección convertora consiste en SCR's (*Rectificadores Controlados de Silicio*), conectados en configuración puente rectificador trifásico de onda completa. En esta sección además de rectificarse la potencia trifásica de entrada, se regula el voltaje del *BUS DC*. Este tipo de convertor comúnmente es conocido como convertor controlado o simplemente convertor a SCR's.

Figura 5. Etapas del variador de velocidad.

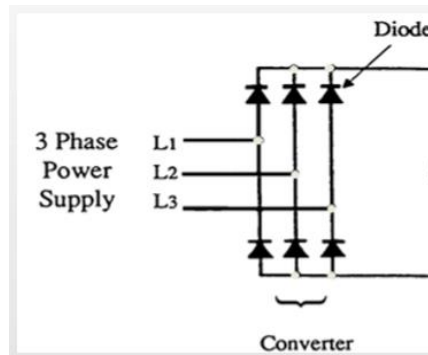


Fuente: Variadores S.A. (2011). Principio del Variador de frecuencia.

El fenómeno de la rectificación se da porque los diodos van conmutando cíclicamente al circuito de C.C. (*Corriente Continua*), sobre las fases de C.A. (*Corriente Alterna*). Es la tensión de esta red la que va forzando el paso a conducción o bloqueo de los diodos. Si sólo se rectifican las semiondas positivas de la tensión alterna se tiene un montaje de media onda y si se rectifican ambas semiondas, se tiene un montaje de onda completa.

El conversor a SCR's es controlado por la tarjeta *System Control Board*. En los Variadores de más potencia, los SCR's conversores se conectan en paralelo para alcanzar las corrientes requeridas y se emplea otro tipo de *Converter Control Board* que proporciona las conexiones de disparo a las compuertas adicionales.

Figura 6. Etapas de un conversor.



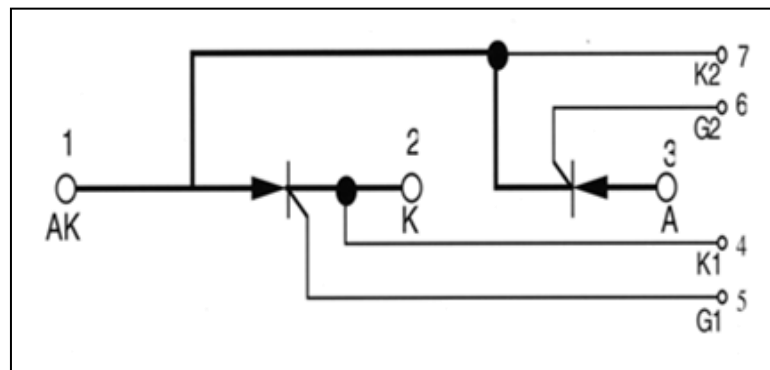
Fuente: Variadores S.A. (2011). Principio del Variador de frecuencia.

- **Rectificador Controlado de Silicio, SCR (*Silicon Controlled Rectifier*).** Es un semiconductor que presenta dos estados estables: en uno conduce, y en

otro está en corte (bloqueo directo, bloqueo inverso y conducción directa); estos dispositivos son empleados como mecanismo de control.

El objetivo del rectificador es retardar la entrada en conducción del mismo, ya que este se hace conductor no sólo cuando la tensión en sus bornes se hace positiva (tensión de ánodo mayor que tensión de cátodo), sino, cuando siendo esta tensión positiva, se envía un impulso a puerta, por lo que pasa corriente sólo durante los semiciclos positivos de la fuente de C.A. El semiciclo positivo es el semiciclo en que el ánodo del SCR es más positivo que el cátodo, esto significa que el SCR no puede estar encendido más de la mitad del tiempo, durante la otra mitad del ciclo, la polaridad de la fuente es negativa, y esta polaridad negativa hace que el SCR tenga polarización inversa, evitando el paso de cualquier corriente a la carga.

Figura 7. Esquema con SCR.



Fuente: Variadores S.A. (2011). Principio del Variador de frecuencia.

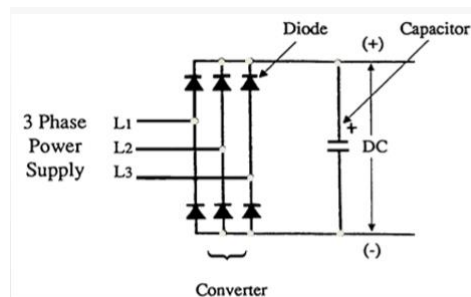
3.2 ETAPA DE FILTRADO

La etapa central denominada etapa de filtrado o circuito intermedio de continua cuya función es alimentar la tercera etapa, y esto puede hacerlo funcionando como fuente de tensión, en cuyo caso se colocaría un condensador electrostático entre los terminales (+) y (-) para mantener constante la tensión cuando el circuito intermedio funciona como fuente de intensidad para la etapa inversora, se pone una inductancia en serie con una de sus ramas, su función es mantener constante la intensidad.

3.2.1 Condensadores del BUS D.C. Son utilizados para eliminar o filtrar el rizado de voltaje, para obtener un valor de tensión continua y estable.

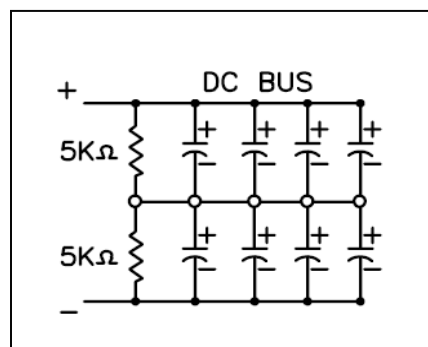
Estos condensadores se encuentran en parejas conectadas en serie para soportar los voltajes manejados; las parejas se encuentran en paralelo entre sí para lograr las capacitancias requeridas (módulos de 8 condensadores).

Figura 8. Etapas de Filtrado.



Fuente: Variadores S.A. (2011). Principio del Variador de frecuencia.

Figura 9. Esquema de conexión de los condensadores.



Fuente: Variadores S.A. (2011). Principio del Variador de frecuencia.

3.2.2. Resistencia de absorción. Estas resistencias son instaladas en paralelo al banco capacitivo con el objetivo de asegurar que ninguno de los condensadores tenga más del 50% del voltaje del BUS D.C. sobre sí.

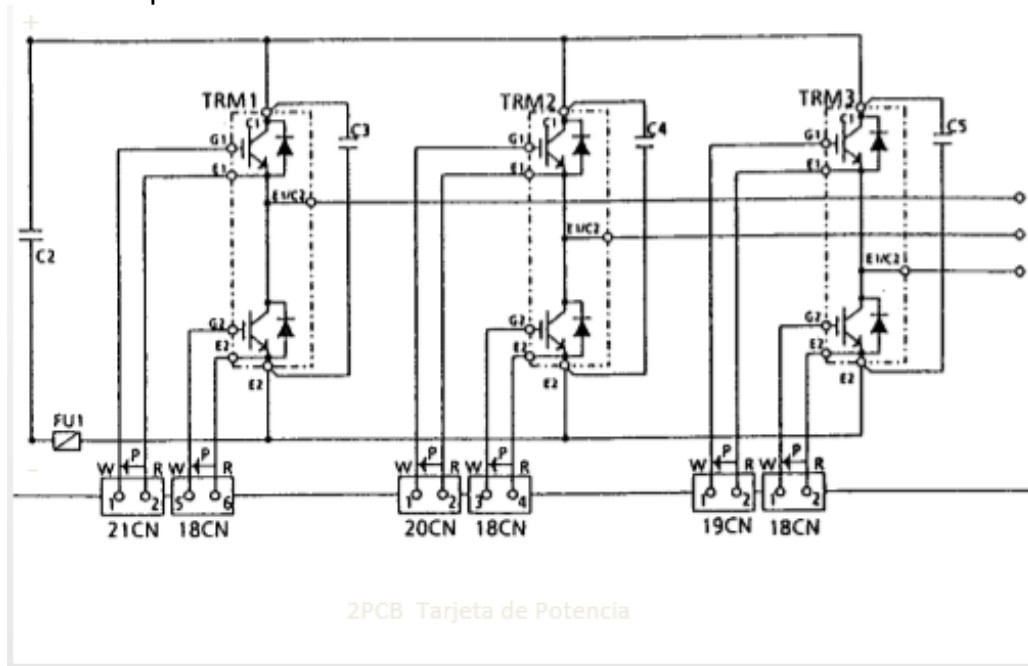
3.2.3 Inductores. Son utilizados para eliminar o filtrar el rizado de voltaje, para obtener un valor de tensión continua y estable, a la vez, reservar energía suficiente que proporcionar la potencia requerida por el motor y para ello se emplea múltiples inductores en paralelo.

Figura 10. Fotografía de un Inductor para variador Centrilift



Fuente: Confipetrol, Campo Apiay.

Figura 11. Etapa Inversora.



Fuente: Variadores S.A. (2011). Principio del variador de frecuencia.

3.3 Etapa inversora. El inversor es un conmutador electrónico que comunica alternativamente la tensión o intensidad continua del circuito intermedio sobre las fases del motor de CA conectado a su salida, para lograr que las ondas de tensión a la salida hagan que las corrientes absorbidas se acerquen más o menos al sistema trifásico senoidal. Esto se logra a través del transistor bipolar de puerta aislada (*IGBT*).

- **Transistor Bipolar de Puerta Aislada (*IGBT*).** El IGBT es un dispositivo semiconductor de cuatro capas que se alternan (*PNPN*) que son controlados por un metal-óxido-semiconductor (*MOS*), estructura de la puerta sin una acción regenerativa.

En la figura 12 se observa la estructura interna de un IGBT, el mismo cuenta con tres pines: Puerta (**G**), Emisor (**E**) y Colector (**C**).

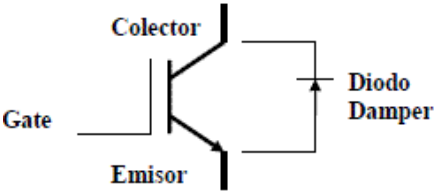
Cuando se le es aplicado un voltaje V_{GE} a la puerta, el IGBT enciende inmediatamente, la corriente de colector I_C es conducida y el voltaje V_{CE} se va desde el valor de bloqueo hasta cero. La corriente I_C persiste para el tiempo de encendido en que la señal en la puerta es aplicada. Para encender el IGBT, el terminal **C** debe ser polarizado positivamente con respecto a la terminal **E**. La señal de encendido es un voltaje positivo V_G que es aplicado a la puerta **G**.

Este voltaje, si es aplicado como un pulso de magnitud aproximada de 15 Voltios, puede causar que el tiempo de encendido sea menor a 1 s, después de lo cual la corriente de colector I_D es igual a la corriente de carga I_L (asumida como constante). Una vez encendido, el dispositivo se mantiene así por una señal de voltaje en **G**. Sin embargo, en virtud del control de voltaje la disipación de potencia en la puerta es muy baja.

El IGBT se apaga simplemente removiendo la señal de voltaje V_G de la terminal **G**. La transición del estado de conducción al estado de bloqueo puede tomar apenas 2 microsegundos, por lo que la frecuencia de conmutación puede estar en el rango de los 50 KHz.

EL IGBT requiere un valor límite V_{GE} (**TH**) para el estado de cambio de encendido a apagado y viceversa. Este es usualmente de 4 V. Arriba de este valor el voltaje V_{CE} cae a un valor bajo cercano a los 2 V. Como el voltaje de estado de encendido se mantiene bajo, el **G** debe tener un voltaje arriba de 15 V, y la corriente I_C se auto limita.

Figura 12. Esquema del IGBT.



Fuente: Variadores S.A. (2011). Principio del Variador de frecuencia.

4. ANÁLISIS DE DATOS

El **CMMS Mincom Ellipse**, programa Corporativo de Ecopetrol, fue la fuente de la información y de los datos a analizar en esta investigación.

4.1 SISTEMA DE INFORMACIÓN

Ellipse, es la herramienta del Sistema Computarizado para la Gestión de Mantenimiento (*CMMS: Computerized Maintenance Management System*), es utilizado por toda la organización de Ecopetrol S.A. para la gestión de mantenimiento, su manejo permite el desarrollo de actividades de planeación control y análisis de mantenimiento.

Este sistema de información se encuentra integrado por módulos de trabajo que cumplen diversas funciones en el registro y control de las actividades de mantenimiento. El MSQ 600 es el modulo utilizado para el registro de tiempos de paradas de los equipos para posteriormente ser analizados por el personal de mantenimiento.

4.2 RECOLECCIÓN DE DATOS

La información sobre las fallas o eventos generados en los variadores de velocidad de la Superintendencia de Operaciones Apiay, son registradas diariamente en el CMMS, una vez se presente el evento esta información es utilizada para hacer un análisis e identificar las principales fallas que afectan el óptimo funcionamiento de los variadores, luego se realiza un diagrama de Pareto con el cual se identificara el 20 % de las fallas que causaron el 80% de los problemas. A la falla identificada con el análisis cuantitativo (en el diagrama de Pareto) se aplica un método *Análisis Causa Raíz (RCA)* para conocer y eliminar la verdadera causa que la originó.

Los datos evaluados para este análisis fueron 11684 eventos generados desde el día 2 de julio de 2011 al 21 de junio de 2014.

La siguiente tabla muestra un porcentaje de los registros de falla que se han presentado en Superintendencia de Operaciones Apiay y se han cargado en Ellipse

Tabla 2. Fallas o eventos generados en los variadores de velocidad de la Superintendencia de Operaciones Apiay

POZO		FECHA		HORAS SERVICIO		HORAS FUERA SERVICIO		DIFERIDA		CODIGO DE FALLA		DESCRIPCION CODIGO FALLA		NUMERO PARADA		ORIGEN DEL EVENTO		DESCRIPCIÓN	
SURIA-16		SURIA-16		03/10/2012		7		17		563,3		FSEN		Falla suministro de energía		DESCO- NOCIDO		Se encuentra en proceso de verificación por parte de los ingenieros de Ecopetrol.	
GAVAN-4		GAVAN-4		06/12/2012		0		24		534,91		FSEN		Falla suministro de energía		EMSA		(01:44:53) Por descargas atmosféricas dispara línea OCOA-SUR de EMSA, lo cual ocasiona 27-ABC del 81% durante 541ms que deslastró 20MW en la SCC y 10M W en la SOA.	
GUATIQUEJIA-7		GUATIQUEJIA-7		21/02/2013		4,5		19,5		374,56		FSEN		Falla suministro de energía		EMSA		(05:30:12) Debido a la salida de la Subestación Ocoa-EMSA se presenta Blackout total, EMSA reporta que se estaba realizando maniobras en esta subestación para ajuste de la protección diferencial de barras 115 kV. Con los siguientes eventos: Diferida 11.700 barriles en la SCC y 1.126 barriles en la SOA.	
SURIA-16		SURIA-16		20/11/2012		17		7		286,15		FSEN		Falla suministro de energía		EMSA		(01:08:44) Se presenta falla monofásica (AG) en EMSA (reportan salida de la línea Reforma-Ocoa 2 por explosión de CT de esta línea en la subestación Reforma), este evento genera una subtenión en las redes de la GEC del 65% durante 175 ms, deslastrando aprox. 12 MW en la SCC y 2 MW en la SOA.	

SURIA-16	GUATIQUEIA-7	GAVAN-9	APIAY-9	SURIA-16	APIAY-9	POZO
FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA
HORAS SERVICIO	HORAS SERVICIO	HORAS SERVICIO	HORAS SERVICIO	HORAS SERVICIO	HORAS SERVICIO	HORAS SERVICIO
HORAS FUERA SERVICIO	HORAS FUERA SERVICIO	HORAS FUERA SERVICIO	HORAS FUERA SERVICIO	HORAS FUERA SERVICIO	HORAS FUERA SERVICIO	HORAS FUERA SERVICIO
DIFERIDA	DIFERIDA	DIFERIDA	DIFERIDA	DIFERIDA	DIFERIDA	DIFERIDA
CODIGO DE FALLA	CODIGO DE FALLA	CODIGO DE FALLA	CODIGO DE FALLA	CODIGO DE FALLA	CODIGO DE FALLA	CODIGO DE FALLA
DESCRIPCION CODIGO FALLA	DESCRIPCION CODIGO FALLA	DESCRIPCION CODIGO FALLA	DESCRIPCION CODIGO FALLA	DESCRIPCION CODIGO FALLA	DESCRIPCION CODIGO FALLA	DESCRIPCION CODIGO FALLA
NUMERO PARADA	NUMERO PARADA	NUMERO PARADA	NUMERO PARADA	NUMERO PARADA	NUMERO PARADA	NUMERO PARADA
ORIGEN DEL EVENTO	ORIGEN DEL EVENTO	ORIGEN DEL EVENTO	ORIGEN DEL EVENTO	ORIGEN DEL EVENTO	ORIGEN DEL EVENTO	ORIGEN DEL EVENTO
DESCRIPCION	DESCRIPCION	DESCRIPCION	DESCRIPCION	DESCRIPCION	DESCRIPCION	DESCRIPCION
11/01/2013	08/04/2013	07/03/2014	11/03/2012	02/10/2012	26/11/2012	APIAY-9
18	10,75	4	10	16	17,5	
6	13,25	20	14	8	6,5	
208,38	254,44	254,7	256,2	265,08	270,18	
FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	
Falla suministro de energia	Falla suministro de energia	Falla suministro de energia	Falla suministro de energia	Falla suministro de energia	Falla suministro de energia	
505	580	923	220	382	441	
FAUNA - AVES	FAUNA - AVES	DESCARGA ATMOSF.	ESTRUCTURA	DESCO- NOCIDO	PROTECCIONES	
(10:04:42) Dispara con recierre exitoso circuito P1-CDA por falla bifásica a tierra (50-BCG), despejada en 258 ms y con corrientes de 1650 y 1420 A. Causada por un ave (chulo) en la estructura P1-41-T2.	(10:52:17) A causa de ruido de ave en RC de A25 dispara con recierre exitoso RC de A23, registrando falla bifásica a tierra (50-ABG) con corriente de 1639 A durante 153 ms. Deslastrando 4 MW en la SOA	(04:57:10) Por descargas atmosféricas interruptor en ambos extremos TEO-CDO por falla trifásica (67-ABC) operando Z1. Con corrientes de falla IA=4189 A, IB=4420 A, IC=4311 A, IN=172 A, despejada en 83 ms y localizada a 11,4 km de TEO a CDO. Quedando 7 MW en la GEC.	(14:00:00) se realiza maniobra para normalizar cargas entre los Ctos P1-P2-CDA. Diferida 27 1 bbl	(15:55:26) Dispara con recierre exitoso circuito P4-CDS por falla monofásica (51-BG) despejada en 333 ms, registra corriente de 2293 A. Deslastra 6 MW en la SOA. Causa no identificada.	01:27:34 A partir de esta hora se presentan 5 Disparos con recierre exitoso del circuito P1-CDA por falla monofásica, despejadas en 258 ms. Deslastra 6 MW en la SOA. A las 02:09:07 se presenta el último disparo quedando abierto el Interruptor principal. Se realizan maniobras abriendo el RCI del A23 para aislar la falla y transferir la carga al Cto P2-CDA, estas fueron causadas por fallas en el pósito del transformador respaldo de Aspersión Ocoa. 07:22:00 Cerrado remotamente, alimentado sólo el pozo A9. Diferida de 1183 barriles.	

APIAY-24	SURIA SUR-1	APIAY-9	POZO
10/03/2012	03/12/2012	22/07/2012	FECHA
15,17	0	13	HORAS SERVICIO
8,83	24	11	HORAS FUERA SERVICIO
203,09	205,2	208,24	DIFERIDA
FSEN	FSEN	FSEN	CODIGO DE FALLA
Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	DESCRIPCION CODIGO FALLA
219	449	311	NUMERO PARADA
ESTRUCTURA	FAUNA - ANIMALES	VEGETACIÓN	ORIGEN DEL EVENTO
(05:02:59) Debido a falla en cortacircuitos del Trafo de respaldo que alimenta bombas de aspersión Ocoa, dispara INT principal Cto P1-CDA e intercala al recierre en 5s, opero 51-AG durante 353ms, registrando IA= 1801 A IG= 1 345 A. Deslastro 4MW en la SOA.	(04:33:44) Debido a una rana en el SDT ØA del pozo S28, dispara Cto EBA-CDS; intercala al recierre en 8s opera 50-BG durante 129ms, registra IB=2460 A. Deslastro 11.5 MW en la SOA. Diferida 224 bbl	(08:33:28) Posiblemente por acercamiento de árboles dispara con recierre exitoso del interruptor principal del Cto P2-CDA, por falla monofásica (opera 51-CG) con corriente de falla de 1684 A, duración de 250ms, falla ubicada antes del reconnector del Gavan 1, deslastra 3.5 MW en la SOA. Diferida 358 barriles.	DESCRIPCIÓN

APIAY-9	GUATIQUIA-19	GUATIQUIA-19	GUATIQUIA-19	SURIA-16	POZO
13/05/2014	17/06/2013	31/07/2013	17/03/2013	17/03/2013	FECHA
9	4	10,17	20	20	HORAS SERVICIO
15	20	13,83	4	4	HORAS FUERA SERVICIO
178,25	181,33	191,68	194,69	194,69	DIFERIDA
FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	CODIGO DE FALLA
Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	DESCRIPCION CODIGO FALLA
983	657	715	560	560	NUMERO PARADA
FAUNA - ANIMALES	DESCONOCIDO	AISLADOR	ESTRUCTURA	ESTRUCTURA	ORIGEN DEL EVENTO
(01:45:56).Debido a una culebra dispara RCP cto Suria-CDS con recierre exitoso a los 5sg, por falla monofásica (51-BG), corriente de falla de IB=1279A, duración de 650ms, deslustra 6MW en la SOA, falla ubicada en la estructura R4- frente a la portería 1.	(04:02:27) En el Cto P1-CDA Dispara con recierre exitoso RCI asociado al pozo A23 por falla Bifásica (50-AB) despejada en 154 ms y corrientes de 1741 A y 1721 A. Deslustra 3.5 MW en la SOA. No se identificó la causa.	(10:10:41) Se presenta disparo en el RCP SURIA-CDS Intercala al recierre en 11s; opera 51AB durante 792 ms, registrando IA=1565, IB=1402. Se deslastro 12 MW en la SO. Evento debido a actividades de descapote cerca al pozo A18. .	(07:38:30) Por falla en circuito SURIA-CDS dispara por AT y BT el transformador TR01-CDS despejado la falla de este Cto, opera elemento 51-fase B con relé 86, duración 252 ms y deslustrando 11MW en la SOA. Se coordinan maniobras para normalizar la tensión en la Barra 1 del CDS pero se presenta salida del TR02-CDS al persistir la falla en el Cto Suria-CDS con deslastre de 9MW en la SOA. El RCP del Cto Suria registra falla monofásica 51-BG Con corriente de 1529 A. 08:00:00 Se normaliza el transformador TR02-CDS y los Ctos P3/P4/P5 y EBA. 08:15:00 se normaliza TR01-CDS por AT y BT. Se realizan maniobras para normalizar pozos de Aplay a través del Cto P3-CDS. Se hizo recorrido del circuito SURIA-CDS, encontrando inicialmente una rama sobre la estructura SU-47, a las 10:44:00 se intenta habilitar el circuito Suria-CDS pero la falla sigue; Con la prueba anterior, se detecta falla en un DPS en la estructura R4 del ramal que va hacia los pozos Aplay Este 2 y 3. Se reemplaza el DPS y sobre las 11:30:00 se normaliza la carga del circuito Suria-CDS.	DESCRIPCIÓN	

SURIA SUR-36H	GUATIQUIA-19	SURIA SUR-19	SURIA-16	GAVAN-4	POZO
FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA	FECHA
HORAS FUERA SERVICIO	HORAS FUERA SERVICIO	HORAS FUERA SERVICIO	HORAS FUERA SERVICIO	HORAS FUERA SERVICIO	HORAS FUERA SERVICIO
DIFERIDA	DIFERIDA	DIFERIDA	DIFERIDA	DIFERIDA	DIFERIDA
CODIGO DE FALLA	CODIGO DE FALLA	CODIGO DE FALLA	CODIGO DE FALLA	CODIGO DE FALLA	CODIGO DE FALLA
DESCRIPCION CODIGO FALLA	DESCRIPCION CODIGO FALLA	DESCRIPCION CODIGO FALLA	DESCRIPCION CODIGO FALLA	DESCRIPCION CODIGO FALLA	DESCRIPCION CODIGO FALLA
NUMERO PARADA	NUMERO PARADA	NUMERO PARADA	NUMERO PARADA	NUMERO PARADA	NUMERO PARADA
ORIGEN DEL EVENTO	ORIGEN DEL EVENTO	ORIGEN DEL EVENTO	ORIGEN DEL EVENTO	ORIGEN DEL EVENTO	ORIGEN DEL EVENTO
DESCRIPCION	DESCRIPCION	DESCRIPCION	DESCRIPCION	DESCRIPCION	DESCRIPCION
07/03/2014	17/02/2012	05/11/2011	04/10/2012	15/12/2013	
6	18	6	19	9	
18	6	18	5	15	
154,8	160,8	162,75	165,68	173,95	
FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	
Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	
923	208	132	384	884	
DESCARGA ATMOSF	DESCONOCIDO	LÍNEA	TERMICAS	EMSA	
(04:57:10) Por descargas atmosféricas Dispara interruptor en ambos extremos TEO-CDO por falla trifásica (67-ABC) operando Z1. Con corrientes de falla IA=4189 A, IB=4420 A, IC=4311 A, IN=172 A, despejada en 83 ms y localizada a 11,4 km de TEO a CDO. Quedando 7 MW en la GEC.	(22:45:32) Dispara y queda abierto RC de A28 por falla bifásica a tierra (50-ABG) despejada en 100 ms. No se puede cerrar este RC, se inspecciona el circuito P1-CDA y se procede a cerrar el RC de GT7 normalizando la carga de este circuito por P2-CDA a las 00:56. Deslastra 3.8 MW en la SOA. Causa de falla pendiente.	(05:32:52) Debido a rotura del cable de guarda frente al S3, dispara reconector principal Cto P5-CDS realiza recierre y queda abierto al persistir la falla, Opera 50-BG durante 241ms deslastra en la SOA de 5.3MW; se aísla el tramo fallado y se procede a anillar P5/P4-CDS para restablecer servicio en pozos, finalizando normalización a las 7:03 am. diferida 408 bbl.	(01:34:26) Por descargas atmosféricas sale Subestación REF de EMSA causando BLACKOUT en el meta, y en la GEC debido a los siguientes eventos:	(08:49:18) Se presenta disparo no deseado del INT frontera OCOA-EMSA 115KV; aparece señal errónea del seccionador Q1 abierto y disparo por SF6 y falla motores, quedando la GEC en isla. (08:49:18) Por EDAC se abren P3-CDC, P3-P4-P5/CDS y P2-CDA. (09:06:34 09:11:08) Cerrado INT frontera S4-Q0 (SUR_EMISA) localmente, y se empiezan a normalizar los circuitos abiertos por EDAC de la GEC. (09:07:21) Cerrado INT frontera OCOA-EMSA 115KV, presento problemas de sincronismo (frecuencia) para el cierre con el sistema de EMSA en OCOA.	

APIAY-28	APIAY-43H	APIAY-24	APIAY-24	POZO
21/02/2013	24/12/2012	03/09/2013	03/09/2013	FECHA
19,5	19	14	14	HORAS SERVICIO
4,5	5	10	10	HORAS FUERA SERVICIO
146,16	149,26	154,79	154,79	DIFERIDA
FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	CODIGO DE FALLA
Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	DESCRIPCION CODIGO FALLA
539	492	738	738	NUMERO PARADA
EMSA	ESTRUCTURA	EMSA	EMSA	ORIGEN DEL EVENTO
(05:30:12) Debido a la salida de la Subestación Ocoa-EMSA se presenta Blackout total, EMSA reporta que se estaba realizando maniobras en esta subestación para ajuste de la protección diferencial de barras 115 KV. Con los siguientes eventos: Diferida 11.700 barriles en la SCC y 1.126 barriles en la SOA.	(19:47:41) El Cto P1-CDA Dispara con recierre no exitoso RC que alimenta ramal del pozo A43, por falla monofásica a tierra (50-AG) despejada en 66 ms. Deslastre de 0.3 MW en Aplay. En el pórtico del Pozo A43 se ubico puente suelto, se corrige la falla y se normaliza el RC a las 23:45:00.	(14:03:47) Se presenta blackout general. Debido a descargas atmosféricas diapara línea Ocoa-Suria 115Kv de EMSA. Por restricción de potencia por la frontera Ocoa (14:32:00 - 15:10:00) se abren RCP Cto P2-CDC (14:48:00 - 15:10:00) y se abre RCP Cto P5-CDC.	(14:03:47) Se presenta blackout general. Debido a descargas atmosféricas diapara línea Ocoa-Suria 115Kv de EMSA. Por restricción de potencia por la frontera Ocoa (14:32:00 - 15:10:00) se abren RCP Cto P2-CDC (14:48:00 - 15:10:00) y se abre RCP Cto P5-CDC.	DESCRIPCIÓN

SURIA-16	APIAY-28	POZO
14/05/2013	17/03/2013	FECHA
20	19,5	HORAS SERVICIO
4	4,5	HORAS FUERA SERVICIO
145,2	145,8	DIFERIDA
FSEN	FSEN	CODIGO DE FALLA
Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	DESCRIPCION CODIGO FALLA
631	560	NUMERO PARADA
DESCONOCIDO	ESTRUCTURA	ORIGEN DEL EVENTO
(20:19:15) Dispara con recierre exitoso circuito Suria-CDS por falla trifásica (51-ABC), con corrientes de 1748, 1828 y 1738 A, despejada en 1.08 s. Deslastra 14.8 MW en la SOA (6.6 MW por apertura de circuito EBA y 8.2 MW de pozos). Se abre interruptor circuito Suria-CDA y se cierra RC16 frontera P1/P3. Se encuentra abierto SU-SM02 adyacente al SU-SZ de Alto Pompeya, se cierra localmente por personal de redes.	(07:38:30) Por falla en circuito SURIA-CDS dispara por AT y BT el transformador TR01-CDS despedido la falla de este Cto, opera elemento 51-fase B con relé 86, duración 252 ms y deslastrando 11MW en la SOA. Se coordinan maniobras para normalizar la tensión en la Barra 1 del CDS pero se presenta salida del TR02-CDS al persistir la falla en el Cto Suria-CDS con deslastre de 9MW en la SOA. El RCP del Cto Suria registra falla monofásica 51-BG Con corriente de 1529 A. 08:00:00 Se normaliza el transformador TR02-CDS y los Ctos P3/P4/P5 y EBA. 08:15:00 se normaliza TR01-CDS por AT y BT. Se realizan maniobras para normalizar pozos de Apiay a través del Cto P3-CDS. Se hizo recorrido del circuito SURIA-CDS, encontrando inicialmente una rama sobre la estructura SU-47, a las 10:44:00 se intenta habilitar el circuito Suria-CDS pero la falla sigue; Con la prueba anterior, se detecta falla en un DPS en la estructura R4 del ramal que va hacia los pozos Apiay Este 2 y 3. Se reemplaza el DPS y sobre las 11:30:00 se normaliza la carga del circuito Suria-CDS.	DESCRIPCIÓN

SURIA SUR-22	GAVAN-5	APIAY-25D	GAVAN-8	POZO
16/08/2011	24/09/2012	15/11/2011	15/12/2013	FECHA
8,67	16,08	20	9	HORAS SERVICIO
15,33	7,92	4	15	HORAS FUERA SERVICIO
141,05	141,21	142,73	143	DIFERIDA
FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	CODIGO DE FALLA
Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	DESCRIPCION CODIGO FALLA
61	377	138	884	NUMERO PARADA
LÍNEA	FAUNA - AVES	EMSA	EMSA	ORIGEN DEL EVENTO
(03:23:07) Dispara con recierre exitoso circuito EBA-CDS por ruptura de pase de la fase C en el acople de barras 1-2 de 34.5 kV en EBA. Falla monofásica (50-CG) despejada en 200 ms. Personal de redes cambia este pase. Deslastre de 1 MW en la SOA. Diferida 303 barriles.	(07:35:22) Debido a una ave que pernocto en la EST-10-T1 del Cto P4-CDS, dispara RCP P4-CDS intercala al recierre en 20s, opera 51-AB durante 324ms registrando IA=2467A IB=2264 A; deslastre 8MW en la SOA. Diferida 800 barriles.	(15:19:06) Debido a la salida de la subestación Reforma 230/115 kV de EMSA (por falla no despejada sobre la línea Victoria-Reforma 115 kV), se produce Blackout en el Meta, causando apertura del interruptor E2-Q0 frontera Ocoa por subtensión y subfrecuencia, el sistema de ECP queda operando en isla con TEO y TES. Además, este evento origina una subtensión del 44% durante 425 ms, causando deslastre de 12.8 MW en la SCC y 7.3 MW en la SOA. Diferida SCC 79 barriles y SOA 313 barriles.	(08:49:18) Se presenta disparo no deseado del INT frontera OCOA-EMSA 115KV; aparece señal errónea del seccionador Q1 abierto y disparo por SF6 y falla motores, quedando la GEC en isla. (08:49:18) Por EDAC se abren P3-CDC, P3-P4-P5/CDS y P2-CDA. (09:06:34 09:11:08) Cerrado INT frontera S4-Q0 (SUR_EMSA) localmente, y se empiezan a normalizar los circuitos abiertos por EDAC de la GEC. (09:07:21) Cerrado INT frontera OCOA-EMSA 115KV, presento problemas de sincronismo (frecuencia) para el cierre con el sistema de EMSA en OCOA.	DESCRIPCIÓN

APIAY-9	SURIA-8	SURIA-9	APIAY-38	GUATUQUIA-7	POZO
17/06/2013	20/11/2012	20/11/2012	01/06/2012	04/05/2013	FECHA
18	15	18	18	16,67	HORAS SERVICIO
6	9	6	6	7,33	HORAS FUERA SERVICIO
138,15	138,6	140,18	140,33	140,82	DIFERIDA
FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	CODIGO DE FALLA
Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	DESCRIPCION CODIGO FALLA
657	439	439	275	620	NUMERO PARADA
DESCONOCIDO	EMSA	EMSA	OPERATIVA	AISLADOR	ORIGEN DEL EVENTO
(04:02:27) En el Cto P1-CDA Dispara con recierre exitoso RCI asociado al pozo A23 por falla Bifásica (50-AB) despejada en 154 ms y corrientes de 1741 A y 1721 A. Deslastra 3.5 MW en la SOA. No se identificó la causa.	(01:08:44) Se presenta falla monofásica (AG) en EMSA (reportan salida de la línea Reforma-Ocoa 2 por explosión de CT de esta línea en la subestación Reforma), este evento genera una subtenión en las redes de la GEC del 65% durante 175 ms, deslastrando aprox. 12 MW en la SCC y 2 MW en la SOA.	(01:08:44) Se presenta falla monofásica (AG) en EMSA (reportan salida de la línea Reforma-Ocoa 2 por explosión de CT de esta línea en la subestación Reforma), este evento genera una subtenión en las redes de la GEC del 65% durante 175 ms, deslastrando aprox. 12 MW en la SCC y 2 MW en la SOA.	(11:36:00) Se realiza maniobra entre los Ctos P4/P5-CDS con el fin de realizar cambio de baterías al RCP del Cto P5-CDS y por falla interna en el relé del RCP. P5-CDS, ocurre disparo no deseado a las 11:57:17 repóniéndose manualmente a las 11:57:37 deslastrándose 4.5MW en la SOA. Diferida 160 barriles.	(04:57:59) Se presenta falla en bornes del RC de acople de barras 1-2 en CDS, causando el disparo de TR01-CDS por protección diferencial (87T) despejando la falla en 125 ms y TR02-CDS por sobrecorriente temporizada (51-ABC) despejándola en 1.25 s. Este evento causa Blackout en la SOA (excepto subtenión en la SCC de 25.2% durante 1.25 s, deslastrando 22.5 MW. Se normalizan los transformadores localmente. Este RC de acople queda no disponible y sus seccionadores asociados abiertos, pendiente revisión.	DESCRIPCION

SURIA SUR-37H	GUATIQUEIA-19	GUATIQUEIA-17	SURIA SUR-1	GAVAN-4	POZO
07/03/2014	09/02/2013	20/03/2012	04/12/2012	07/11/2011	FECHA
6	19,5	18	8	19,25	HORAS SERVICIO
18	4,5	6	16	4,75	HORAS FUERA SERVICIO
134,4	134,76	136,1	136,8	136,87	DIFERIDA
FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	CODIGO DE FALLA
Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	DESCRIPCION CODIGO FALLA
923	524	223	450	130	NUMERO PARADA
DESCARGA ATMOSF	DESCONOCIDO	PROTECCIONES	LÍNEA	FAUNA - AVES	ORIGEN DEL EVENTO
(04:57:10) Por descargas atmosféricas Dispara interruptor en ambos extremos TEO-CDO por falla trifásica (67-ABC) operando Z1. Con corrientes de falla IA=4189 A, IB=4420 A, IC=4311 A, IN=172 A, despejada en 83 ms y localizada a 11,4 km de TEO a CDO. Quedando 7 MW en la GEC.	(04:30:51) Dispara con recierre exitoso circuito P5-CDS por falla bifásica a tierra (50-ABG) despejada en 250 ms, registrando corrientes de 2823 y 2457 A. Deslastra 6.5 MW en la SOA. Causa no identificada.	Se encuentra breaker disparado en los devanados del transformador SDT, por ausencia del personal de Alkhorayef se presenta demora en el arranque del pozo.	(08:02:28) Por desprendiendo de cable de guarda en P4-SS2-03, dispara Cto P4-CDS; realiza un intento de recierre y dispara nuevamente al persistir la falla, opera 51-BG durante 333ms, registra IB=2588 A. IG=2590 A. Deslastró 5.5 MW en la SOA se realizan maniobras para aislar tramo en falla y se transfiere carga al Cto P5-CDS se normalizan Ctos a las 13:26:00.	(00:00)Debid o a un ave opera corta circuitos ØA en el pozo GV4 Opera 50-AG durante 17ms. Sale únicamente este pozo Diferida 136 bbl.	DESCRIPCIÓN

GAVAN-5	APIAY-28	GAVAN-5	POZO
17/03/2013	05/01/2014	22/08/2012	FECHA
19,5	18	17,66	HORAS SERVICIO
4,5	6	6,34	HORAS FUERA SERVICIO
130,15	132	132,7	DIFERIDA
FSEN	FSEN	FSEN	CODIGO DE FALLA
Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	DESCRIPCION CODIGO FALLA
560	893	350	NUMERO PARADA
ESTRUCTURA	FAUNA - AVES	FAUNA - ANIMALES	ORIGEN DEL EVENTO
(07:38:30) Por falla en circuito SURIA-CDS dispara por AT y BT el transformador TR01-CDS despedido la falla de este Cto, opera elemento 51-fase B con relé 86, duración 252 ms y deslastrando 11MW en la SOA. Se coordinan maniobras para normalizar la tensión en la Barra 1 del CDS pero se presenta salida del TR02-CDS al persistir la falla en el Cto Suria-CDS con deslastré de 9MW en la SOA. El RCP del Cto Suria registra falla monofásica 51-BG Con corriente de 1529 A. 08:00:00 Se normaliza el transformador TR02-CDS y los Ctos P3/P4/P5 y EBA. 08:15:00 se normaliza TR01-CDS por AT y BT. Se realizan maniobras para normalizar pozos de Aplay a través del Cto P3-CDS. Se hizo recorrido del circuito SURIA-CDS, encontrando inicialmente una rama sobre la estructura SU-47, a las 10:44:00 se intenta habilitar el circuito Suria-CDS pero la falla sigue; Con la prueba anterior, se detecta falla en un DPS en la estructura R4 del ramal que va hacia los pozos Aplay Este 2 y 3. Se reemplaza el DPS y sobre las 11:30:00 se normaliza la carga del circuito Suria-CDS.	(17:58:43) Dispara con recierre exitoso Int principal del Cto P1-CDA por falla bifásica (51-BC) y con corrientes de IB=2060 A, IC=2020 A, despedida en 265 ms, deslastra 10.2 MW en la SOA. A causa de una ave (Chulo).	02:51:31 Debido a una serpiente dispara RCP del Cto P4-CDS realiza recierre y dispara nuevamente al persistir la falla quedando abierto el RCP, por falla bifásica a tierra (50-BCG) despedida en 191 ms, con corrientes de 3976 A. Deslastra 6 MW en la SCC y 6.5 MW en la SOA, falla ubicada en la estructura R4 del pozo SS7. 04:00:00 se Normaliza el Cto después de hacer revisión de los primeros tramos de red. Diferida 575 barriles.	DESCRIPCIÓN

APIAY-28	GUATIQUEIA-9	APIAY-16	APIAY-37H	POZO
17/04/2013	20/11/2012	17/03/2013	18/10/2013	FECHA
20	16	15	13,5	HORAS SERVICIO
4	8	9	10,5	HORAS FUERA SERVICIO
124,02	125,9	126,47	127,02	DIFERIDA
FSEN	FSEN	FSEN	FSEN	CODIGO DE FALLA
Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	Falla suministro de energía	DESCRIPCION CODIGO FALLA
585	439	560	798	NUMERO PARADA
EMSA	EMSA	ESTRUCTURA	EMSA	ORIGEN DEL EVENTO
(21:38:14) Debido al disparo del INT L120 en la S/E SURIA EMSA; la SOA queda en isla, alimentada por TES, por 27-BC del 56.72% durante 66ms, se deslastro 4MW en la SOA.	(01:08:44) Se presenta falla monofásica (AG) en EMSA (reportan salida de la línea Reforma-Ocoa 2 por explosión de CT de esta línea en la subestación Reforma), este evento genera una subtenión en las redes de la GEC del 65% durante 175 ms, deslastro aprox. 12 MW en la SCC y 2 MW en la SOA.	(07:38:30) Por falla en circuito SURIA-CDS dispara por AT y BT el transformador TR01-CDS desparjado la falla de este Cto, opera elemento 51-fase B con relé 86, duración 252 ms y deslastro 11MW en la SOA. Se coordinan maniobras para normalizar la tensión en la Barra 1 del CDS pero se presenta salida del TR02-CDS al persistir la falla en el Cto Suria-CDS con deslastro de 9MW en la SOA. El RCP del Cto Suria registra falla monofásica 51-BG Con corriente de 1529 A. 08:00:00 Se normaliza el transformador TR02-CDS y los Ctos P3/P4/P5 y EBA. 08:15:00 se normaliza TR01-CDS por AT y BT. Se realizan maniobras para normalizar pozos de Apiay a través del Cto P3-CDS. Se hizo recorrido del circuito SURIA-CDS, encontrando inicialmente una rama sobre la estructura SU-47, a las 10:44:00 se intenta habilitar el circuito Suria-CDS pero la falla sigue; Con la prueba anterior, se detecta falla en un DPS en la estructura R4 del ramal que va hacia los pozos Apiay Este 2 y 3. Se reemplaza el DPS y sobre las 11:30:00 se normaliza la carga del circuito Suria-CDS.	Se presenta demora en el arranque de los pozos Apiay 37H, y Suria Sur 11 debido a la falla de suministro de energía ocurrida el día anterior (17/10/2013)	DESCRIPCION

Fuente: Confipetrol S.A. (2014). Grupo Confiabilidad (Campo Apiay).

4.3 Preparación de los Datos. Una vez recolectado los datos se debe verificar que estos sean de calidad para la evaluación a realizar, para esto se debe tener en cuenta lo siguiente.

- Definir si los datos son históricos o retrospectivos. Los datos utilizados para este análisis en particular, son datos históricos ya que esta información fue recopilada de la base de datos habilitada.
- Decidir sobre el tamaño de la muestra. Para este análisis se evaluó el periodo desde el día 02 de julio de 2011 al 21 de junio de 2014 logrando recopilar 11684 eventos de fallas registrados, logrando tener tendencias de 3 años tiempo mínimo necesario para realizar una evaluación más acertada.
- Verificar la validez de los datos históricos sobre el control de fallas de los variadores de velocidad registrados en la base de datos.
- Calcular los aportes al análisis por cada uno de los eventos que se están evaluando con el fin de ser cuantificado.

4.4 Análisis de la recolección de datos. Al realizar la recolección y el análisis de la información recolectada sobre las paradas inesperadas en los variadores de velocidad Centrilift, se reflejan los problemas que causan más pérdidas de producción de crudo en un tiempo determinado. Con la información estadística recopilada se procede a la construcción de un análisis causa raíz (RCA), con el fin de identificar el **mal actor** que está causando las fallas que afectan la confiabilidad operacional de los variadores de velocidad, lo que conlleva a grandes pérdidas económicas para la Empresa.

Entre el día 02/07/2011 y el 21/05/2014 (periodo a evaluar) se presentaron 11684 eventos y una diferida de 100295 BIs que afectan la producción por comportamiento sub-estándar en la red. Estos eventos tienen los mecanismos de falla y características que se muestran en la siguiente tabla:

Con los datos obtenidos se evidencia que la Electrificadora del Meta S.A., EMSA, es el mecanismo de falla más representativo, generando el mayor número de eventos durante el periodo de tiempo evaluado.

Tabla 3. Paradas inesperadas en los variadores de velocidad Centrilift.

MECANISMO FALLA	TOTAL DE EVENTOS POR MECANISMO DE FALLA	NO DISPONIBILIDAD TOTAL POR MECANISMO DE FALLA	MÁXIMA NO DISPONIBILIDAD POR MECANISMO DE FALLA	MÍNIMO NO DISPONIBILIDAD POR MECANISMO DE FALLA
EMSA	3531	3788	24	0,09
DESCONOCIDO	2993	2330	22	0,05
FAUNA – ANIMALES	1128	1031	24	0,08
DESCARGA ATMOSF	1076	889	20	0,08
FAUNA – AVES	981	800	24	0,08
PROTECCIONES	397	532	21	0,08
TÉRMICAS	384	472	24	0,17
VEGETACIÓN	253	126	11	0,08
AISLADOR	237	271	19	0,17
LÍNEA	215	304	18	0,17
ESTRUCTURA	211	320	17	0,10
OPERATIVA	150	150	12	0,17
RELÉ	50	62	8	0,50
VIENTO FUERTE	43	33	4	0,50
TRANSFORMADOR	29	36	8	0,17
SECCIONADOR-CARGA	5	3	1	0,58
FUSIBLE	1	3	3	3,00
	11684	11151	259	6

Fuente: Confipetrol S.A. (2014). Grupo Confiabilidad (Campo Apiay).

El comportamiento de las fallas de los siguientes mecanismos tiene como consecuencia limitación permanente en el suministro de energía, por tal razón para el presente análisis no se contemplan los indicados en la Tabla 3.

Entre el 02/07/2011 y el 21/05/2014 (periodo a evaluar), después de la exclusión de los mecanismos de falla que tienen como consecuencia limitación permanente en el suministro de energía, quedan para analizar 10005 eventos de falla y 80168 Bls

Tabla 4. Mecanismos de Falla.

MECANISMO FALLA	TOTAL DE EVENTOS POR MECANISMO DE FALLA	NO DISPONIBILIDAD TOTAL POR MECANISMO DE FALLA	MAXIMA NO DISPONIBILIDAD POR MECANISMO DE FALLA	MINIMO NO DISPONIBILIDAD POR MECANISMO DE FALLA
PROTECCIONES	397	532	21	0,08
TÉRMICAS	384	472	24	0,17
AISLADOR	237	271	19	0,17
LÍNEA	215	304	18	0,17
ESTRUCTURA	211	320	17	0,10
OPERATIVA	150	150	12	0,17
RELÉ	50	62	8	0,50
TRANSFORMADOR	29	36	8	0,17
SECCIONADOR-CARGA	5	3	1	0,58
FUSIBLE	1	3	3	3,00

Fuente: Confipetrol S.A. (2014). Grupo Confiabilidad (Campo Apiay).

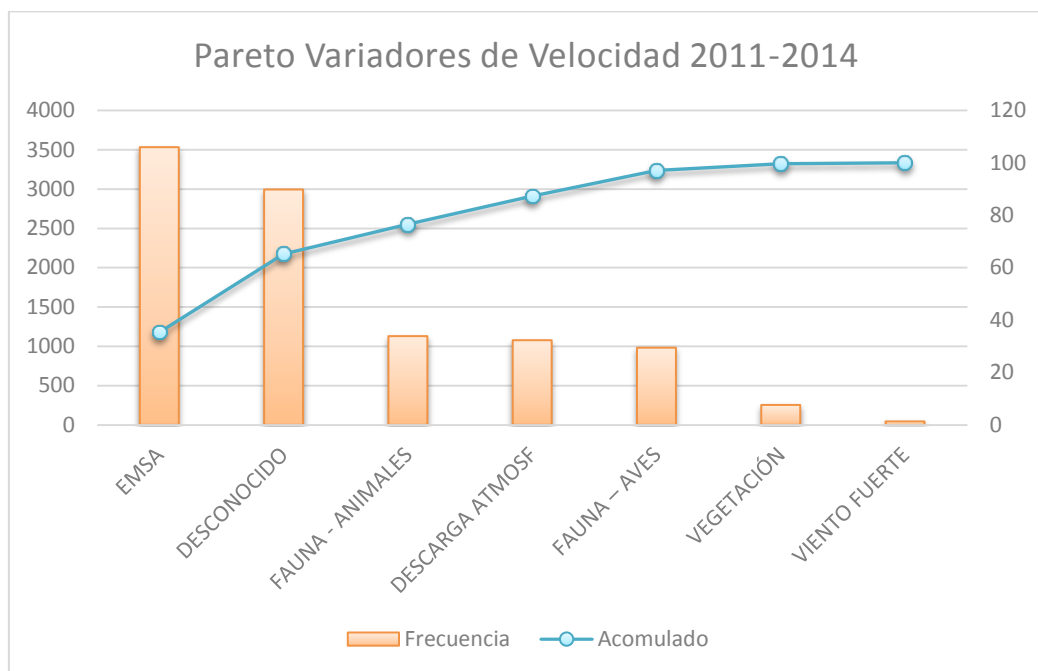
Tabla 5. Mecanismo de Falla más Frecuente.

MECANISMO FALLA	TOTAL DE EVENTOS POR MECANISMO DE FALLA	NO DISPONIBILIDAD TOTAL POR MECANISMO DE FALLA	MAXIMA NO DISPONIBILIDAD POR MECANISMO DE FALLA	MINIMO NO DISPONIBILIDAD POR MECANISMO DE FALLA
EMSA	3531	3788	24	0,09
DESCONOCIDO	2993	2330	22	0,05
FAUNA - ANIMALES	1128	1031	24	0,08
DESCARGA ATMOSF	1076	889	20	0,08
FAUNA – AVES	981	800	24	0,08
VEGETACIÓN	253	126	11	0,08
VIENTO FUERTE	43	33	4	0,5
	10005	8997	129	0,96

Fuente: Confipetrol S.A. (2014). Grupo Confiabilidad (Campo Apiay).

4.4.1 Diagrama de Pareto. Con los datos de la tabla anterior se realizó el diagrama de Pareto, graficando en el eje axial los mecanismos de falla (elementos que contribuyen a la falla) y en el eje vertical los eventos generados desde el 02/07/2011 y el 21/05/2014 (Efecto Cuantificable), para identificar los malos actores.

Figura 13. Diagrama de Pareto Mal Actor, Ecopetrol - Campo Apiay.



Fuente: elaboración de los autores.

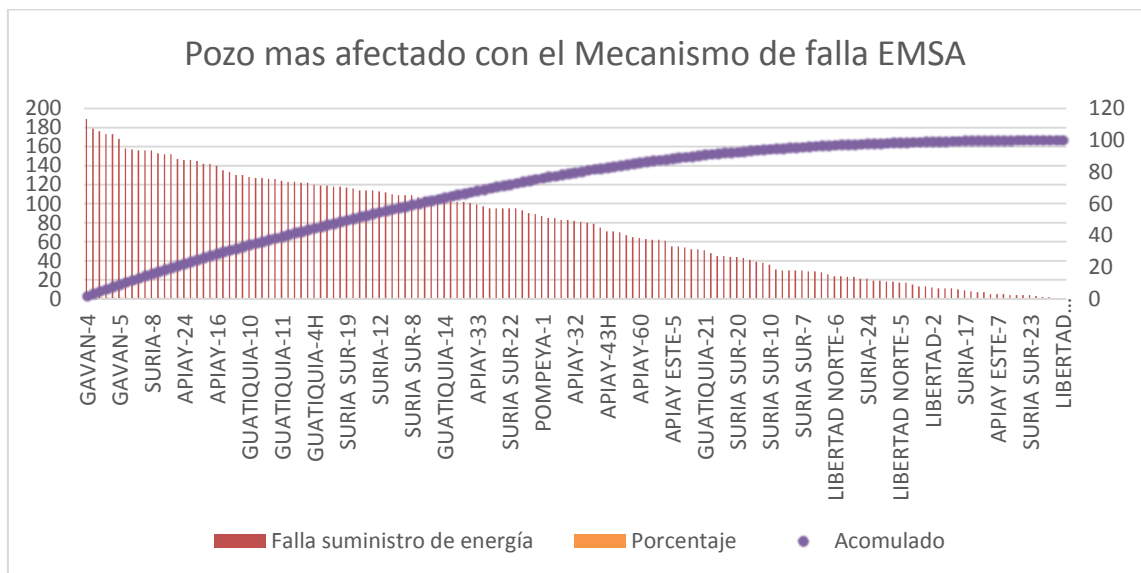
4.5 IDENTIFICACION DEL MAL ACTOR

4.5.1 Descripción del sistema identificado como el mal actor. El mecanismo de falla identificado como el mal actor fue el sistema de interconexión eléctrica con la Electrificadora del Meta (EMSA), debido a las perturbaciones aleatorias inherentes en la red eléctrica que ocasionan una menor calidad en la señal de alimentación suministrada y principalmente pérdidas económicas importantes de producción debido a las paradas inesperadas de los variadores de velocidad.

Ecopetrol cuenta con dos termoeléctricas, la primera llamada Termo Ocoa, la segunda denominada Termo Suria las cuales proveen una generación de energía eléctrica de 38MW y 37MW respectivamente, sin embargo, debido al gran crecimiento en su infraestructura energética y por ende a su consumo eléctrico es necesario el suministro de 8 MW adicionales por parte de la Electrificadora del Meta los cuales se distribuyen a través de la frontera comercial que existe entre la subestación eléctrica Ocoa (propiedad de EMSA) y la Termoeléctrica Ocoa, (propiedad de Ecopetrol).

Una vez identificado el sistema de interconexión eléctrica de la SOA con la Electrificadora del Meta (EMSA) como el actor que más aporta a los llamados de falla, se realizó otro diagrama de Pareto con el objetivo de establecer cuál es el pozo que más se ha visto afectado por las perturbaciones aleatorias provenientes del mecanismo de falla ya identificado.

Figura 14. Pozo con mayor no-disponibilidad.



Fuente: elaboración de los autores.

En la gráfica anterior se muestra que el pozo que mayor no-disponibilidad presenta debido a las perturbaciones aleatorias en la interconexión eléctrica con la Electrificadora del Meta (EMSA) es el pozo Gavan 4 con 189 paradas inesperadas y una diferida en producción de 2457,58 BIs que se traducen en pérdidas económicas de 110591 dólares.

5. APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ

Este capítulo tiene como propósito fundamental mostrar el proceso de aplicación de la metodología de análisis de causa raíz RCA (análisis cualitativo), al *mal actor* identificado en los variadores de velocidad de la Superintendencia de Operaciones Apiay, con el objetivo de encontrar la verdadera causa del problema para posteriormente establecer acciones de mejora que conduzcan a una solución definitiva de falla.

5.1 MÉTODOS DE ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ

El análisis causa raíz es un proceso diseñado para su uso en la investigación y con el cual se logra establecer una categorización de las causas de los acontecimientos los cuales repercuten en la producción de la organización, en aspectos tales como: Seguridad, Salud, Medio Ambiente, Calidad y Fiabilidad.

El RCA como herramienta permite identificar no solo el cómo se produjo sino el cómo sucedió el evento, entender cómo se produjo un evento es la clave para desarrollar recomendaciones eficaces.

Existen muchos métodos de aplicación de causa raíz especializados, los cuales se aplican en situaciones u objetos que se quieren conseguir.

Un buen Analisis de Causa Raiz se debe basar en lo siguiente:

- Las causas fundamentales son específicas de las causas subyacentes.
- Las causas fundamentables son las que razonablemente se pueden identificar.
- Las causas fundamentales son las que la gestión tienen el control de arreglar.
- Las causas fundamentales son aquellas en las que se pueden generar recomendaciones efectivas para la prevención de las recurrencias.

El objetivo del investigador debe ser la identificación específica de las causas subyacentes, el producto de las causas subyacentes son las *causas fundamentales*. Cuanto más específico sea el investigador acerca del porqué se produjo un evento, más fácil será llegar a las recomendaciones que eviten recurrencia.

Las causas fundamentales son aquellas sobre las que la gestión tiene el control y razonablemente se puede identificar, la investigación del incidente debe ser apoyada en la razón costo-beneficio. No es práctico mantener la mano de obra valiosa ocupada indefinidamente en la búsqueda de la causa de los sucesos. Un

RCA estructurado ayuda a los analistas a sacar el máximo partido del tiempo que han invertido en la investigación.

Las causas fundamentales son aquellas para las que se puedan generar recomendaciones efectivas. Las recomendaciones deben directamente abordar las causas fundamentales identificadas durante la investigación.

También hay que identificar la causa raíz donde la gestión de la organización pueda influir.

Para realizar el análisis de causa-raíz a fondo, se debe ir más allá de los componentes físicos de la falla y analizar las acciones humanas que desataron la cadena causa–efecto que llevó a la causa física, con el objetivo de identificar las raíces latentes y prevenir que la falla se repita nuevamente.

Los hechos deben respaldarse mediante observación directa, documentación y deducciones científicas. Se utilizan gran variedad de técnicas y su selección depende del tipo de problemas y datos disponibles.

5.1.1 Análisis de Evento. Este método describe secuencialmente una serie de tareas o acciones que llevan a que ocurra un evento. La línea de evento es una secuencia de tiempo, acciones o sucesos mientras las condiciones son cualquiera que forme el desenlace, y rangos de condiciones físicas, actitud o cultura de seguridad son utilizadas para problemas largos.

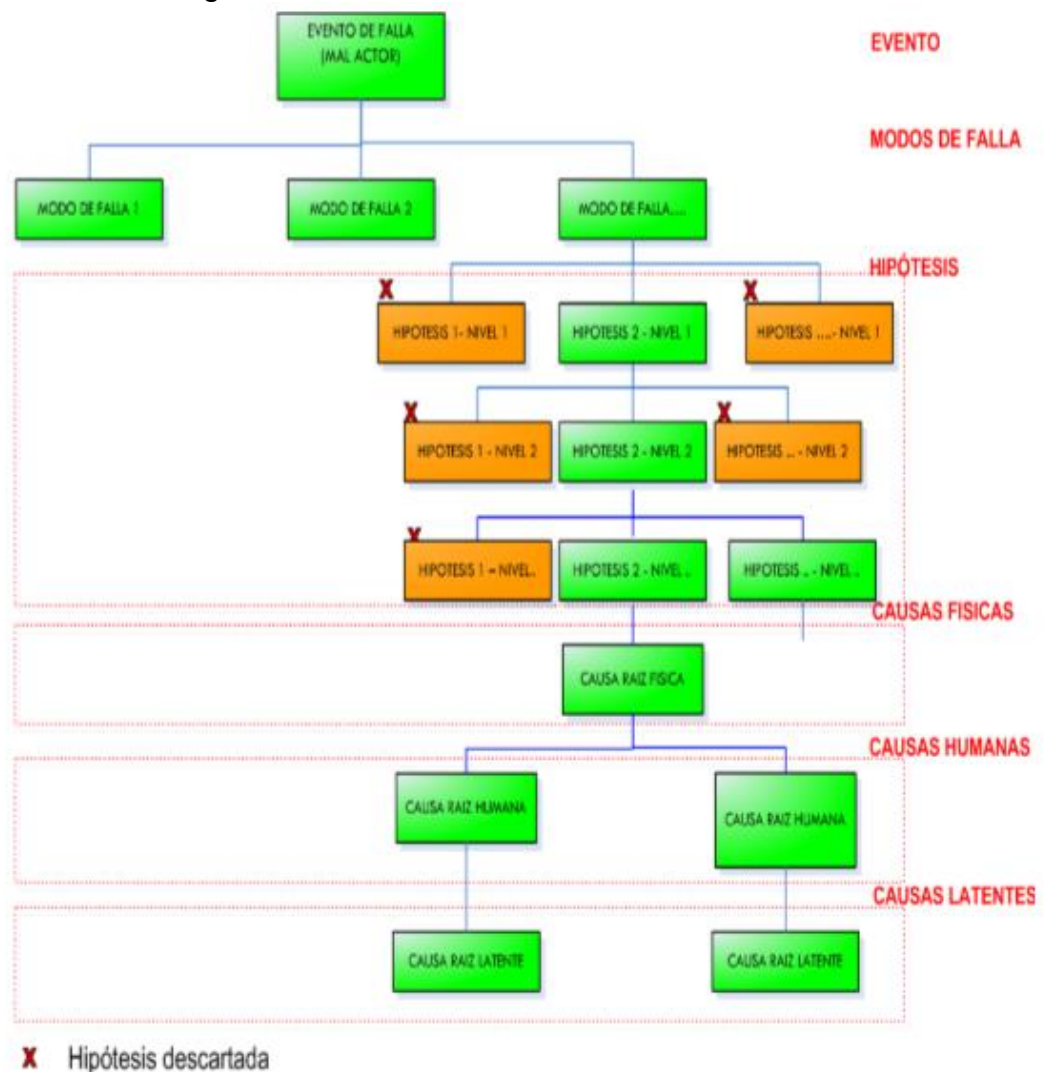
5.1.2 Árbol de Falla. Se considera una herramienta de confiabilidad operacional que permite representar gráficamente las relaciones causa–efecto que conducen a descubrir el evento indeseado y cuál fue la causa raíz del problema.

5.2 Pasos del Árbol Lógico de Fallas. La elaboración de un árbol lógico de falla se debe efectuar mediante un proceso ordenado, donde las diferentes etapas que lo componen guíen al grupo de análisis del RCA, a encontrar la causa raíz que está originando el problema, la estructura para el análisis de los elementos encontrados en cada una de las etapas genera un análisis combinatorio o ramificado llamado árbol lógico de falla cuya estructura conceptual es la siguiente (referirse a la fig15).

5.2.1 Descripción del Evento. Los variadores de velocidad han presentado parada total de sus funciones debido perturbaciones aleatorias inherentes en la red eléctrica de Ecopetrol, estos eventos se han convertido en fallas crónicas por su alta repetitividad, trayendo como consecuencia principalmente pérdidas económicas importantes de producción y un gran número de horas hombre en restablecer los servicios, por lo cual el evento es:

No disponibilidad de los pozos de producción del campo Apiay por perturbaciones aleatorias en el suministro de energía al variador.

Figura 15. Árbol Lógico de Fallas.



Fuente: Confipetrol S.A. Grupo Confiabilidad (Campo Apiay).

5.2.2 Modos de Falla. Después de analizar los datos, se identifica que el modo de falla del evento a eliminar es:

Apagado del Variador

5.2.3 Hipótesis de Falla. Se identifica el modo de falla y se procede a formular las hipótesis con el objetivo de definir lo sucedido en los eventos de falla y poder clarificar el problema. Las hipótesis no son más que conjeturas que deben ser comprobadas para tomarlas como hechos y seguir avanzando en el desarrollo del árbol lógico de falla.

Para determinar con más objetividad las hipótesis del modelo de falla, se tuvo en cuenta la verificación de los eventos registrados por el variador de velocidad al momento en el cual se presentaba la falla, observando:

Falla/ Activa:	Alarma	Falla de Cruce de Cero de PCM
Despliegue Típico:		PCM 0-xing
Descripción:		El 68332 ha detectado un problema con el tiempo de la señal cruzando cero.

Acción Correctora: este circuito monitorea el período del voltaje A-B al controlador y captura el tiempo de cada cruce de cero de la onda. Durante la operación normal, el período de cada ciclo debería ser casi constante, y cada cruce de cero debería suceder aproximadamente un período más tarde que el anterior. Si se tiene esta falla sólo una vez, o en forma no frecuente, podría ser una indicación de problemas en el sistema de energía. Si una verificación de todas las conexiones al controlador y al transformador reductor no revela nada, entonces puede ser necesario un analizador de transitorios del sistema de energía para identificar el problema

Una vez se identificó la falla o evento registrado en cada uno de los variadores de velocidad Centrifit del Campo Apiay: **PCM 0-xing** se procedió a confirmar con el Centro de Control si se registró en el Campo un evento eléctrico para poder confirmar la asertividad de lo registrado por el variador de velocidad, ya que es posible que un falla en las conexiones de puerta de SCR (la cual se conecta al sistema de energía a través de la tarjeta de señales del conversor) y la PCB (control del sistema) puede causar un error falso de cruce por cero. Por lo anterior, es necesario verificar cada una de estas conexiones y componentes para descartar posibles fallas en el variador.

Esta falla se pudo haber presentado por las siguientes hipótesis:

5.2.3.1 Perturbación Estacionaria. Son fenómenos de carácter permanente, o que se extienden durante lapsos bien definidos, que desde el punto de vista de los fenómenos estudiados, pueden considerarse como permanentes. Estas perturbaciones tienen, en la mayoría de los casos, origen en el funcionamiento de ciertos equipos localizados normalmente en la instalación del abonado.

Para descartar esta hipótesis se realizó una revisión integral al variador de velocidad en las conexiones de puerta de SCR y la tarjeta de señales del convertidor y la PCB (control del sistema) las cuales de estar en mal estado pueden generar la falla **PCM 0-xing** o **cruce por cero**, descartada esta hipótesis se procedió a verificar con el Centro de Control de Maniobras el estado del suministro de energía y el evento que se registró en el Campo Apiay.

Consultando los diferentes eventos electricos en el software de calidad de energia ELSPEC G4420 del Centro de Control de Maniobras de Ecopetrol se evidencia que las fallas presentadas poseen las siguientes características:

- Duracion: No mayor a 30 ciclos
- Magnitud: Con valores de 0.9 pu

Con esta informacion consultamos la Tabla 6 de Fenomenos Electromagneticos tomada de la norma IEEE1159 de 1995 la cual nos indica que este tipo de fenómenos con dichas características pertenecen a Variaciones de Tension de Corta duracion.

5.2.3.2 Variaciones de Tension de Corta Duración. Son aquellas desviaciones del valor R.M.S. de la tensión que ocurren con una duración inferior a un minuto. La Norma ANSI C84.1 especifica las tolerancias en la tensión de estado estable en un sistema de potencia. Una variación de voltaje se considera de corta duración cuando no supera el límite de la ANSI de un minuto.

a. Depresiones (Sag o Dip). También conocidas como valles o huecos consisten en una reducción entre 0,1 y 0,9 p.u. en el valor R.M.S. de la tensión o corriente con una duración de 0,5 ciclo a un minuto. Las depresiones de tensión son normalmente asociadas a fallas del sistema, a la energización de grandes cargas, al arranque de motores de elevada potencia y a la energización de transformadores de potencia. Los efectos nocivos de las depresiones de tensión dependen de su duración y de su profundidad, estando relacionados con la desconexión de equipos de cómputo, PLC y contactores entre otros dispositivos, también presentan efectos sobre la velocidad de los motores.

Diferentes posibilidades existen para mitigar los efectos de los Sags. La principal, consiste en estabilizar la señal de tensión a través de acondicionadores de red, los cuales existen con diferentes principios y tecnologías.

Tabla 6. Fenómenos Electromecánicos.

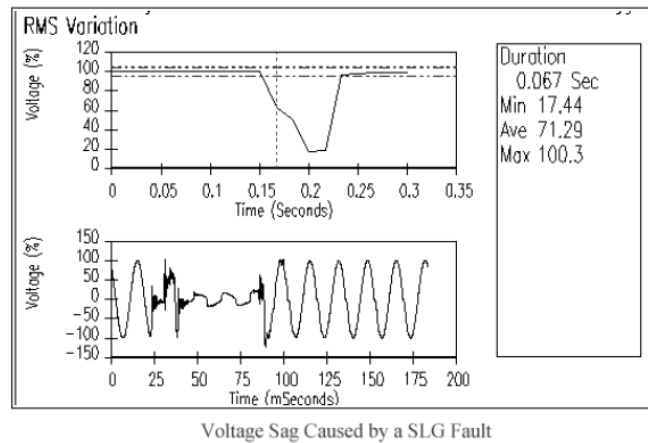
Categoría	Contenido Típico Espectral	Duración Típica	Magnitud Típica del Voltaje
1.0 Transitorios			
1.1 Impulsos			
1.1.1 Nanosegundos	5 ns de elevación	<50 ns	
1.1.2 Microsegundos	1 μ s de elevación	50 ns - 1 ms	
1.1.3 Milisegundos	0.1 ms de elevación	> 1 ms	
1.2 Oscilatorios			
1.2.1 Baja Frecuencia	< 5kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
1.2.2 Frecuencia Media	5 - 500 kHz	20 μ s	0 - 8 pu
1.2.3 Alta Frecuencia	0.5 - 5MHz	5 μ s	0 - 4 pu
2.0 Variaciones de Corta duración			
2.1 Instantáneas			
2.1.1 Sag		0.5 - 30 ciclos	0.1 -0.9 pu
2.1.2 Swell		0.5 - 30 ciclos	1.1 - 1.8 pu
2.2 Momentáneas			
2.2.1 Interrupción		0.5 ciclos - 3 seg	< 0.1 pu
2.2.2 Sag		30 ciclos - 3 seg	0.1 -0.9 pu
2.2.3 Swell		30 ciclos - 3 seg	1.1 - 1.4 pu
2.3 Temporal			
2.3.1 Interrupción		3 seg - 1 min	< 0.1 pu
2.3.2 Sag		3 seg - 1 min	0.1 -0.9 pu
2.3.3 Swell		3 seg - 1 min	1.1 - 1.2 pu
3.0 Variaciones de larga duración			
3.1 Interrupción sostenida		> 1 min	0.0 pu
3.2 Bajo voltaje		> 1 min	0.8 -0.9 pu
3.3 Sobrevoltaje		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
4.0 Desbalance en voltaje		Estado Estable	0.5 - 2%
5.0 Distorsión de Forma de Onda			
5.1 Componente de directa		Estado Estable	0 - 0.1%
5.2 Contenido armónico	0 -100th H	Estado Estable	0 - 20%
5.3 Interarmónicas	0 - 6 kHz	Estado Estable	0 - 2%
5.4 Muecas en el voltaje		Estado Estable	
5.5 Ruido	Banda amplia	Estado Estable	0 - 1%
6.0 Fluctuaciones de Voltaje	< 25 Hz	Intermitente	0.1 - 7%
7.0 Variaciones en la Frecuencia		<10 seg	

Fuente: Categoría y características de fenómenos electromagnéticos, IEEE1159.

Por tal motivo se pudo establecer que la hipótesis para este modo de falla era:

Variaciones de Tension de Corta Duración.

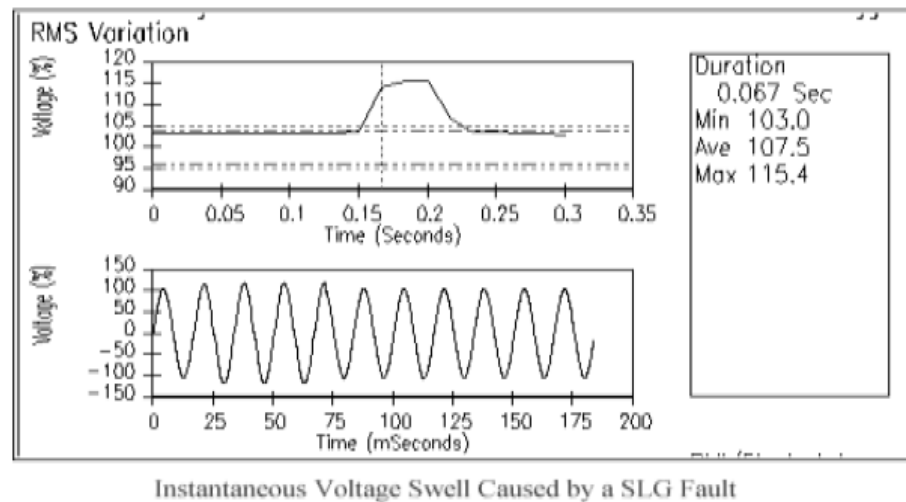
Figura 16. Depresiones de Tensión.



Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159, 1995.

b. Cresta (Swell). Se define como un incremento del valor R.M.S. de la tensión o la corriente entre 1,1 y 1,8 p.u. con una duración desde 0,5 ciclo a un minuto. Como en el caso de las depresiones, las crestas son asociadas a fallas en el sistema aunque no son tan comunes como las depresiones. Un caso típico es la elevación temporal de la tensión en las fases no falladas durante una falla de línea a tierra. También pueden ser causadas por la desconexión de grandes cargas o la energización de grandes bancos de capacitores.

Figura 17. Cresta.

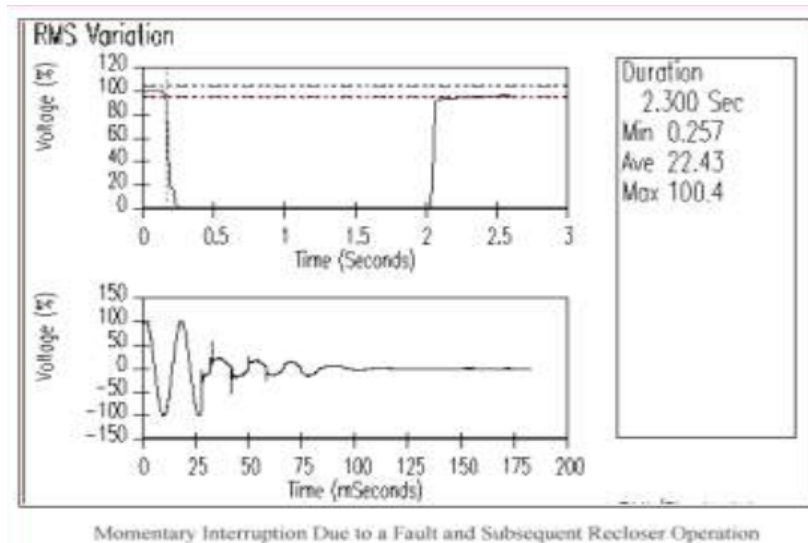


Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159, 1995.

c. Interrupción. Ocurre cuando la tensión o la corriente de la carga disminuyen a menos de 0,1 p.u. por un período de tiempo que no excede un minuto. Las

interrupciones pueden ser el resultado de fallas en el sistema, equipos averiados o debidas al mal funcionamiento de los sistemas de control. Las interrupciones se caracterizan por su duración ya que la magnitud de la tensión es siempre inferior al 10% de su valor nominal. El recierre instantáneo generalmente limita la interrupción causada por una falla no permanente a menos de 30 ciclos. La duración de una interrupción motivada por el funcionamiento indebido de equipos o pérdidas de conexión es irregular.

Figura 18. Interrupciones.

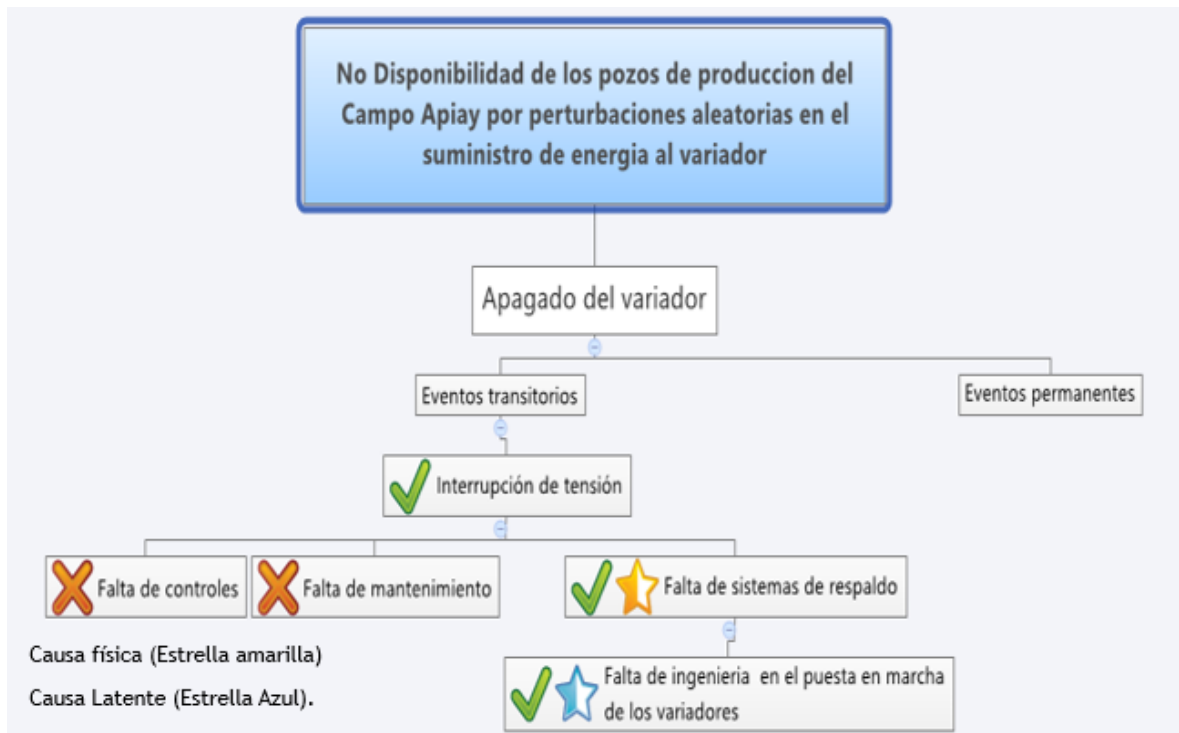


Fuente: Tomado de la Norma IEEE Estándar 1159, 1995.

5.2.4 Causas Físicas. La causa física que se genera por la hipótesis presentada es: *interrupcion de tensión*, la cual es generada debido a las perturbaciones en la red eléctrica; lo que genera que el variador de velocidad pierda su tensión DC en el instante de tiempo en que se presenta el evento. Esta alimentación DC es necesaria para la Tarjeta de Control del Sistema, (SCB), la cual emplea un microcontrolador de 16 bits y otro de 32 bits de alta velocidad; los cuales proporcionan salidas digitales para el control de los SCR's de la entrada y los transistores de salida, y a la vez, monitorea el funcionamiento general del controlador. Una vez esta tarjeta pierde su alimentación, el variador de velocidad se apaga quedando energizado como una proteccion ante una posible falla y registrando en su almacenamieto de eventos la falla *PCM 0-xing* o *cruce por cero*.

5.2.5 Causas Humanas. Para el caso particular de este análisis no se identificaron causas humanas.

Figura 19. Verificación de Causas Latentes.



Fuente: elaboración de los autores.

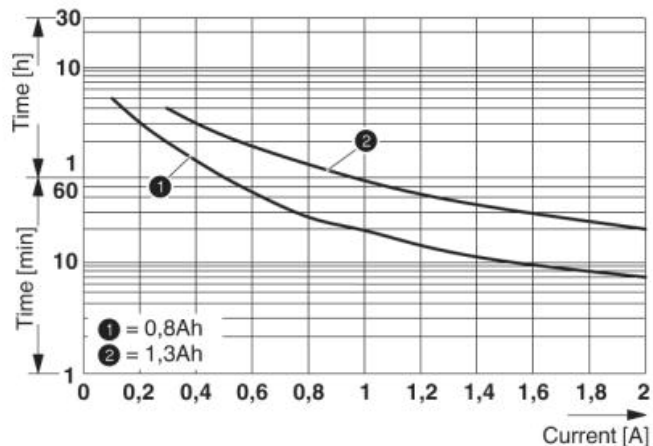
5.2.6 Causas Latentes. Para solucionar el problema de raíz se debió atacar la causa latente que se encuentra al final del análisis, ya que esta realmente ocasiona la cadena de eventos que produce la falla, esta causa latente se definió como: La falta de un sistema de respaldo de energía en caso de fallas en el suministro eléctrico que permita continuar sus actividades y operación.

El árbol lógico de fallas que resultó al final del análisis del RCA, evidenció los pasos para llegar a las recomendaciones finales de los procesos de eliminación del *mal actor* en los variadores de velocidad Centrilift del Campo Apiay.

5.2.7 Recomendaciones emitidas para la eliminación de fallas. Las recomendaciones para evitar la eliminación de falla fueron formuladas de acuerdo a las causas descritas como resultado del *mal actor*. Con estas se busca minimizar o eliminar esta falla, buscando aumentar la confiabilidad operacional de los variadores de velocidad Centrilift del Campo Apiay.

- Instalar un sistema de respaldo de alimentación ininterrumpida con fuente de alimentación integrada.
- A través del sistema ininterrumpido se debe proporcionar a la salida una tensión regulada y ajustable entre 22,5 y 29,5 V_{DC} para garantiza los 24 V_{DC} a la entrada de la *System Control Board* (ver figura 20).
- Se debe contar con un módulo de batería recargable de 0,8 Ah o 2 Ah, el cual tenga una duración de tiempo *buffer* superior a 1 minuto con módulo de batería recargable de 1,3 Ah, para que el tiempo de buffer varíe en función de la corriente de carga.
- Debe contar con valor de conmutación pico de voltaje de carga nominal, no mayor a 100mVpp.
- Diseñar un procedimiento para que los técnicos realicen la instalación del sistema ininterrumpido.
- Se debe realizar un plan de seguimiento a las recomendaciones emitidas, para poder llevar un control adecuado a las acciones de mejora y actividades propuestas para la eliminación del mal actor.

Figura 20. Diagrama de curva del sistema de respaldo.



Fuente: Uninterruptible Power Supply - MINI-DC-UPS/24DC/2 – 2866640. Consultado en septiembre de 2014. Disponible en: <https://www.phoenixcontact.com/online/portal/us?uri=pxc-oc-itemdetail:pid=2866640&library=usen&tab=1>

6. CONCLUSIONES

El desarrollo de la metodología de Análisis Causa Raíz al *mal actor* encontrado en los variadores de velocidad Centrifliff de la Superintendencia de Operaciones Apiay, permitió desarrollar un proceso de análisis de falla, dando como resultado la identificación de la verdadera causa raíz del problema.

La implementación de cada una de las herramientas cuantitativas que se emplearon, permitió canalizar adecuadamente los recursos disponibles e identificar claramente los malos actores que se encontraban afectando la productividad y la disponibilidad de los variadores de velocidad.

Durante el proceso de la aplicación del RCA, fue importante dejar a un lado los paradigmas existentes, ya que estos hubiesen podido afectar el desarrollo adecuado de la metodología y obtener soluciones erradas del problema.

La comunicación con el personal de operación y mantenimiento, permitió fortalecer la falla identificada haciendo que el proceso del RCA fuera más eficiente.

Se debe realizar un plan de seguimiento a las recomendaciones emitidas, para poder llevar un control adecuado a las acciones de mejora y actividades propuestas para la eliminación del mal actor.

BIBLIOGRAFÍA

BORRAS PINILLA, Carlos. (2013). Mantenimiento Preventivo. 162p

DONALD, G. Fink y **WAYNE**, Beaty. (1996). Manual de Ingeniería Eléctrica. (13ra ed.). Sección 23 Calidad de la Energía.

GIRALDO, Sebastián. (2013). Mantenimiento Productivo Total. 180p

ICONTEC. (2008). NORMA TÉCNICA COLOMBIANA, NTC-1486. Documentación, Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. Bogotá D.C. Versión vigente.

MORA, Luis Alberto. (2009). Mantenimiento Planeación, ejecución y control. (1rd ed.). México: Alfaomega.

VERA MUÑOZ, Hernando. (2011). Aplicación de la metodología Análisis Causa Raíz para la eliminación de un mal actor en equipos críticos de la SOM. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 111p.

VERGEL ROSALES, Héctor Emilio. (2012). Aplicación de la metodología Análisis Causa Raíz para la identificación del mal actor de las excavadoras Caterpillar 345C y 345D en la empresa Drummond Ltd. Barranquilla: Universidad Industrial de Santander. 85p.