

ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS, APLICADO A LA
SUBESTACIÓN TERMINAL ÚNICA DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL EL
DORADO, LUIS CARLOS GALÁN SARMIENTO

JORGE ENRIQUE PULIDO MONTILLA

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

2018

ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS, APLICADO A LA
SUBESTACIÓN TERMINAL ÚNICA DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL EL
DORADO, LUIS CARLOS GALÁN SARMIENTO

JORGE ENRIQUE PULIDO MONTILLA

MONOGRAFÍA DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE ESPECIALISTA EN
GERENCIA DE MANTENIMIENTO

DIRECTOR
OMAR GEOVANNI OPAYOME
Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

La presente monografía va dedicada a mi madre Maria Teresa, a mis familiares y a mis amigos, que siempre me apoyan y orientan para ir por el buen camino y quienes a través de los años me han acompañado por mi trayecto estudiantil, profesional y de vida.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Maria Teresa y familiares que con su buen ejemplo me han enseñado a no desfallecer ante las adversidades.

A mi director de proyecto, ingeniero Omar Opayome por su valioso acompañamiento y orientación durante el desarrollo de este proyecto.

A cada uno de los docentes de la especialización de la Gerencia de Mantenimiento de la UIS que con su catedra motivaron y alentaron para mejorar mi proyecto de vida.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	19
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	20
1.1 SOBRE EL AEROPUERTO	20
1.2 SISTEMA ELÉCTRICO	23
1.2.1 Subestación TU..	26
1.2.1.1 Transformador de Potencia.....	29
1.2.1.2 Celdas compartimentadas de 3 a 36 kV..	34
1.2.1.3 Interruptores.....	38
1.2.1.4 Seccionadores..	42
1.2.1.5 Transformadores de Instrumentación.	43
1.2.1.6 Equipos de protección y medida.	46
1.2.2 Servicios Auxiliares.....	47
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	50
1.4 OBJETIVOS.....	51
1.4.1 Objetivo General.	51
1.4.2 Objetivos Específicos.....	51
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	52
2. MARCO TEORICO	53
2.1 EVOLUCIÓN MANTENIMIENTO PREVENTIVO.....	53

2.2 MANTENIMIENTO SUESTACIONES ELÉCTRICAS	56
2.2.1 Inspecciones visuales.....	57
2.2.2 Mantenimiento preventivo programado.....	58
2.2.3 Termografía.. ..	58
2.2.4 Pruebas físico-químicas al aceite (Transformadores).....	60
2.3 ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE LA FALLA.....	61
2.3.1 Definición.. ..	61
2.3.2 Historia.....	62
2.3.3 Aplicaciones.....	63
2.3.4 Creación de un AMEF.....	64
2.3.5 Cálculo Número de Prioridad por cada Riesgo (RPN).....	67
2.4 MARCO LEGAL	69
3. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA INFORMACIÓN	70
3.1 ANÁLISIS DE LA BITÁCORA DE EVENTOS	70
3.2 ANÁLISIS DE LOS EVENTOS ASOCIADOS A SOLICITUDES DE SERVICIO ELÉCTRICO	72
3.3 ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y DIAGRAMA ISHIKAWA.....	73
3.4 ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS.....	78
3.5 PLAN DE MANTENIMIENTO.....	82
3.5.1 Inspecciones visuales.....	83
3.5.2 Termografía.. ..	84
3.5.3 Mantenimiento de transformadores.	85

3.5.4	Mantenimiento de trenes de celdas.	85
3.5.5	Mantenimiento planta eléctrica.	86
3.5.5	Mantenimiento Sistema Puesta a Tierra (SPT) y Sistema Protección con Rayos y descargas Atmosféricas (SIPRA).....	86
4.	CONCLUSIONES	88
5.	RECOMENDACIONES.....	89
	BIBLIOGRAFÍA.....	90
	ANEXOS	94

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de Ubicación	20
Tabla 2. Características Técnicas S/E TU	27
Tabla 3. Características eléctricas de las celdas de MT	34
Tabla 4. Características eléctricas de las barras de MT	37
Tabla 5. Características de transformadores de tensión	44
Tabla 6. Razón de Transformación y capacidad de los CT's	45
Tabla 7. Inspección visual	57
Tabla 8. Imagen térmica portafusibles	59
Tabla 9. Rango de Gravedad.....	67
Tabla 10. Rango de Ocurrencia.....	68
Tabla 11. Rango Detección	68

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Aeropuerto Eldorado año 1959.....	21
Figura 2. Render Propuesta de modernización año 2009	23
Figura 3. Ubicación Subestaciones Eléctricas.....	24
Figura 4. Diagrama Bloques subestaciones OPAIN	25
Figura 5. Diagrama Bloques subestaciones OPAIN	26
Figura 6. Diagrama Unifilar Principal	28
Figura 7. Trenes de celdas 34,5 / 11,4 kV	28
Figura 8. Transformador de Potencia 20/30 MVA.....	29
Figura 9. Tren de Celdas 11,4 kV.....	35
Figura 10. Interruptor 34,5 kV	39
Figura 11. Interruptor 11,4 kV	40
Figura 12. Transformadores de instrumentación	43
Figura 13. Relé de protección.....	46
Figura 14. Planta Eléctrica 100kW.....	48
Figura 15. Transformadores 112,5 kVA.....	48
Figura 16. Tablero Rectificador / Inversor.....	49
Figura 17. Banco de Baterías	49
Figura 18. Banco de Condensadores	50
Figura 19. Objetivos del mantenimiento	55
Figura 20. Evolución Técnicas de Mantenimiento	55

Figura 21. Evolución de normativas del AMEF	63
Figura 22. Tipos de AMEF	64
Figura 23. Diagrama de flujo para elaborar AMEF	65
Figura 24. Matriz AMEF	66
Figura 25. Cálculo RPN	67
Figura 26. Diagrama Ishikawa	76

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Solicitud de servicios por año.....	70
Gráfica 2. Porcentaje Necesidades Tipo año 2015.....	71
Gráfica 3. Porcentaje Necesidades Tipo año 2016.....	71
Gráfica 4. Porcentaje Necesidades Tipo año 2017.....	72
Gráfica 5. Cantidad de Solicitudes de Servicio Eléctrico por Tipo	73
Gráfica 6. Clasificación de los eventos según agente causal 2015	74
Gráfica 7. Clasificación de los eventos según agente causal 2016	74
Gráfica 8. Clasificación de los eventos según agente causal 2016	75
Gráfica 9. AMEF Tren de Celdas 34,5 kV.....	79
Gráfica 10. AMEF Tren de Celdas 11,4 kV.....	80
Gráfica 11. Acople de Barras.....	80
Gráfica 12. Transformadores de Potencia 20/30 MVA	81
Gráfica 13. Transformadores de Instrumentación.....	81
Gráfica 14. Servicios Auxiliares	82

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Diagrama Unifilar	94
ANEXO B. Consolidado de solicitudes de servicios relacionados a fallos de la S/E TU	95
ANEXO C. Análisis de Modos y Efectos de Fallos	99

GLOSARIO

CELDA: división lógica de la subestación, correspondiente a una salida definida.

CONFIABILIDAD: capacidad de un equipo o dispositivo para funcionar sin falla bajo cierto régimen de trabajo en un determinado período de tiempo.

Confiabilidad del sistema: Suministro de un seguro y suficiente servicio de distribución.

DESCONEXIÓN: acción interrupción, mediante maniobras voluntarias, el suministro de energía eléctrica.

DISPONIBILIDAD: porcentaje de un tiempo que tiene una subestación, capaz de proporcionar un servicio, ya sea que el sistema precise o no funcionamiento.

FALLA: evento o fenómeno anormal que actúa en cualquier parte de un sistema, equipo o instalación, el cual altera sus condiciones de operación, suspendiendo parcial o permanente su operación normal.

INDISPONIBILIDAD: tiempo en el que un equipo o instalación no estuvo disponible para dar un servicio.

PRUEBAS EN SITIO O DE PUESTA EN SERVICIO (SAT): son las ejecutadas después de instalado el equipo en su sitio de operación y antes de ponerlo en servicio, para garantizar que éste, mantiene las características medidas en fábrica.

REPARACIÓN: tarea con el fin de reestablecer el estado de disponibilidad de un componente.

REPOSICIÓN DEL SERVICIO: acción mediante la cual se lleva un sistema de un estado no funcional a un estado de operación normal. Generalmente es el cierre de protecciones, interruptor, seccionador y demás elementos de corte.

SECCIÓN: división lógica de una barra.

TABLERO: cubículo en el que se instalan los diferentes equipos de protección y control.

TC`S: transformadores de corriente

TÍPICOS: celdas que por su diseño eléctrico, mecánico y funcionalidad son iguales entre sí, excepto en el nombre.

TP`S: transformadores de potencia

SF6: hexafluro de azufre

SUBESTACIONES: son usadas para la transformación del voltaje de la energía eléctrica y su distribución a diferentes equipos de una instalación.

RESUMEN

TITULO:

ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS, APLICADO A LA SUBESTACIÓN TERMINAL ÚNICA DEL AEROPUERTO INTERNACIONAL EL DORADO, LUIS CARLOS GALÁN SARMIENTO*

AUTOR:

JORGE ENRIQUE PULIDO**

PALABRAS CLAVE:

SUBESTACIÓN, AEROPUERTO EL DORADO, AMEF, INTERRUPCIÓN, CONFIABILIDAD, MANTENIMIENTO, DISPONIBILIDAD, FALLA, ISHIKAWA.

CONTENIDO:

OPAIN S.A., debe garantizar un alto grado de confiabilidad del sistema eléctrico del aeropuerto, con el fin de satisfacer a los más de 40 millones de pasajeros que transitan por la terminal, así pues, tiene actualmente un plan de mantenimiento basado en recomendaciones dadas por los fabricantes y basado en los conocimientos del grupo de talento humano con el que cuenta, convirtiendo esta labor de mantenimiento en una simple tarea rutinaria pudiendo descuidar los elementos más importantes de la subestación.

Esta monografía muestra el análisis de modos y efectos de fallas, aplicado a la Subestación Terminal Única del Aeropuerto Internacional El Dorado, Luis Carlos Galán Sarmiento, realizado con la finalidad primordial analizar los principales modos de falla que pueden causar la interrupción del fluido eléctrico al aeropuerto El Dorado, así como de proponer un mejoramiento al plan de mantenimiento para eliminar o reducir el riesgo de modo de falla aumentando la confiabilidad del sistema eléctrico para el terminal aéreo de pasajeros.

Este desarrollo está soportado por la información de la bitácora de mantenimiento estableciendo un período de análisis desde enero de 2015 hasta diciembre de 2017, así como también la interacción con los funcionarios del grupo técnico de mantenimiento eléctrico mediante la realización de mesas de trabajo, para desarrollar el análisis de causa usando el diagrama de Ishikawa.

* Monografía de grado

** Facultad de ingenierías Físico – Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.
Director: Omar Geovanni Opayome Pulido, Ingeniero Electricista

ABSTRACT

TITLE:

ANALYSIS OF MODES AND EFFECTS OF FAULTS, APPLIED TO THE SUBSTATION "TERMINAL ÚNICA" OF THE INTERNATIONAL AIRPORT EL DORADO, LUIS CARLOS GALÁN SARMIENTO*

AUTHOR:

JORGE ENRIQUE PULIDO**

KEYWORDS:

SUBSTATION, EL DORADO AIRPORT, AFME, INTERRUPTION, RELIABILITY, MAINTENANCE, AVAILABILITY, FAILURE, ISHIKAWA.

CONTENTS:

OPAIN S.A., must guarantee a high degree of reliability of the electric system of the airport, in order to satisfy the more than 40 million passengers that transit through the terminal, therefore, it currently has a maintenance plan based on recommendations given by the manufacturers and based on the knowledge of the group of human talent that counts, making this maintenance task a simple routine task and neglecting the most important elements of the substation.

This monograph shows the analysis of modes and effects of faults, applied to the Substation Terminal Única of the International Airport El Dorado, Luis Carlos Galán Sarmiento, made with the primary purpose to analyze the main failure modes that can cause the interruption of the electric current to the El Dorado airport, as well as proposing an improvement to the maintenance plan to eliminate or reduce the risk of failure mode by increasing the reliability of the electrical system for the passenger air terminal.

The development of this document is supported by the information of the maintenance logbook, establishing an analysis period from January 2015 to December 2017, as well as the interaction with the officials of the technical maintenance group through the creation of work tables , to develop the cause analysis using the Ishikawa diagram.

* Monograph

** Physical – Mechanical Faculty. Maintenance Management Specialization. Director: Omar Geovanni Opayome Pulido, Electrician Engineer

INTRODUCCIÓN

Con el fin de satisfacer a los más de 40 millones de pasajeros que anualmente transitan, y las más de 31 aerolíneas que operan dentro del Aeropuerto Internacional El Dorado Luis Carlos Galán Sarmiento, OPAIN S.A. (Actual concesionario) debe garantizar el alto grado de confiabilidad del sistema eléctrico para el aeropuerto, el diseño y construcción del sistema eléctrico fue planeado para garantizar la disponibilidad de energía eléctrica para la operación continúa del terminal, por lo tanto los equipos e instalaciones son relativamente nuevos, dentro de la estructura organizacional OPAIN S.A. existe la Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento, gerencia que cuenta con un equipo de talento humano encargado de mantener y operar las instalaciones eléctricas de la terminal aérea.

El mantenimiento que se realiza actualmente a la subestación Terminal Única se basa en las recomendaciones dadas por los fabricantes de los diferentes equipos instalados y la experticia del equipo de talento humano generando así una estrategia de mantenimiento preventivo periódico, que sin poder ver más allá de lo que se requiere para aumentar la confiabilidad del sistema y siendo una simple tarea repetitiva se pueden omitir aspectos relevantes como la afectación al aeropuerto y la condición de los equipos.

Con esta monografía se pretende elaborar un Análisis de Modos y Efecto de Fallas (AMEF) y obtener el número de prioridad de riesgo (RPN) pudiendo establecer el mejor plan de mantenimiento que apunte a eliminar o reducir el modo de falla dentro de la Subestación Terminal Única, adicional de garantizar una alta confiabilidad en la operación del terminal aéreo.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 SOBRE EL AEROPUERTO

El Aeropuerto Internacional El Dorado Luis Carlos Galán Sarmiento (El Dorado) ubicado en la ciudad de Bogotá (Ver Tabla 1), es el aeropuerto principal y más importante para Colombia, se encuentra ubicado a unos quince kilómetros (15 km) del centro de la capital, entre las localidades de Fontibón y Engativá. Actualmente recibe vuelos de toda América y los principales de Europa.¹

Tabla 1. Características de Ubicación

CARACTERÍSTICA	UNIDAD	VALOR
Altura sobre el nivel del mar	M	2.548
Temperatura (Máx./Med./Mín.) anual	°C	22/13,4/3,4
Velocidad máxima del viento	Km/h	9,36
Humedad relativa (Máx./Med./Mín.) anual	%	87/80/72
Nivel Ceráunico	Días – año	120
Nivel de contaminación ambiental		Medio

El terminal de pasajeros “Eldorado” fue planeado y diseñado por el presidente militar General Gustavo Rojas Pinilla, con el fin de reemplazar en su momento el aeropuerto de Techo el cual ya se encontraba con su operación saturada. Este terminal fue entregado en el año de 1959, siendo su inauguración el 10 de diciembre de 1959, en su apertura se contó con una exposición aeronáutica con

¹ Aeropuertos del mundo [sitio web]. Guía del pasajero - Aeropuerto de Bogotá El Dorado (BOG). (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: <https://www.aeropuertosdelmundo.com.ar/americanadelsur/colombia/aeropuertos/el-dorado.php>

unos 16 aviones, 12 de propulsión a chorro, y cuatro B-6 siendo estos los que más impresión causaron al público.

Figura 1. Aeropuerto Eldorado año 1959



Fuente: El Espectador

En el año 1981 se inició la construcción de un nuevo terminal el cual sería denominado Terminal Puente Aéreo inaugurado por el entonces presidente Julio Cesar Turbay, como un terminal anexo para canalizar hacia Cali, Medellín, Miami y Nueva York. Para el año de 1998 se construye una segunda pista de vuelo en el costado sur del terminal aéreo logrando aumentar la capacidad de operaciones, con esto el aeropuerto Eldorado tendría una de las pistas de aterrizaje más largas del mundo (3.800 m)².

² PortalBogotá.com. [sitio web]. La historia de El Dorado marzo de 2015. (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: <http://www.portalbogota.com/Historia-aeropuerto-el-Dorado-Bogota.html>

La demanda presente de pasajeros ha llevado a que actualmente se desarrolle un proyecto para construir un aeropuerto más moderno y con mayor capacidad, tanto para vuelos comerciales como de carga. Inicialmente se había planeado realizar únicamente la remodelación y ampliación de la terminal actual.³ Para ello el gobierno decide abrir un proceso licitatorio para realizar la remodelación del terminal mediante un esquema de concesión para realizar la modernización y operación de El Dorado. En la licitación se hicieron presentes cinco consorcios: Concesión El Dorado, de Aeropuertos Argentinos; El Dorado Nuevo Milenio, del que participan Constructora Colpatria y Aeropuertos de Houston; AER Dorado, encabezada por Stratis del ex presidente de Avianca, Juan Emilio Posada; Operadora Aeroportuaria Internacional (Opain), del exministro Jaramillo y ASA Internacional, de las familias Nule y Char. Durante la audiencia pública se escucharon nuevamente los argumentos de los participantes y por esta razón el hecho se extendió durante todo el jueves.⁴

El jueves 24 de agosto de 2006 siendo las 8:55pm, se adjudicó la concesión a OPAIN, concesión estimada por un período de veinte (20) años, para realizar la operación de los terminales de pasajeros y de carga, así como también, el terminal puente aéreo y realizar otras obras.

Las obras iniciaron en septiembre de 2007 y culminaron en octubre de 2014, debido a la creciente demanda de viajeros OPAIN y el Gobierno llegan a un consenso para realizar una ampliación a las nuevas instalaciones con el fin de lograr aumentar la capacidad actual de 50 operaciones por hora y 27 millones de

³ Wikipedia [sitio web]. Aeropuerto Internacional El Dorado. (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Aeropuerto_Internacional_El_Dorado

⁴ Semana [sitio web]. El consorcio Opain ganó la licitación para modernizar y operar el aeropuerto El Dorado. (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: <https://www.semana.com/online/articulo/el-consorcio-opain-gano-licitacion-para-modernizar-operar-aeropuerto-el-dorado/80607-3>

pasajeros al año, a 90 operaciones por hora y unos 40 millones de pasajeros para los siguientes seis años.⁵

Durante el año de 2012 y en memoria a Luis Carlos Galán se decreta mediante la Ley 1529 de 2012 se cambia su nombre a “Aeropuerto Internacional El Dorado Luis Carlos Galán Sarmiento”⁶

Figura 2. Render Propuesta de modernización año 2009



Fuente: PortalBogotá

1.2 SISTEMA ELÉCTRICO

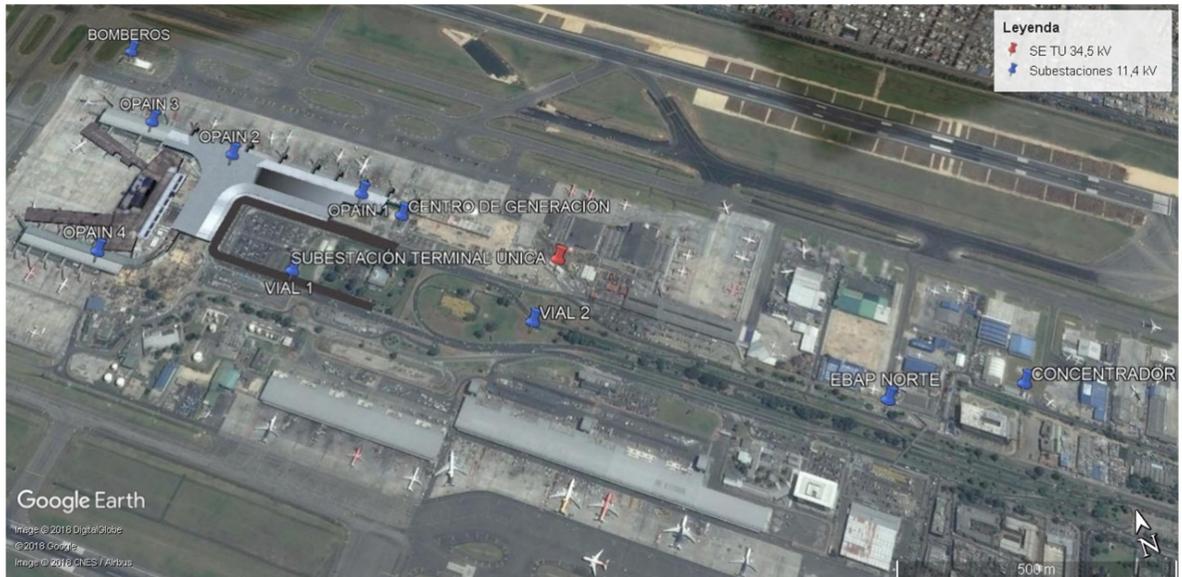
El Dorado se alimenta eléctricamente desde la Subestación Eléctrica Terminal Única (S/E TU), es la subestación eléctrica principal que suministra energía eléctrica a las subestaciones secundarias o de distribución que componen la Red

⁵ El Espectador [sitio web]. El Dorado, de una leyenda a un aeropuerto que vuela al futuro. (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/economia/el-dorado-de-una-leyenda-un-aeropuerto-vuela-al-futuro-articulo-539604>

⁶ Ley 1529 de 2012, Colombia. Diario Oficial No. 48.432 de 16 de mayo de 2012. (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/ley152916052012.pdf>

Eléctrica Aeroportuaria (REAP): OPAIN 1, OPAIN 2, OPAIN 3, OPAIN 4, Centro de Generación, Bomberos, Concentrador de Comunicaciones, EBAP Norte, Posiciones remotas y Viales.

Figura 3. Ubicación Subestaciones Eléctricas



Fuente: Google Earth

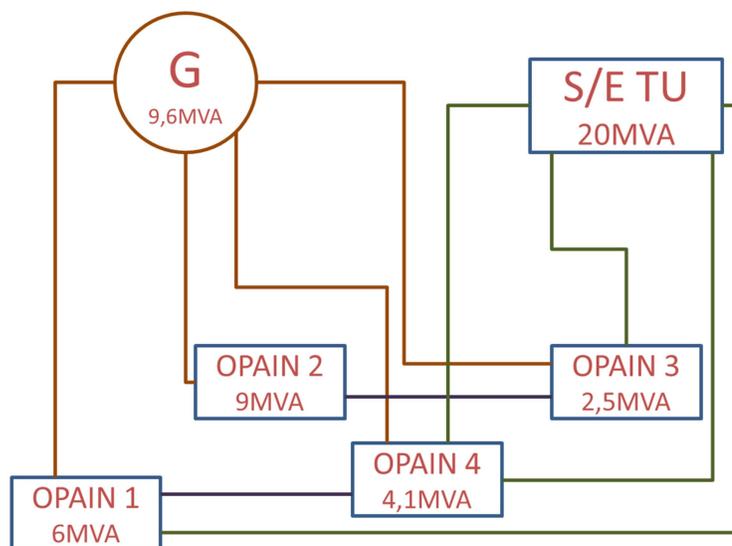
El operador de red CODENSA entrega cuatro (4) circuitos a un nivel de tensión de 34,5 kV con la potencia suficiente para suplir todos los servicios requeridos por El Dorado, estos circuitos se encuentran conectados a una barra principal en conexión paralelo, permitiendo así, que en caso del fallo de uno de ellos no se presente un paso por cero en el fluido eléctrico de la subestación principal.

Los circuitos entregados son: Circuito 4 Subestación Florida; Circuito Printer Subestación Fontibón; Circuito Interconexión NTC; Circuito El Siglo (Subestación Existente).

Las subestaciones “OPAIN” se encuentran dentro del terminal aéreo, ubicadas de tal forma que puedan suplir energía en forma centralizada dentro del terminal permitiendo distribuciones óptimas para alimentación de cuartos eléctricos. La potencia de cada una de ellas es: OPAIN 1 - 6MVA; OPAIN 2 - 9MVA; OPAIN 3 - 2,5MVA; OPAIN 4 - 4,1MVA.

Como medida de contingencia ante la eventual falla en la S/E TU, y/o de los alimentadores de las subestaciones OPAIN se cuenta con el respaldo de un centro de generación conformado por seis (6) plantas eléctricas con capacidad cada una de 1,6MVA para un total de 9,6MVA para dar respaldo a los equipos de la red básica (Iluminación, Transporte vertical y horizontal, UPS), adicional se encuentran anilladas las subestaciones OPAIN 1 con OPAIN 4 y OPAIN 2 con OPAIN 3, en la Figura 4 se muestra el diagrama de bloques de esta configuración.

Figura 4. Diagrama Bloques subestaciones OPAIN



Las demás subestaciones se encuentran fuera del terminal aéreo pero son parte fundamental para la operación de El Dorado, y su esquema eléctrico generalmente viene compuesto por alimentación principal (Provenientes de S/E TU), alimentación anillo, y a diferencia de las subestaciones OPAIN, cada edificio

cuenta con su generador eléctrico propio (Ver Figura 5). Las potencias de estas subestaciones son: EBAP Norte – 1,25MVA; bomberos – 300 kVA; posiciones remotas – 112,5kVA; concentrador de comunicaciones – 1,5MVA; viales – 112,5 kVA.

Figura 5. Diagrama Bloques subestaciones OPAIN



1.2.1 Subestación TU. La Subestación tiene como nivel de tensión primario 34,5 kV a partir de los circuitos alimentadores de subestaciones CODENSA y nivel de tensión secundario de 11,4 kV para alimentar las subestaciones secundarias, en la Tabla 2 se resumen las características eléctricas de la subestación.

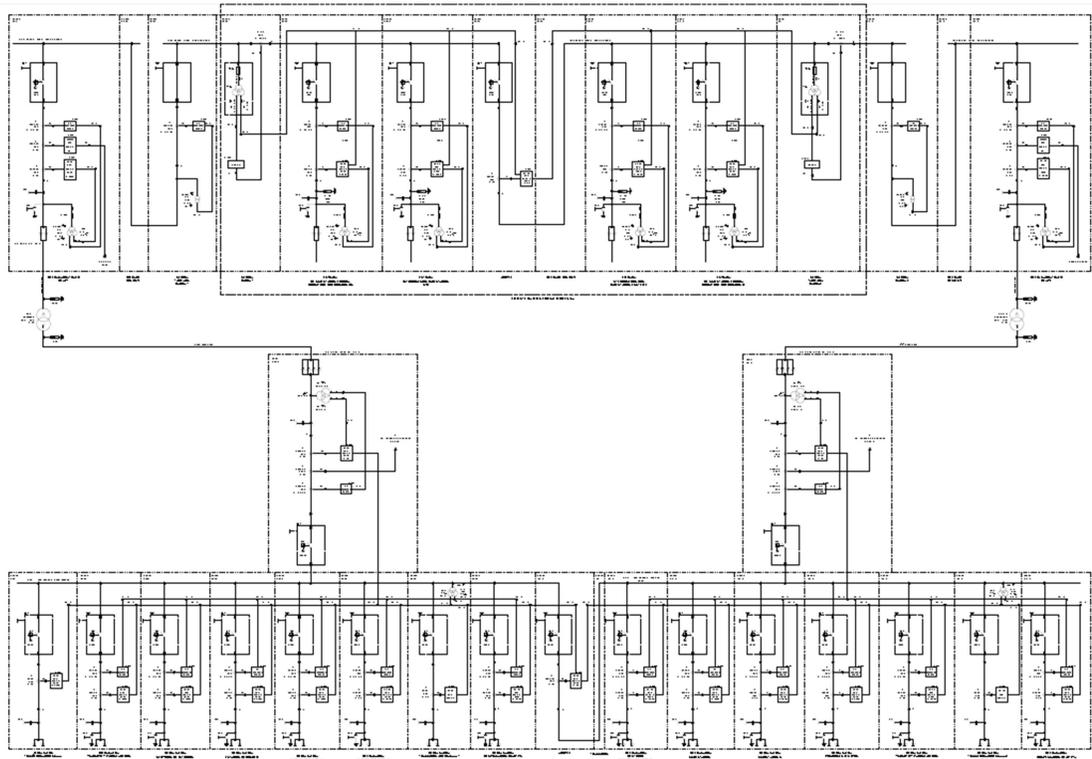
Los componentes principales de la subestación se listan a continuación y se pueden identificar en la Figura 6. Diagrama Unifilar Principal:

- Dos (2) transformadores de potencia de 20/30 MVA. ...Ver 1.2.1.1 Transformador de Potencia...
- Equipos de maniobra y protección de la Subestación siete (7) Interruptores a 34,5 kV y dieciocho (18) interruptores a 11,4 kV. ...Ver 1.2.1.2 Celdas compartimentadas de 3 a 36 kV.; 1.2.1.3 Interruptores.; 1.2.1.4 Seccionadores....
- Dos (2) transformadores Servicios Auxiliares de 112.5 kVA. ...Ver 1.2.2 Servicios Auxiliares...
- Grupo electrógeno de 100 kW. ...Ver 1.2.2 Servicios Auxiliares...
- Equipo rectificador, inversor y banco de baterías. ...Ver 1.2.2 Servicios Auxiliares...

Tabla 2. Características Técnicas S/E TU

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	VALOR	
Tensión nominal	kV	34,5	11,4
Tensión asignada del equipo	kV	36	17,5
Frecuencia asignada	Hz	60	60
Nivel básico de aislamiento asignado al impulso tipo rayo (BIL) – Equipos de corte	kV pico	200	110
Nivel básico de aislamiento asignado al impulso tipo rayo (BIL) – Demás equipos	kV pico	170	95
Nivel de tensión asignado soportado a la frecuencia industrial	kV	70	20
Corriente asignada de cortocircuito para el equipo de subestación	kA	25	
Distancia de fuga mínima nominal	mm/kV	20	
Sistema puesto a tierra		En Y	

Figura 6. Diagrama Unifilar Principal



Fuente: Planimetría S/E TU

Figura 7. Trenes de celdas 34,5 / 11,4 kV



1.2.1.1 Transformador de Potencia. El transformador tiene la capacidad de entregar 20 MVA (ONAN) y 30 MVA (ONAF) a la tensión nominal (34.5/11.4 kVac). Este valor de potencia, lo entrega el transformador, en operación continua, sin importar la posición del cambiador de tomas de voltaje. La potencia nominal es suministrada por el transformador en condiciones de refrigeración natural (ONAN) para 20 MVA y refrigeración forzada (ONAF) para 30 MVA.

El transformador se alimenta con una tensión primaria de 34.500 V, bajo condiciones de régimen normal y entrega una tensión de 11.400 V, en condiciones normales de operación. Frecuencia de operación de régimen permanente: 60 Hz.

Figura 8. Transformador de Potencia 20/30 MVA



Cambiador de Taps: Dispositivo para cambiar la posición del voltaje primario en etapas de 2.5% del valor de la tensión nominal y cinco posiciones en total con la

tensión nominal en la posición 3 más dos posiciones por debajo y dos posiciones por encima. El cambiador de tomas del transformador es para operación bajo carga motorizada y de operación remota.

El transformador soporta, los esfuerzos térmicos y dinámicos derivados de cortos circuitos.

El fabricante calculó el esfuerzo máximo (para el cual son sometidos los arrollamientos del transformador) con base en el valor de impedancia de corto circuito, asumiendo potencia infinita para el circuito alimentador.

El proveedor seleccionó las condiciones de falla más desfavorables para cada arrollamiento. Los siguientes valores fueron considerados en el cálculo:

- Esfuerzos Dinámicos: derivados de la corriente pico asimétrica igual a 2.55 veces la corriente simétrica de corto circuito. Esta última se obtiene usando el valor de impedancia de corto circuito aplicable.
- Esfuerzos Térmicos, derivados de una duración de la falla de: 3 segundos si la corriente de corto circuito es menor que 20 veces la corriente nominal y 2 segundos si la corriente de corto circuito es igual o mayor que 20 veces la corriente nominal.

En todos los casos la temperatura final de los arrollamientos no excede 250°C y los requerimientos de corto circuito, cumplen con la norma ANSI C.57.12.

El transformador, está inmerso en aceite y tiene un medio de refrigeración natural (ONAN) y un medio de refrigeración forzada (ONAF).

Para obtener la refrigeración normal con aire (ONAN), el transformador está provisto con baterías de radiadores acopladas (flanged) al tanque. Las baterías de

radiadores están equipadas con válvulas de drenaje y conectores de tierra en caso de no existir continuidad eléctrica con el tanque. Para obtener la refrigeración forzada (ONAF) se emplean ventiladores sobre las baterías de radiadores y están conectadas a los servicios auxiliares de la subestación.

El sistema de refrigeración natural ONAN, cumple con las siguientes características:

- Los radiadores son tipo panel corrugados y desmontables, permitiendo la limpieza y pintura exterior fácilmente.
- Los radiadores conectados al tanque principal son desmontables y están provistos de tapones en la parte superior e inferior para llenado y drenaje.

Para obtener la refrigeración forzada (ONAF) se emplean ventiladores sobre las baterías de radiadores y están conectados a los servicios auxiliares de la subestación.

El control de los ventiladores es de modo automático y manual, escogidos mediante un selector. En modo automático el sistema de refrigeración es controlado por el monitor de temperatura. En modo manual el sistema arranca y para por medio de botones pulsadores o de un interruptor.

El selector manual-automático tiene un juego de contactos adicional para señalización remota para cualquier posición.

Así mismo, tiene contactos de alarma para sobrecarga del motor, motor parado y disparo de la alimentación principal de los motores. Cada motor tiene su propio contactor y protección térmica. El sistema de control incluye señalización por falta de tensión auxiliar de CA y de CC.

El fabricante proveyó todos los contactores, relés, lámparas indicadoras, dispositivos de protección e interruptores miniatura necesarios para el control de los ventiladores.

El núcleo viene construido con lámina de grano orientado con bajas pérdidas eléctricas y perfectamente sujetado para prevenir vibraciones y ruidos. Los tornillos de fijación de cada paquete son cuidadosamente aislados para reducir pérdidas y evitar puntos calientes. Los arrollamientos son de cobre aislados con máximo cuidado usando los mejores materiales disponibles. El fabricante hizo todas las provisiones necesarias para prevenir deformaciones o movimientos de los arrollamientos durante cortos circuitos. Esto también aplica a las conexiones de los arrollamientos con sus terminales. El neutro secundario siempre tiene acceso a través de su propio terminal.

El arrollamiento de alto voltaje es equipado con cambiador de derivaciones bajo carga (On-load). El control es externo y de operación remota. El cambiador de taps está completo con indicador de posición provisto de un dispositivo de bloqueo seguro y apropiado. No es posible ubicar el cambiador de taps en una posición intermedia entre dos taps diferentes.

El cambiador de derivaciones tiene cinco posiciones escalonadas en pasos de 2.5% del valor del voltaje nominal (34.5 kV), dejando la posición 3 para la tensión nominal con dos posiciones por debajo y dos posiciones por encima. El cambiador de tomas del transformador es para operación bajo carga motorizada y de operación remota.

El sistema de control del cambiador de derivaciones bajo carga incluye los contactores, contador de operaciones, indicador de posición con puntos máximos y mínimos, transmisor para indicación remota de posición, pulsadores para subir y

bajar la derivación, selector de control local / remoto, y protección térmica del motor. Los mandos manuales, la señalización de estado y las alarmas están presentes en el tablero de control.

El suministro incluye un relé regulador de tensión numérico con ajustes de tiempo graduables. El relé tiene capacidad para controlar la operación en paralelo de dos bancos de transformadores para lo cual dispone de un selector Maestro-Seguidor. El relé tiene compensación por caída de tensión y bloqueo por sobrecorriente. El relé regulador de tensión está ubicado en el mismo gabinete de control del transformador.

El regulador de tensión está integrado al sistema de control para transmitir la información de posiciones del cambiador de derivaciones bajo carga, las posiciones de los selectores de operación y los comandos Subir – Bajar.

El transformador cuenta con cajas de cerramiento para los terminales de Alta y Baja tensión con un grado de cerramiento mínimo NEMA 4X. El dimensionamiento de las cajas terminales de Baja Tensión y Alta Tensión cumple con las condiciones indicadas a continuación:

- El radio de curvatura de los conductores cumple con el valor definido para cada tipo de cable a instalar, conservando adicionalmente una distancia mínima de las partes vivas a tierra de 40 cm.
- Tapa con tornillos en el lado de Alta Tensión y puerta con cerradura en el lado de Baja Tensión.
- Borne para conexión a tierra del neutro dentro de la caja.
- En ambas cajas (AT y BT), la tapa inferior es removible para facilitar el maquinado de orificios para tubería conduit de diámetro hasta 6 pulg.

1.2.1.2 Celdas compartimentadas de 3 a 36 kV. Se entiende como Celdas de Media Tensión, al conjunto de cubículos de celdas tipo Metal-clad, en las cuales se ubican equipos de maniobra, medida, protección y control; montados en uno o más compartimientos insertos en una estructura metálica externa, y que cumple la función de recibir y distribuir la energía eléctrica.

En la siguiente tabla se indican las características generales de los sistemas eléctricos de media tensión y servicios auxiliares.

Tabla 3. Características eléctricas de las celdas de MT

Característica	CODENSA
Tensión nominal sistema (kV)	
- MT1	34.5 kV
- MT2	11,4 / 13,2 kV
Clase de Tensión (kV)	Medio (II)
- MT1	36 kV
- MT2	17,5 kV
BIL MT (kV)	
- MT1	170
- MT2	75
Frecuencia (Hz)	60
Nivel cortocircuito simétrico (kA)	
- MT1	16
- MT2	25
Nº Fases	3
Voltaje auxiliar CA (Vca)	208/120 V
Voltaje auxiliar CC (Vcc)	125+10%- 20%

El diseño y fabricación de las Celdas de Media Tensión, son del tipo a prueba de arco interno y cumplen con los criterios indicados en la Norma IEC 62271-200 Anexo A: “Method for testing the metal-enclosed switchgear and controlgear under conditions of arcing due an internal fault”. El certificado de la prueba de arco interno está vigente y emitido por un organismo independiente del fabricante.

Figura 9. Tren de Celdas 11,4 kV



El endosamiento de dos cubículos de celdas ya sea por pared compartida o doble pared metálica, posee propiedades tales que aseguren la no propagación de un cubículo de celda a otro, daños originados por fallas producidas por arcos internos.

Los equipos y materiales que cumplen una misma función son idénticos e intercambiables entre sí.

Las Celdas de Media Tensión son de tecnología con aislamiento en aire (AIS –Air Insulated Switchgear) o con aislamiento en gas (GIS – Gas Insulated Switchgear).

El equipo suministrado está anclado al piso según las recomendaciones del fabricante y soporta las solicitudes sísmicas para CODENSA indicadas en la sección 4.1. El suministro de las celdas debe incluir todos los elementos y accesorios necesarios para el correcto montaje y adecuado anclaje; así como los necesarios para el acoplamiento entre cubículos de celdas.

Las Celdas de Media Tensión son autosoportadas, para montaje con pernos de anclaje sobre fundación de concreto. Además, tiene la suficiente rigidez para soportar los esfuerzos producidos por el transporte, instalación y operación, incluyendo sismos y cortocircuitos.

Los elementos de lectura y maniobra instalados en el frente de cada cubículo de celda se ubicaron a una altura apropiada para un operador situado frente a los cubículos de celdas sin que requiriera del uso de elementos especiales para visualizar u operar los diferentes dispositivos de las Celdas.

Se incluyó en la parte frontal de las Celdas de Media Tensión un esquema mímico de los componentes de acuerdo con el código de colores de cada Empresa. Los mímicos son de un material resistente al paso del tiempo y su fijación garantizan una adhesión adecuada y permanente a la celda, no se aceptan adhesivos.

Las Celdas de Media Tensión cuentan con un sistema de juego de barras simples u otro, según se indica en la siguiente tabla:

Tabla 4. Características eléctricas de las barras de MT

Característica	CODENSA	
Configuración Barra	Simple	
Clase de Tensión [kV]	17.5 kV	36 kV
Capacidad [A]	2500	1250
Corriente Cortocircuito [kA]	25	16

Además, tienen un conjunto de barras de fase y una barra de tierra, horizontales a través de todo su largo. Estas barras se diseñaron de tal forma que permiten conexiones futuras en ambos extremos.

En el caso de las Celdas aisladas en aire, las barras, uniones y derivaciones de fase son completamente aisladas en fábrica utilizando material aislante epóxico o superior termocontraíble retardante a la llama. En las uniones y derivaciones se proveerá de cubierta aislante removible.

Las Barras se diseñaron para las capacidades de transporte y cortocircuito indicadas en la Tabla 4. Características eléctricas de las barras de MT la ubicación de las fases en los compartimientos de entrada y salida de cable es de izquierda a derecha o de arriba hacia abajo en el orden 1-2-3, RST o ABC.

Los colores de identificación de las fases están acordes a la reglamentación RETIE. Las barras disponen de puntos que permitan su conexión a tierra mediante elementos portátiles de puesta a tierra.

El diseño de las barras y sus soportes consideró las expansiones de estas debido a los efectos térmicos por las corrientes de carga normal y de cortocircuito, así como los esfuerzos dinámicos de un cortocircuito trifásico simétrico máximo.

La barra de tierra se dispone de forma que permita la conexión de prensas de puesta a tierra u otros dispositivos en todas las celdas

Las celdas tienen los enclavamientos recomendados por la norma IEC62271-200, necesarios para garantizar la seguridad del personal y del propio material, imposibilitando falsas maniobras, tanto si son efectuadas con accionamiento eléctrico o mecánico.

Cada celda incorpora los enclavamientos de seguridad pertinentes entre los accionamientos eléctricos del interruptor y seccionadores (motores) y los accionamientos manuales (manivela o palanca).

La corriente soportada nominal de corta duración (1 segundo) para las celdas es de 25 y 16 kA, y de 62,5 kA y 40 kA respectivamente, valor de cresta de la corriente soportada nominal de corta duración.

1.2.1.3 Interruptores. Los interruptores son tripolares, de energía acumulada por resorte accionado por motor, con mecanismos de cierre y apertura operados eléctricamente. El resorte es cargado automáticamente después de completada una operación de cierre o apertura.

Para el caso de celdas aisladas en aire (AIS), los interruptores son del tipo extraíbles y para el caso de celdas aisladas en gas (GIS) los interruptores podrán ser fijos.

Cada interruptor es suministrado con una bobina de cierre y dos de apertura, las cuales podrán ser accionadas independientemente por comandos local o remoto. Los circuitos de cierre y apertura tienen incorporados los respectivos

enclavamientos de posición del interruptor. La secuencia de operación del interruptor es según IEC-62271-100.

Figura 10. Interruptor 34,5 kV



Todos los contactos auxiliares del interruptor son del tipo secos, libres de potencial y eléctricamente independientes.

Figura 11. Interruptor 11,4 kV



Los interruptores operan en las posiciones de servicio y prueba. Los interruptores deben extraerse a la posición de prueba con la puerta cerrada. El mecanismo de accionamiento para la inserción y la extracción del interruptor, en el caso del tipo extraíbles, deben disponer de algún dispositivo, que no obligue al operador a efectuar esfuerzos mayores para ejecutar la operación deseada. Este mecanismo deberá además dar una señal positiva de fin de carrera para evitar daños al

interruptor. Todos los interruptores del mismo tipo y capacidad son intercambiables.

Para insertar, retirar y transportar los interruptores de las Celdas se deberán proveer los elementos necesarios que lo permitan, ya sea por un mecanismo propio, adosado al interruptor, o externo. En este último caso se proporcionaron dos carros hidráulicos con un sistema de enganche a las celdas para permitir la maniobra. El carro es adecuado para todos los tipos de interruptores y transformadores de tensión.

Es imposible extraer o insertar un interruptor si está cerrado. Es imposible cerrar el interruptor a no ser que esté insertado en posición de servicio o en la posición de prueba.

Son visibles en su frente sin la necesidad de abrir puertas, a lo menos los siguientes indicadores y controles:

- Indicación mecánica del estado del interruptor (abierto-cerrado). Indicación del estado del resorte (cargado-descargado) Pulsadores de cierre y apertura del interruptor.
- Se emplearán interruptores termomagnéticos independientes para proteger los circuitos de control de cierre, apertura, y comando de motor.
- Contador de Operaciones.

El sistema de conexión del control entre la celda y el Interruptor, en el caso extraíble, es por enchufe en la parte frontal del interruptor y cables en ducto flexible que permita la inserción o extracción del interruptor de la celda, con un enclavamiento mecánico que impida insertar el interruptor si no está en su posición el enchufe del alambrado de control.

1.2.1.4 Seccionadores. Los seccionadores de puesta a tierra contarán con poder de cierre conforme al nivel de cortocircuito establecido para la instalación. Son trifásicos con accionamiento manual desde el frente de la celda.

Los seccionadores poseen al menos cuatro (4) contactos NA y cuatro (4) contactos NC; que actúan en las posiciones extremas.

Existe un enclavamiento mecánico que impide cerrar el seccionador de puesta a tierra, si el interruptor correspondiente está en la posición de servicio. Los seccionadores de puesta a tierra están conectados sólidamente a tierra mediante barras de cobre rectangulares o trencillas de una sección no inferior a 70 mm².

Cuando la funcionalidad de transferencia a barras este diseñada en base a seccionadores, todos los seccionadores son de operación motorizada, alimentados en corriente continua.

Los seccionadores poseen la superficie de los contactos principales plateados. El esquema de enclavamiento eléctrico evita la apertura o cierre de un seccionador con carga.

Los motores de accionamiento de los seccionadores son accesibles para el mantenimiento desde el exterior, y permiten las operaciones de apertura y cierre manual en caso de falla del sistema motorizado.

Las Celdas tienen lo siguiente:

- Indicación eléctrica de la posición de los seccionadores (abierto-cerrado).
- Mecanismo eléctrico y manual de cierre y apertura.

1.2.1.5 Transformadores de Instrumentación. Los Transformadores de Tensión e Intensidad son del tipo encapsulados en resina epóxica. Los transformadores de instrumentación son diseñados, construidos y probados de acuerdo con las Norma IEC 60044.

Los terminales primarios y secundarios tienen marcas de polaridad. Todos los terminales secundarios deben ir alambreados a una regleta de bornes fácilmente accesible.

Figura 12. Transformadores de instrumentación



Se clasificaron en dos grupos estos transformadores: Transformadores de Tensión (PT's) y Transformadores de Intensidad (CT's)

El sistema de conexión de los secundarios es por enchufe ubicado en el frente de la plataforma de PT's y cables en ducto flexible que permite la inserción o extracción de los PT's de la celda, con un enclavamiento mecánico que impide

insertar los PT's si no está en su posición el enchufe de los secundarios (similar a los Interruptores).

Los transformadores de tensión deberán tener un sistema que permita descargarlos a tierra, accionado con el retiro de estos. En el caso de las celdas simple barra se midieron los voltajes: Voltaje de la barra principal y opcionalmente cuando se indique el voltaje de Cable MT de alimentación desde el Transformador.

En el caso de las celdas doble barra, en el conjunto de celdas, se midieron los siguientes voltajes:

- Voltaje de cables MT de alimentación desde el transformador.
- Voltaje de la barra principal.
- Voltaje de la barra auxiliar.

Los transformadores de tensión son de la precisión, razón de transformación y capacidad de acuerdo con las características técnicas requeridas en la Tabla 5. Características de transformadores de tensión

Tabla 5. Características de transformadores de tensión

Distribuidora	Características
Codensa	3x1F 34,5 ; 13,2 ó 11,4: $\sqrt{3}$ /0 ; 115: $\sqrt{3}$ - 0, 115: $\sqrt{3}$ CL0,5-10VA

Los transformadores de intensidad (CT's) tienen las características eléctricas del circuito primario en que van ubicados; tienen la misma capacidad nominal de cortocircuito que el circuito primario.

Los transformadores de intensidad son de la precisión, razón de transformación y capacidad de acuerdo con las características técnicas requeridas, según la Tabla 6. Razón de Transformación y capacidad de los CT's

Tabla 6. Razón de Transformación y capacidad de los CT's

	Empresa	Codensa
TI Entrada Medida	Celda	Entrada y Acoplamiento
	Cantidad	2 x (3x1F)
	Razón	2000/5-5A
	Medida	CL0,5 -20VA
TI Salida	Razón	600/5 A
	Medida	CL0,5 - 10 VA
	Protección	5P20 ó 5P30 2,5 ó 5 VA

Los terminales de los CT's, son cortocircuitables. Los terminales primarios y secundarios tienen marcas de polaridad. Los terminales secundarios están alambrados a una regleta de terminales accesibles.

En el caso de las celdas simple barra se midieron las siguientes intensidades:

- Intensidad en entrada a barra principal.
- Intensidad en el acoplador o interconexión de barras (si es requerido)
- Intensidad en salidas de alimentador.

En el caso de las celdas de más de una barra, en el conjunto de celdas, se midieron las siguientes intensidades:

- Intensidad en cables MT de alimentación desde el transformador.
- Intensidad en entrada a barras (principal y auxiliar.)
- Intensidad en el acoplador o interconexión de barra.
- Intensidad en salidas de alimentador.

1.2.1.6 Equipos de protección y medida. Relé de protección multifunción, con funciones de sobrecorriente de fase, residual, instantáneo y temporizado, bajo voltaje y medidas.

Relés 86B para bloqueo con reposición manual y con contactos auxiliares.

Figura 13. Relé de protección



Instrumentos de medida digital (Voltaje, corriente, potencias) que permiten indicación local en display y además integración de las mediciones al sistema digital para automatización de subestaciones.

Unidad de control que realiza órdenes de comando y monitoreo de funciones de alarma del transformador.

Relé diferencial para Transformador y Relé 86T para bloqueo con reposición manual. El relé diferencial para el transformador se ubicó en el cubículo celda de entrada a barra principal (o auxiliar).

Relé de protección multifunción, con funciones de sobrecorriente de fase, residual, instantáneo, temporizado y falla de interruptor.

Relé de protección de sobrecorriente de fase, residual, instantáneo y temporizado, baja frecuencia, reconexión, falla interruptor, direccional homopolar y medidas. La protección de baja frecuencia (81BF) mencionada en el párrafo anterior, es de 4 escalones con precisión de 0.01Hz y pendiente (81D).

1.2.2 Servicios Auxiliares Los servicios auxiliares suplen todo el control de las celdas compartimentadas, estación de control (IHM), y la iluminación de la S/E TU. Aunque de estos no depende el suministro de energía para las subestaciones de la REAP son de gran importancia para la operabilidad de la subestación de forma remota y automática.

Se componen por los siguientes equipos:

- Planta eléctrica de 100kW, 208 V, marca Cummins, en cabina insonorizada, y tanque de combustible externo para garantizar una autonomía de doce (12) horas.

Figura 14. Planta Eléctrica 100kW



- Dos (2) transformadores de 112,5 kVA, 11,4kV / 208 V, marca SIEMENS, inmersos en aceite, refrigeración natural.

Figura 15. Transformadores 112,5 kVA



- Rectificador / Inversor de 10 kVA, 125 Vdc, 200 A, con banco de baterías selladas, libres de mantenimiento. Tiene toda la lógica de control para garantizar la continuidad de los servicios auxiliares. Se considera como red principal la proveniente del tren de celdas de 11,4 kV, red alterna el generador eléctrico de 100 kW, durante la interrupción del servicio pasa a batería para que no se refleje un cruce por cero sobre los servicios.

Figura 16. Tablero Rectificador / Inversor



Figura 17. Banco de Baterías



- Banco de condensadores*: Dos bancos de capacitores interperie de 2,4 MVAR c/u formado por cuatro pasos de 600 kVAr a la tensión de 3x 11,4 kV – 60 Hz. El tablero dispone de un control automático IMS Smart Cap 485, control manual y remoto con protecciones de desbalance.

Figura 18. Banco de Condensadores



1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El contrato de concesión entre la ANI y OPAIN, establece en uno de sus apéndices que no se permite tener indisponibilidad del servicio en más de 60 horas durante el semestre, sumado a lo anterior tener un corte de del fluido eléctrico por un instante de tiempo igual o mayor a 10 minutos, representa un alto impacto económico para OPAIN.

* Aunque el banco de condensadores no es parte de los Servicios Auxiliares, no es un elemento crítico para la operabilidad de la subestación, ni para garantizar el suministro de energía de las subestaciones REAP.

El plan de mantenimiento estructurado por la jefatura de mantenimiento Electromecánico para la S/E TU, consiste en realizar inspecciones visuales semanales basándose en las recomendaciones dadas por el constructor y/o fabricante, sin tener claro cuales son los componentes principales que componen la subestación y a los que se debe inspeccionar con mayor detalle para garantizar la correcta operación de la subestación y así mismo aumentar la confiabilidad del sistema eléctrico. Sin embargo, y como complemento a esta rutina se cuenta con contrato de mantenimiento anual con una empresa, la cual, solamente se limita a realizar reajuste de conexiones, limpieza de equipos y medida de resistencia de aislamiento de los equipos.

En la actualidad se han presentado fallos menores pero que toman bastante tiempo al personal técnico poder resolverlo ocasionando interrupciones al fluido eléctrico de las principales subestaciones de El Dorado, en varias ocasiones estos eventos se han visto asociados a dos principales efectos: Mala operación de los equipos y afectaciones sobre las redes alimentadoras a causa de las obras de modernización y expansión.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General. Elaborar un análisis de modos y efectos de fallas, aplicado a la subestación Terminal Única del Aeropuerto Internacional el Dorado, Luis Carlos Galán Sarmiento

1.4.2 Objetivos Específicos

- Recopilar datos de fallas en la subestación.
- Desarrollar Análisis de Modos y Efecto de Fallas (AMEF) y obtener el número de prioridad de riesgo (RPN).

- Proponer un plan de mantenimiento para eliminar o reducir el riesgo de modo de falla.
- Analizar la confiabilidad de la subestación.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Con el fin de satisfacer a los más de 40 millones de pasajeros que anualmente transitan, y las más de 31 aerolíneas que operan dentro de El Dorado, OPAIN S.A. debe garantizar el alto grado de confiabilidad del sistema eléctrico para el aeropuerto, actualmente cuenta con un equipo de talento humano encargado de mantener y operar las instalaciones eléctricas de la terminal aérea.

El mantenimiento que se realiza actualmente a la subestación Terminal Única se basa en las recomendaciones dadas por los fabricantes de los diferentes equipos instalados, y la experticia del equipo de talento humano generando así una estrategia de mantenimiento preventivo periódico, que sin poder ver más allá de lo que se requiere para aumentar la confiabilidad del sistema y siendo una simple tarea repetitiva se pueden omitir aspectos relevantes como la afectación al aeropuerto y la condición de los equipos.

Con esta monografía se pretende elaborar un Análisis de Modos y Efecto de Fallas (AMEF) y obtener el número de prioridad de riesgo (RPN) pudiendo establecer el mejor plan de mantenimiento que apunte a eliminar o reducir el modo de falla dentro de la Subestación Terminal Única, adicional de garantizar una alta confiabilidad en la operación del terminal aéreo.

2. MARCO TEORICO

2.1 EVOLUCIÓN MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento se define como el control constante de las instalaciones y equipos, así como el conjunto de trabajos de reparación y revisión para garantizar el funcionamiento correcto de un sistema.

Desde el inicio de la vida humana las herramientas fabricadas por el hombre se han perfeccionado día con día, debido a que éstas le permiten conseguir sus satisfactorios físicos y psíquicos, el mantenimiento ha evolucionado a través de cuatro generaciones (Figura 19). Durante la revolución industrial el mantenimiento era correctivo, los accidentes y pérdidas que ocasionaron las primeras calderas y la gran cantidad de intervención de las aseguradoras exigen mayores y mejores cuidados, propiciaron la aparición de los primeros talleres mecánicos.⁷

A partir de 1925, se hace patente en la industria americana la necesidad de organizar el mantenimiento con una base científica. Se empieza a pensar en la conveniencia de reparar antes de que se produzca el desgaste o la rotura, para evitar interrupciones en el proceso productivo, con lo que surge el concepto del mantenimiento Preventivo.⁸

A partir de los años sesenta, con el desarrollo de las industrias electrónica, espacial y aeronáutica, aparece en el mundo anglosajón el mantenimiento

⁷ AGUILAR OCEGUEDA, Christian, et al. Evolución Y Taxonomía Del Mantenimiento. [En línea] (Recuperado en 27 agosto 2018). Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/384348841/1-1-Evolucion-Del-Mantenimiento-UNIDAD-I>

⁸ MUÑOZ ABELLA, Maria Belén. Mantenimiento Industrial, Universidad Carlos III de Madrid. p.3 (Recuperado en 27 mayo 2018). Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/teoria-de-maquinas/lecturas/MantenimientoIndustrial.pdf>

Predictivo, por el cual la intervención no depende ya del tiempo de funcionamiento sino del estado o condición efectiva del equipo o sus elementos y de la fiabilidad determinada del sistema.⁹

Actualmente el mantenimiento afronta lo que se podría denominar como su tercera generación, con la disponibilidad de equipos electrónicos de inspección y de control, sumamente fiables, para conocer el estado real de los equipos mediante mediciones periódicas o continuas de determinados parámetros: vibraciones, ruidos, temperaturas, análisis fisicoquímicos, tecnografía, ultrasonidos, endoscopia, etc., y la aplicación al mantenimiento de sistemas de información basados en ordenadores que permiten la acumulación de experiencia empírica y el desarrollo de los sistemas de tratamiento de datos.¹⁰

Para Celis¹¹, este desarrollo, conducirá en un futuro al mantenimiento a la utilización de los sistemas expertos y a la inteligencia artificial, con amplio campo de actuación en el diagnóstico de avarías y en facilitar las actuaciones de mantenimiento en condiciones difíciles.

⁹ QUEZADA BANCHÓN, Marco Antonio. Plan para la implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en plantas de tratamientos de agua potable. Proyecto de grado previo a la obtención del título de ingeniería industrial. Ecuador: Universidad Estatal De Milagro, Facultad Ciencias De La Ingeniería, 2014, p. 7

¹⁰ MUÑOZ ABELLA, María Belén. Mantenimiento Industrial, Universidad Carlos III de Madrid. p.3 (Recuperado en 27 mayo 2018). Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/teoria-de-maquinas/lecturas/MantenimientoIndustrial.pdf>

¹¹ Celis Guerra, Laura Cristina. Diseño de un Plan de Mantenimiento Productivo Total en la Empresa Industrias Metalex S.A.S. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniería Industrial. Bucaramanga: Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, Facultad de Ingeniería Industrial, 2017, p. 35 (Recuperado en 27 mayo 2018). Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/11610/2018lauracelis.pdf?sequence=1>

Figura 19. Objetivos del mantenimiento



Fuente: <http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/alumno06/OED/mantenimiento.htm>

La evolución de los objetivos del mantenimiento trajo consigo diversas técnicas, que, en la actualidad, dependiendo de las características de la empresa y su nivel de exigencia para su operación/producción establecen parámetros de: disponibilidad, mantenibilidad, confiabilidad, entre otros para su maquinaria, como se puede observar en la Figura 20.

Figura 20. Evolución Técnicas de Mantenimiento



Fuente: <http://ugmamantenimiento12011.blogspot.com.co/2011/10/evolucion-del-mantenimiento.html>

2.2 MANTENIMIENTO SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

El mantenimiento se puede definir como la interacción de actividades mediante las cuales un equipo, o un sistema se mantienen, o se restablece a, un estado de condiciones iniciales (básicas).

Según Botero¹², “las subestaciones son un componente importante de los sistemas de potencia, además de ser los de mayor costo económico, y que la continuidad del servicio depende en gran parte de ellas”, y siguiendo lo exigido en el artículo 27.5 MANTENIMIENTO Y CONSERVACIÓN DE LAS INSTALACIONES PARA USO FINAL del RETIE¹³. Se crea la necesidad de estructurar la gestión del mantenimiento, esta gestión deberá observar al mantenimiento preventivo, englobando al mantenimiento predictivo, para revisar con cierta frecuencia el estado de los equipos, al mantenimiento correctivo para reparaciones o reemplazos preventivos, y al mantenimiento proactivo, para el análisis y revisión periódica de la gestión, y para la evolución del mantenimiento y sus procedimientos. Todo esto interrelacionado entre sí, conformando así al Mantenimiento Integrado¹⁴.

Según Flechas¹⁵ “El objetivo general es preservar la operación y vida útil de los equipos, asegurar su correcto desempeño en función de los procesos que dependen de cada equipo, en condiciones seguras, confiables y eficientes.”

¹² Rincón Eléctrico [sitio web]. MANTENIMIENTO DE SUBESTACIONES ELECTRICAS. (Recuperado en 27 mayo 2018). Disponible en: http://www.javierbotero.com/Javier_Botero/MANTENIMIENTO_DE_SUBESTACIONES.html

¹³ RETIE (Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas) Versión 2013

¹⁴ Rincón Eléctrico [sitio web]. MANTENIMIENTO DE SUBESTACIONES ELECTRICAS. (Recuperado en 27 mayo 2018). Disponible en: http://www.javierbotero.com/Javier_Botero/MANTENIMIENTO_DE_SUBESTACIONES.html

¹⁵ FLECHAS VILLAMIL, Jairo (Abril 2013). RECOMENDACIONES PARA MANTENIMIENTO ELÉCTRICO DE SUBESTACIONES DE MEDIA Y BAJA TENSIÓN. (Recuperado en 27 mayo

Un mantenimiento frecuente en las subestaciones eléctricas es primordial para asegurar el óptimo funcionamiento de las mismas y para detectar con anticipación posibles fallas que pudiesen aparecer, lo anterior para asegurar que la subestación estará operando libre de desperfectos e interrupciones inesperadas.

2.2.1 Inspecciones visuales. Este tipo de mantenimiento se efectúa en forma mensual, sin desenergizar la línea, no utiliza herramientas ni instrumentos en la mayor parte de los casos, y como su nombre lo indica consiste sólo en inspecciones visuales. Tiene la finalidad de revisar visualmente el estado exterior de los equipos.¹⁶

Tabla 7. Inspección visual



Fuente: Buscador Google

2018) Disponible en: <https://www.isagen.com.co/SitioWeb/delegate/documentos/publicaciones-tecnicas/2013/boletin-abril.pdf>

¹⁶ GAYOSO OLIVERA, Daniel [sitio web]. MANTENIMIENTO DE SUBESTACIONES ELECTRICAS. (Recuperado en 20 enero 2018). Disponible en: <http://mantenimientosubestacioneselectricas.blogspot.com/2009/02/mantenimiento-de-una-ssee-03-1.html>

2.2.2 Mantenimiento preventivo programado. El mantenimiento preventivo tiene la finalidad de evitar que el equipo falle durante el periodo de su vida útil y la técnica de su aplicación se apoya en experiencias de operación que determinan que el equipo, después de pasar el periodo de puesta en servicio, reduzca sus propiedades de fallas.¹⁷

Se puede definir el mantenimiento preventivo como un listado de tareas, cada una de ellas ejecutadas por usuarios y operadores para asegurar el correcto funcionamiento de la subestación, aumentando al máximo la disponibilidad y confiabilidad de la subestación llevando a cabo una gestión del mantenimiento, basado en las inspecciones programadas de los posibles puntos de falla.

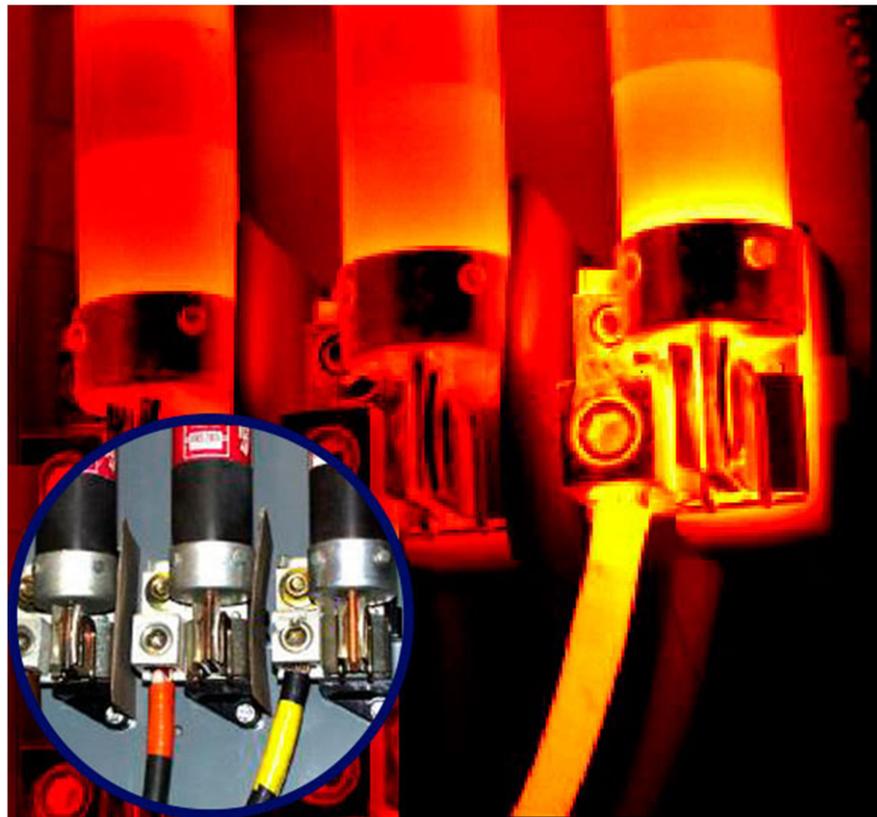
2.2.3 Termografía. Gracias a la evolución de las técnicas del mantenimiento y los avances tecnológicos hoy en día se puede decir que existe un mantenimiento que predice las fallas antes de que estas se produzcan y que se conoce con el nombre de mantenimiento predictivo.

Con el mantenimiento predictivo o bajo condición se evalúa el estado de los componentes eléctricos, estudiando ciertas variables relacionadas con el estado o el medio que se desea realizar seguimiento y análisis, la finalidad de esta técnica de mantenimiento se centra en reducir costos de operación y de mantenimiento, incrementando la confiabilidad de los equipos.

¹⁷ SERNA VALENCIA, Juan David. Manual De Mantenimiento Preventivo - Predictivo - Correctivo Para Trabajos Con Tensión En Subestaciones Y Líneas CHEC. 2018 (Recuperado en 20 marzo 2018). Disponible en: https://www.chec.com.co/Portals/0/MA-DI-08-002-021%20MA_MTO_PREV_PRED_CORREC_TRAB_CON_TENS_SUB.pdf

Una de las técnicas utilizadas como parte del mantenimiento predictivo es la termografía, Carmona¹⁸ la define como una técnica que permite, a través de la radiación infrarroja que emiten los cuerpos, la medida superficial de la temperatura. El instrumento que se usa en termografía, es la cámara termográfica de infrarrojos.

Tabla 8. Imagen térmica portafusibles



Fuente: <http://www.tserpro.com/wp-content/uploads/2016/06/termografia4.jpg>

¹⁸ CARMONA, J. Francisco; OCHOA, Jose A. Procedimiento Para El Mantenimiento Predictivo En Subestaciones De 115 / 34,5 / 13,8 Kv, Utilizando Técnicas De Termografía Y Ultrasonido. Caso De Estudio. Empresa Electricidad De Valencia [En línea]. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Electricista. Valencia: Universidad de Carabobo. Escuela de Ingeniería Eléctrica. 2008. p. 27. (Recuperado en 27 febrero 2018). Disponible en: <http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/53/ochcar.pdf?sequence=4>

Al encontrarnos con subestaciones eléctricas, las cuales todo el tiempo se encuentran tensionadas, dificulta la posibilidad de analizar el estado de los componentes, para ello se recurre a realizar la inspección de termografía de los equipos y elementos conectados, permitiendo evaluar, entre otros: Puntos de conexión de terminales y/o barras, interruptores de potencia, transformadores de potencia, seccionadores.

2.2.4 Pruebas físico-químicas al aceite (Transformadores). Otra de las técnicas del mantenimiento predictivo es la realización de pruebas sobre el aceite aislante de los transformadores, denominado pruebas físico-químicas, estas tienen como objetivo monitorear los posibles modos de fallo y así mismo poder tomar las medidas necesarias para poder mitigar su impacto.

La Sociedad Americana de Pruebas y Materiales por sus siglas en inglés ASTM (American Society for Testing and Materials), presentan procedimientos y pruebas para definir las propiedades de los aceites minerales aislantes. Y para poder llegar a concluir con un diagnóstico veraz, es necesario analizar el resultado de todas y cada una de las pruebas realizadas. Las pruebas son¹⁹:

- **Rigidez dieléctrica** muestra la cantidad de impurezas como polvo, agua, y partículas conductoras que contiene el aceite aislante
- **Contenido de agua en el aceite** muestra el punto de saturación del aceite (Punto máximo de agua en el aceite)
- **Color** comparación de colores patrones especificados en dicha prueba; estos colores están escalonados en pasos de 0,5 siendo 0,5 el valor para el color más claro y 8,0 para el color más oscuro

¹⁹ ASTM International [sitio web], Helping our world work better. (1996-2016). Standards & Publications. ASTM International. (Recuperado en 20 marzo 2018). Disponible en: <http://www.astm.org/Standard/standards-and-publications.html>

- **Gravedad** específica es la relación entre la masa de un volumen de aceite y la masa de agua para ese mismo volumen y a la misma temperatura que la del aceite
- **Tensión interfacial** son dos pruebas que determinan el valor de la tensión de rompimiento de la interface o barrera entre los dos líquidos
- **Número de neutralización** determina el índice de acidez total aproximado del aceite
- **Factor de potencia** mide las pérdidas de potencia a través del sistema de aislamiento a tierra causada por la corriente de fuga y por la corriente dieléctrica
- **Gases en el aceite aislante** permite determinar si el devanado ha estado expuesto a sobrecalentamiento

2.3 ANÁLISIS DE MODO Y EFECTO DE LA FALLA

2.3.1 Definición. Un Análisis de Modo y Efecto de la Falla AMEF o por sus siglas en inglés FMEA (Failure Modes Effect Analysis), es un método sistemático con el que se pueden identificar y evaluar las fallas potenciales y los efectos asociados. Logrando así clasificar las fallas por orden de importancia, y de esta forma proceder a elaborar los planes necesarios para eliminarlas y/o mitigarlas.²⁰

²⁰ Lean Solutions [sitio web]. AMEF, Análisis De Modo Y Efecto De La Falla. (Recuperado en 20 enero 2018). Disponible en: <http://www.leansolutions.co/conceptos/amef/>

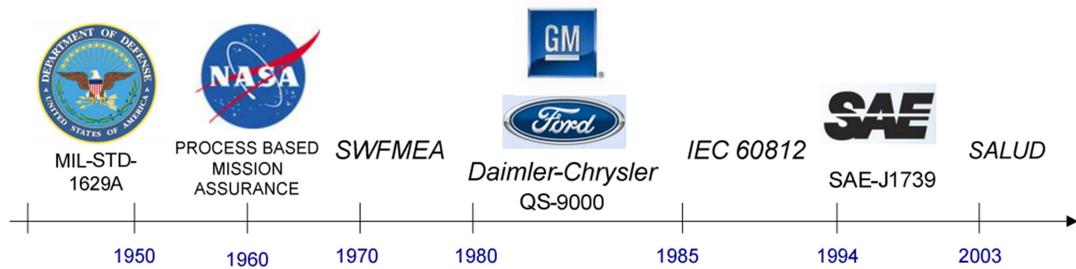
2.3.2 Historia. La AMEF no es una herramienta nueva, su historia data de los años 60's con la NASA, durante su misión del Apollo (9 de noviembre 1969)²¹ se tituló un procedimiento militar como “Procedimiento para la Ejecución de un Modo de Falla, Efectos y Análisis de Criticidad (MIL-P-1629)”. Este procedimiento se empleó como una técnica para evaluar la confiabilidad y determinar los efectos de las fallas de los equipos y sistemas, en el éxito de la misión y la seguridad del personal o de los equipos.

Para el año de 1988 la Organización Internacional para la Estandarización (ISO), publicó la serie de normas ISO 9000 para la gestión y aseguramiento de la calidad, lo anterior produjo que diversas organizaciones tuviesen que desarrollar sistemas de gestión de calidad enfocados a las necesidades particulares, surgiendo de esta forma para el sector automotriz las QS 9000.

Ya en diciembre del año 1992, el grupo acción automotriz industrial (AIAG) termina el manual de referencia y en febrero de 1993 junto a la Sociedad Americana para el Control de Calidad (ASQC) registraron las normas de AMEF para su implementación en la industria, siendo equivalentes al procedimiento técnico de la Sociedad de Ingenieros Automotrices SAE J – 1739.²¹

²¹ MONTALBAN-LOYOLA, Edith, et. Al. Herramienta de mejora AMEF (Análisis del Modo y Efecto de la Falla Potencial) como documento vivo en un área operativa. Experiencia de aplicación en empresa proveedora para Industria Automotriz. En: Revista de Aplicaciones de la Ingeniería [En línea]. 2015, vol. 2, nro. 5. pp.232. (Recuperado en 27 febrero 2018). ISSN 2410-3454. Disponible en:
http://www.ecorfan.org/bolivia/researchjournals/Aplicaciones_de_la_Ingenieria/vol2num5/Revista%20Aplicaciones%20de%20la%20Ingenieria%20V2%20N5.pdf

Figura 21. Evolución de normativas del AMEF²²



2.3.3 Aplicaciones

- El AMEF aplicado a un producto, detecta posibles fallas en el diseño, aumentando las probabilidades de anticiparse a los efectos que pueden llegar a tener en el usuario o en el proceso de producción.
- El AMEF aplicado a los procesos, detecta posibles fallas en las etapas de producción, aumentando las probabilidades de anticiparse a los efectos que puedan llegar a tener en el usuario o en etapas posteriores de cada proceso.
- El AMEF aplicado a sistemas, detecta posibles fallas en el diseño del software, aumentando las probabilidades de anticiparse a los efectos que pueden llegar a tener en su funcionamiento.
- El AMEF aplicado a cualquier otro proceso, se deben identificar, clasificar y prevenir fallas mediante el análisis de sus efectos, y cuyas causas son documentadas.

²² DIAZ CAJAS, Christian Santiago y QUIMBIURCO VILLA, Miguel Eduardo. Automatización del análisis de modos de falla y efectos FMEA en la ingeniería de mantenimiento aplicado a la industria ecuatoriana. [En línea]. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico. Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica. 2008. p. 81-83. (Recuperado en 27 febrero 2018). Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/889/1/CD-1771%282008-11-05-11-33-01%29.pdf>

Figura 22. Tipos de AMEF



Fuente: <http://www.leansolutions.co/wp-content/uploads/2011/07/Tipos-de-AMEF-1024x773.png>

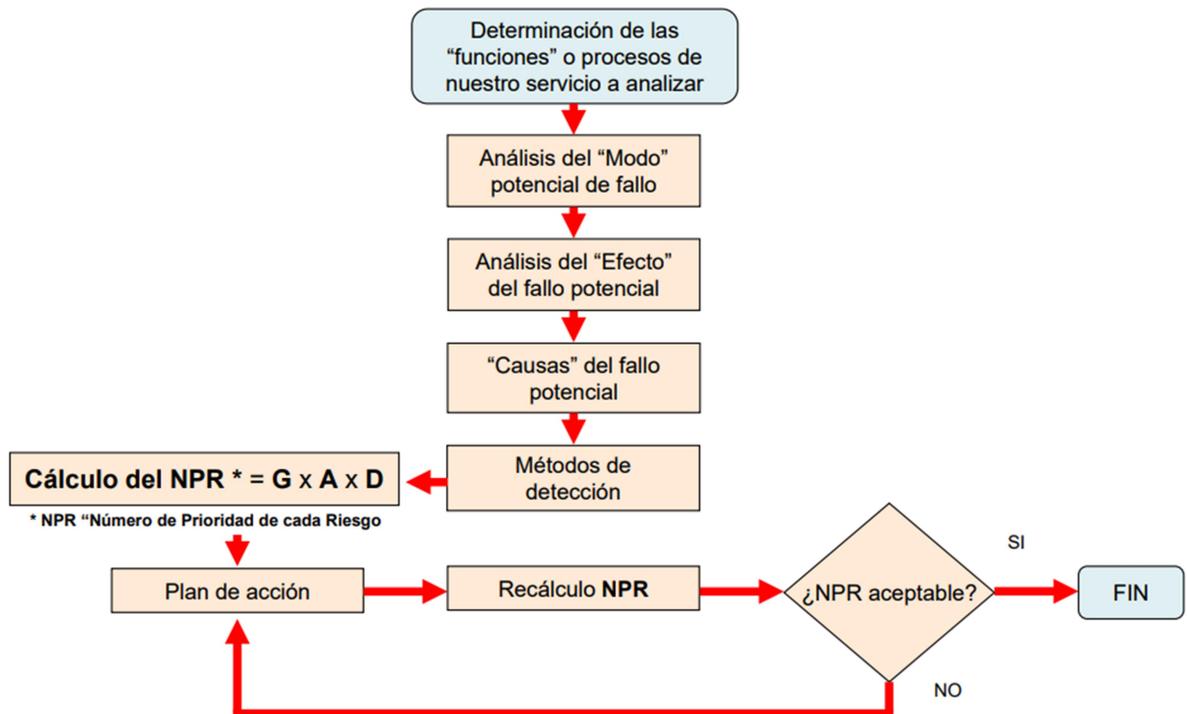
2.3.4 Creación de un AMEF. Antes de pensar en realizar un AMEF, se requiere un trabajo previo consistente en la recolección de información. Es importante contar con la documentación suficiente acerca de todos los elementos que lo componen.

Teniendo lo anterior se procede con el siguiente paso a paso:

- Desarrollar mapa de proceso.
- Formar un equipo de trabajo.
- Determinar los pasos críticos del proceso.
- Determinar las fallas potenciales de cada paso del proceso, determinar sus efectos y evaluar su nivel de gravedad
- Indicar las causas de cada falla y evaluar la ocurrencia de las fallas.
- Indicar los controles (medidas de detección) que se tienen para detectar fallas y evaluarlas.

- Obtener el número de prioridad de riesgo para cada falla y tomar decisiones.
- Ejecutar acciones preventivas, correctivas o de mejora.

Figura 23. Diagrama de flujo para elaborar AMEF



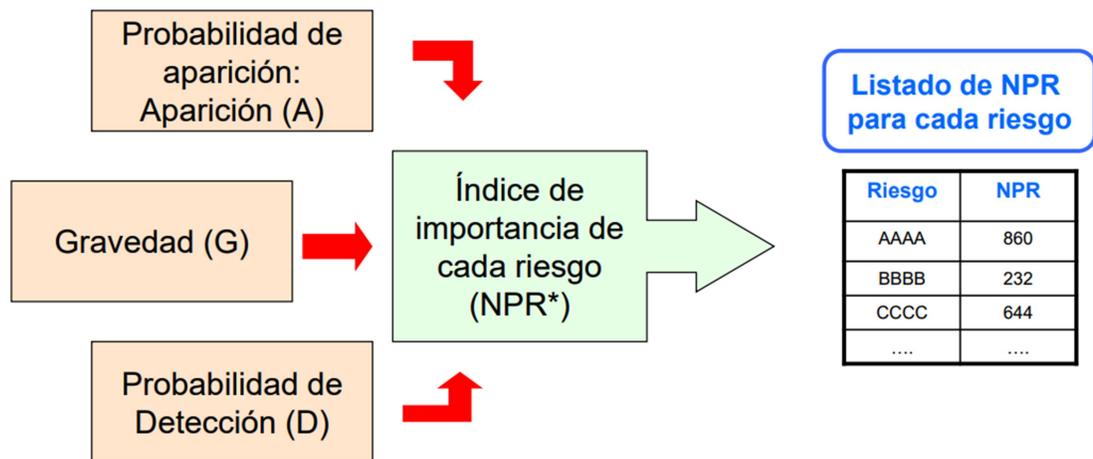
Fuente:

<http://www.minsa.gob.pe/dgsp/observatorio/documentos/herramientas/amfe.pdf>

En la Figura 23 Se describe el flujo en el que se debe diligenciar la matriz AMEF (Figura 24).

2.3.5 Cálculo Número de Prioridad por cada Riesgo (RPN). Por cada uno de los riesgos se obtiene su índice de importancia o prioridad, para ello se requiere valorar dependiendo del riesgo tres factores: La severidad (Gravedad); La Frecuencia (Probabilidad de aparición); y La Detección.

Figura 25. Cálculo RPN



Fuente:

<http://www.minsa.gob.pe/dgsp/observatorio/documentos/herramientas/amfe.pdf>

Tabla 9. Rango de Gravedad

Efecto	Rango	Criterio
Peligroso	10	Puede poner en riesgo a las personas, al medio ambiente y al sistema
Alto	7	Interrupción importante a la operación de la S/E TU. No hay suministro de energía en El Dorado
Bajo	4	Interrupción de menor importancia a la operación de la S/E TU. Suministro de energía parcial en El Dorado
Ninguno	1	Interrupción sin importancia a la operación de la S/E TU. Suministro de energía inmediato en El Dorado

Tabla 10. Rango de Ocurrencia

Ocurrencia	Criterios	Rango	Probabilidad de falla
Remota	Falla improbable. No existen fallas asociadas con este producto o con un producto casi idéntico	3	<1
Poca	Fallas aisladas asociadas con productos similares	4	>2 y <4
Moderada	Este producto o uno similar ha tenido fallas ocasionales	7	>4 y <7
Alta	Este producto o uno similar han fallado a menudo	10	>7

Tabla 11. Rango Detección

Detección	Criterio	Rango
Casi imposible	Ninguno de los controles disponibles detectan el modo o causa	10
Bajo	Los controles actuales tienen probabilidad baja de detectar modo o causa	8
Medio	Los controles actuales tienen probabilidad media de detectar modo o causa	6
Alta	Los controles actuales tienen probabilidad alta de detectar modo o causa	3
Casi seguro	Los controles actuales detectan casi seguro modo o causa	1

2.4 MARCO LEGAL

A continuación, se relaciona la normatividad que es y será empleada como guía para desarrollar y aplicar AMEF en la presente monografía:

UNE-EN 60812:2008 – Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas. Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE).

IEC 60300-3-1:2003 – Gestión de la confiabilidad. Parte 3-1: Guía de aplicación. Técnicas de análisis de la confiabilidad. Guía metodológica.

IEC 61025 – Análisis de árbol de fallas (AAF).

IEC 61078 – Técnicas de análisis de la confiabilidad. Método del diagrama de bloques.

ISO 14224 – Industria de Petróleo y Gas – Recolección e Intercambio de Datos de Confiabilidad y Mantenimiento de Equipos

SAE JA 1011:2009 – Evaluation Criteria For Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes

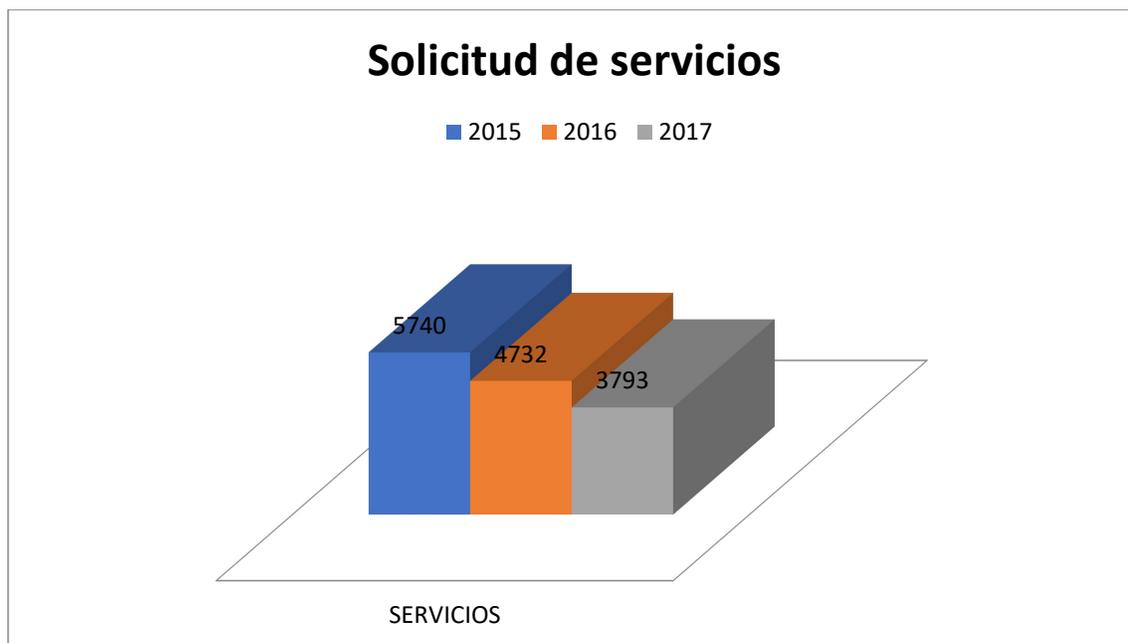
SAE J 1739:2002 – Potential Failure Mode And Effects Analysis In Design (Design FMEA), Potential Failure Mode And Effects Analysis In Manufacturing And Assembly Processes (Process FMEA)

3. ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LA INFORMACIÓN

3.1 ANÁLISIS DE LA BITÁCORA DE EVENTOS

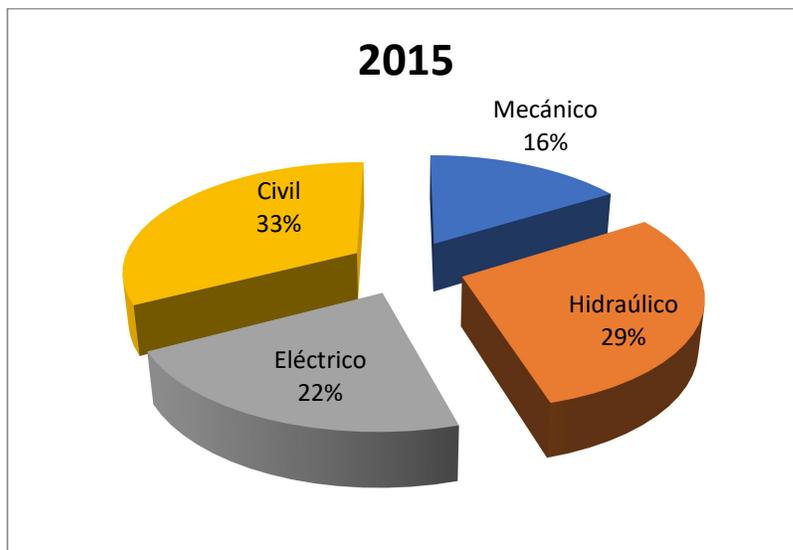
El análisis del estado actual de la subestación Terminal Única abarca el período entre los años 2015 y el 2017, donde se recopilaron los datos de la bitácora de los operadores del BMS (Building Manage System) del aeropuerto en el cual se reportan todas las solicitudes de servicios para poder ser atendidas por parte del equipo de mantenimiento entre estas solicitudes se encuentran necesidades de tipo: **hidráulico** como son baños fuera de servicio, fugas de agua, filtraciones, etc.; **mecánico** como son averías de los sistemas de transporte vertical u horizontal, equipos de aire acondicionado, entre otros; **civil** como daños de techos, muros, y estructuras; y nuestra área objeto del presente estudio lo **eléctrico**, a continuación se presenta el resumen de la cantidad de solicitudes de servicio recibidas.

Gráfica 1. Solicitud de servicios por año

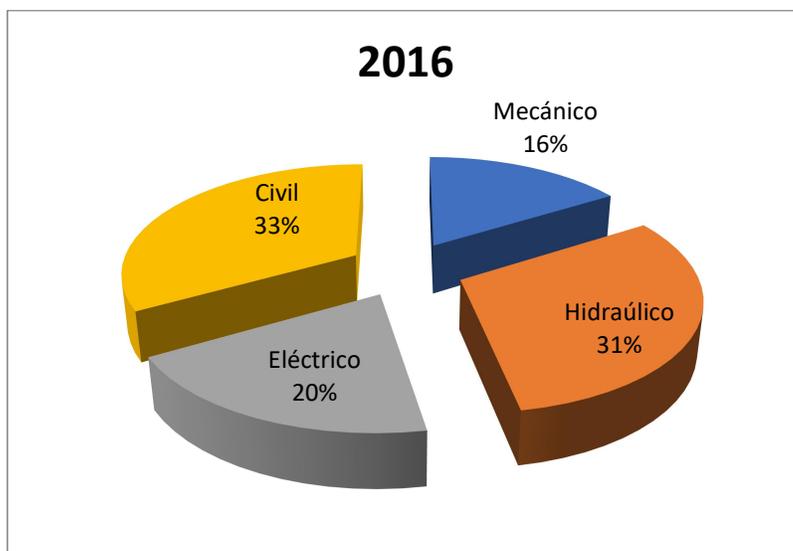


En las siguientes gráficas se presentan los porcentajes por cada tipo de necesidad reportada al BMS cada uno de los años en estudio.

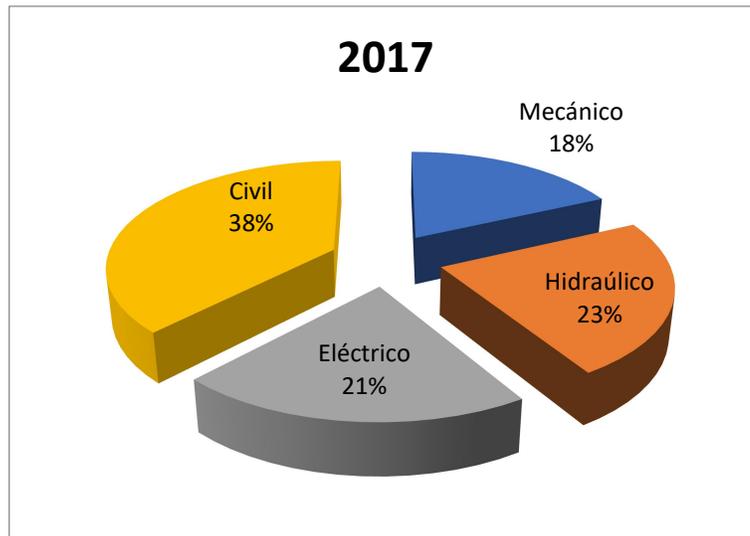
Gráfica 2. Porcentaje Necesidades Tipo año 2015



Gráfica 3. Porcentaje Necesidades Tipo año 2016



Gráfica 4. Porcentaje Necesidades Tipo año 2017



Se evidencia que en promedio el número de solicitudes de servicio eléctrico es de 992 durante el período evaluado lo cual representa el 21% del total de solicitudes.

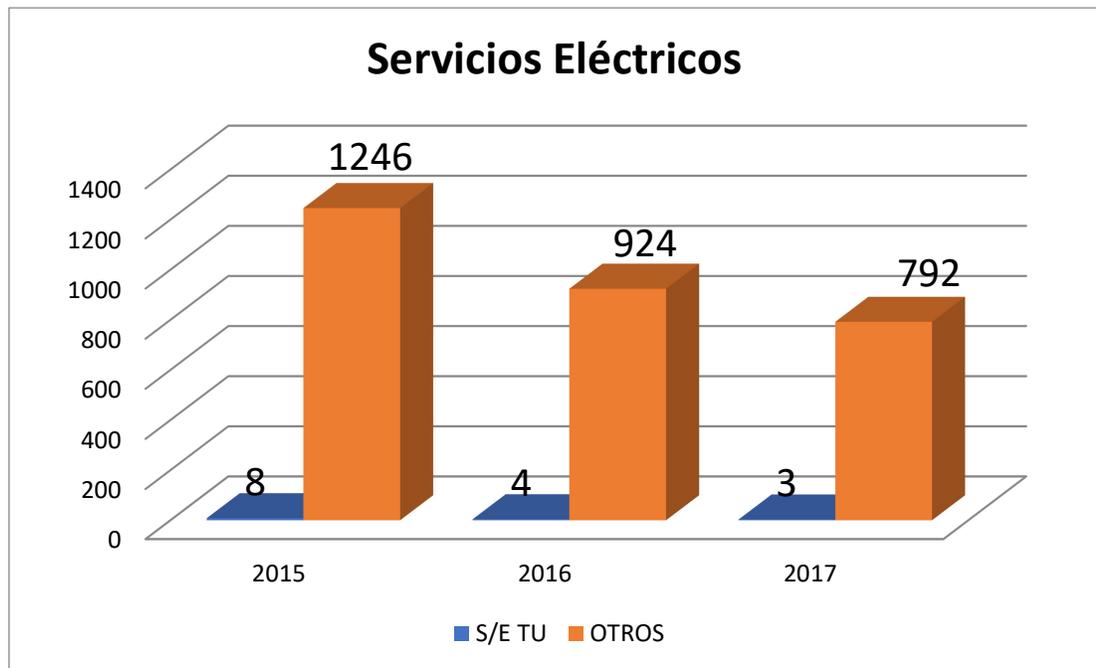
3.2 ANÁLISIS DE LOS EVENTOS ASOCIADOS A SOLICITUDES DE SERVICIO ELÉCTRICO

Una vez filtrada la información respecto a las solicitudes de servicio eléctrico recibidas y atendidas se procede a clasificar en dos grupos: Solicitudes sobre fallos o afectaciones en la Subestación Terminal Única (S/E TU) y “OTROS” los cuales son referentes a fallos en el sistema de iluminación, cortes de fluido eléctrico en cuartos de baja tensión, acompañamientos a personal externo a inspecciones rutinarias de los sistemas eléctricos entre otros.

El resultado obtenido indica que los fallos presentados en la S/E TU no tienen una cantidad relevante (Ver Gráfica 5) y que sólo ocho (8) eventos de los quince presentados en el período de tiempo evaluado han causado la interrupción del fluido eléctrico para El Dorado, se estima (porque no se lleva registro) que se ha

tenido al aeropuerto sin servicio en un máximo de 12 minutos en un solo evento y que la suma de estas interrupciones no ha superado el umbral establecido en el contrato de concesión.

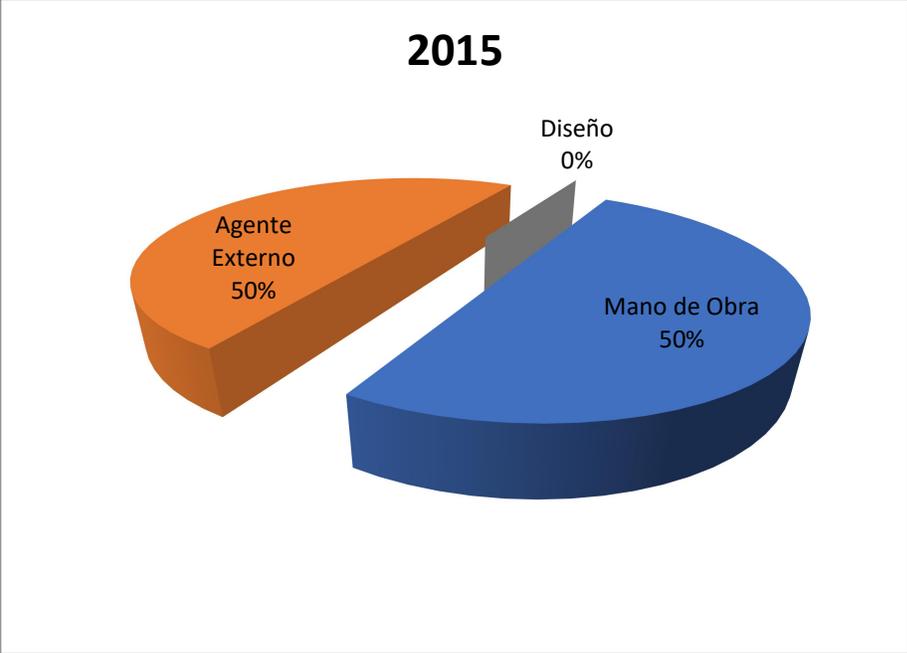
Gráfica 5. Cantidad de Solicitudes de Servicio Eléctrico por Tipo



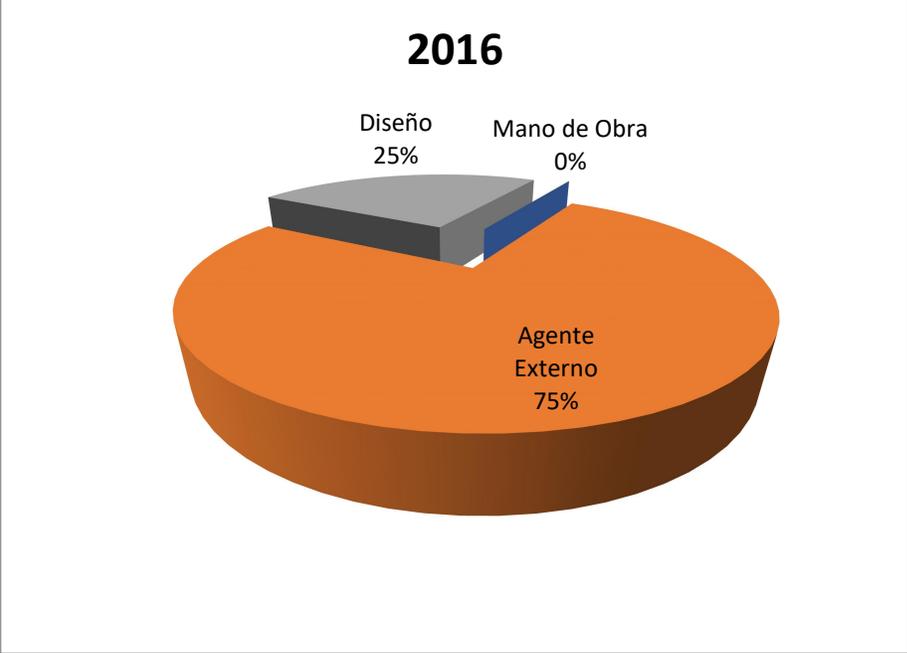
3.3 ANÁLISIS MODAL DE FALLOS Y DIAGRAMA ISHIKAWA

Analizado lo anterior, se procede a identificar en la tabla consolidada de solicitudes de servicios eléctricos referente a eventos o fallos presentados en S/E TU el común denominador o la causa de estos eventos logrando identificar tres (3) agentes causales del fallo así: mano de obra, agente externo, diseño. Lo anterior se puede resumir en las siguientes gráficas:

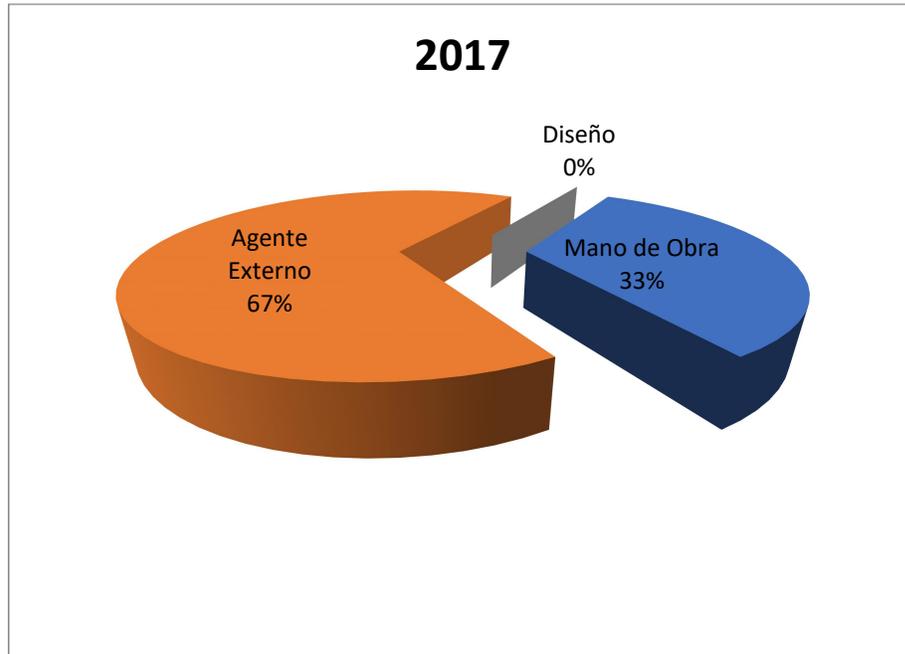
Gráfica 6. Clasificación de los eventos según agente causal 2015



Gráfica 7. Clasificación de los eventos según agente causal 2016



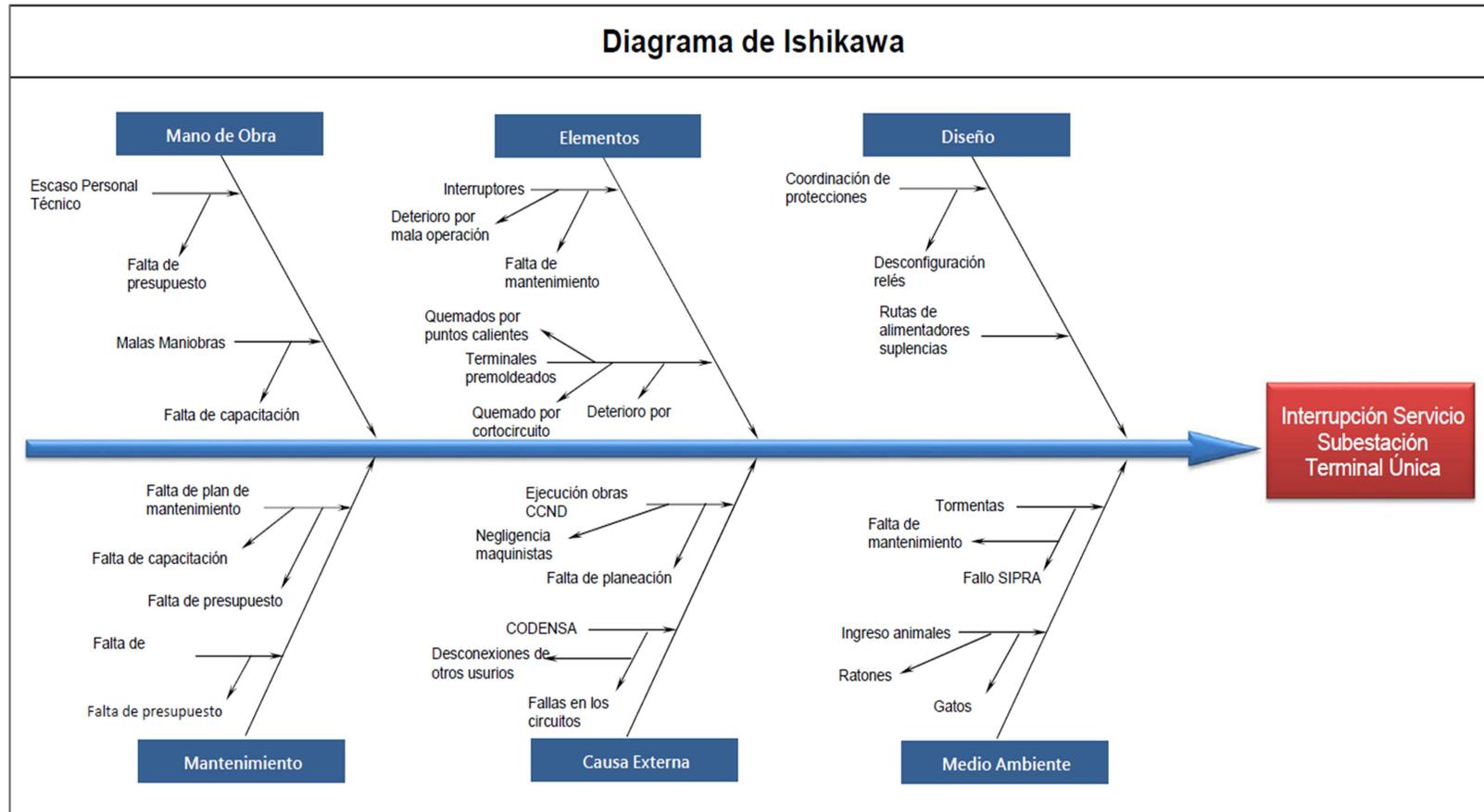
Gráfica 8. Clasificación de los eventos según agente causal 2016



Con el fin de poder realizar un ejercicio completo del análisis de modos y efectos de fallas en la subestación se decide realizar una mesa de trabajo con algunos de los responsables del mantenimiento eléctrico de OPAIN, este equipo se conforma con dos (2) técnicos electricistas, un (1) supervisor, y dos (2) ingenieros. De manera conjunta se decide trabajar sobre el diagrama Ishikawa buscando desarrollar el análisis para la obtención de las causas que intervienen a la hora de una falla sobre la subestación.

La actividad se desarrolla en una jornada de seis (6) horas basados en las experiencias con subestaciones dentro del aeropuerto y los eventos de falla ocurridos en la S/E TU se opta por construir el diagrama de Ishikawa, ya que se puede organizar y visualizar de una forma más descriptiva el origen de los problemas causantes de las fallas de interrupción de servicio en la S/E TU, denominados aquí modos de falla.

Figura 26. Diagrama Ishikawa



Una vez elaborado el diagrama se pueden visualizar los modos de falla que generan y/o pueden generar la interrupción del servicio en la subestación, a continuación se describen estos modos:

- **Mano de obra:** Para el mantenimiento la falta de personal es notable y puede ser causada por la falta de presupuesto, de igual forma otra causa es la realización de malas maniobras sobre los equipos, causado por la falta de capacitación y reentrenamiento al personal técnico.
- **Mantenimiento:** La falta de un plan de mantenimiento actualizado, acorde a las necesidades de la subestación acuñado por la falta de capacitación y falta de presupuesto. La falta de herramientas a causa de un presupuesto escaso.
- **Elementos:** Los elementos o materiales son las partes sensibles de los equipos que se ven afectados al momento de cualquier falla, se debe tener presente también que los componentes tienen una vida útil, y que por descuidos o falta de mantenimiento presentan (rán) un desgaste más rápido. Se consideran dentro de este modo de falla los siguientes elementos: Interruptores, Terminales premoldeados.
- **Causa externa:** Se consideran todas aquellas causas no medibles o controlables por parte del equipo mantenedor, se consideran dos causas externas, la ejecución de las obras de ampliación por parte del CCND ya sea por falta de planeación en la ejecución de tareas o la negligencia de los operadores de maquinaria amarilla. Y la otra causa es imputable al operador de red (CODENSA), el cual a pesar de entregar cuatro (4) circuitos de alimentación, la desconexión de manera súbita de las cargas asociadas a esos circuitos o la falla en los mismo, acarrea el corte en el suministro de energía.
- **Diseño:** Aunque la concepción del diseño y posterior construcción de esta subestación fue prevista para tener cero (0) interrupciones del servicio, se

ve afectada en cuanto a la parametrización de los diferentes elementos de control y/o disparo (relés) y la forma en que se realiza la alimentación a cada una de las subestaciones, ya que se usan las mismas canalizaciones para transportar los conductores que vienen de subestación, anillo, y centro de generación.

- **Medio Ambiente:** Su probabilidad es baja pero no nula, y puede ser causada por el ingreso de animales como gatos o ratas al interior de las celdas compartimentadas y otra a las descargas atmosféricas que al no contar con un mantenimiento sobre el Sistema de Protección contra Rayos (SIPRA), puede volverse vulnerable ante las condiciones climatológicas.

3.4 ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS

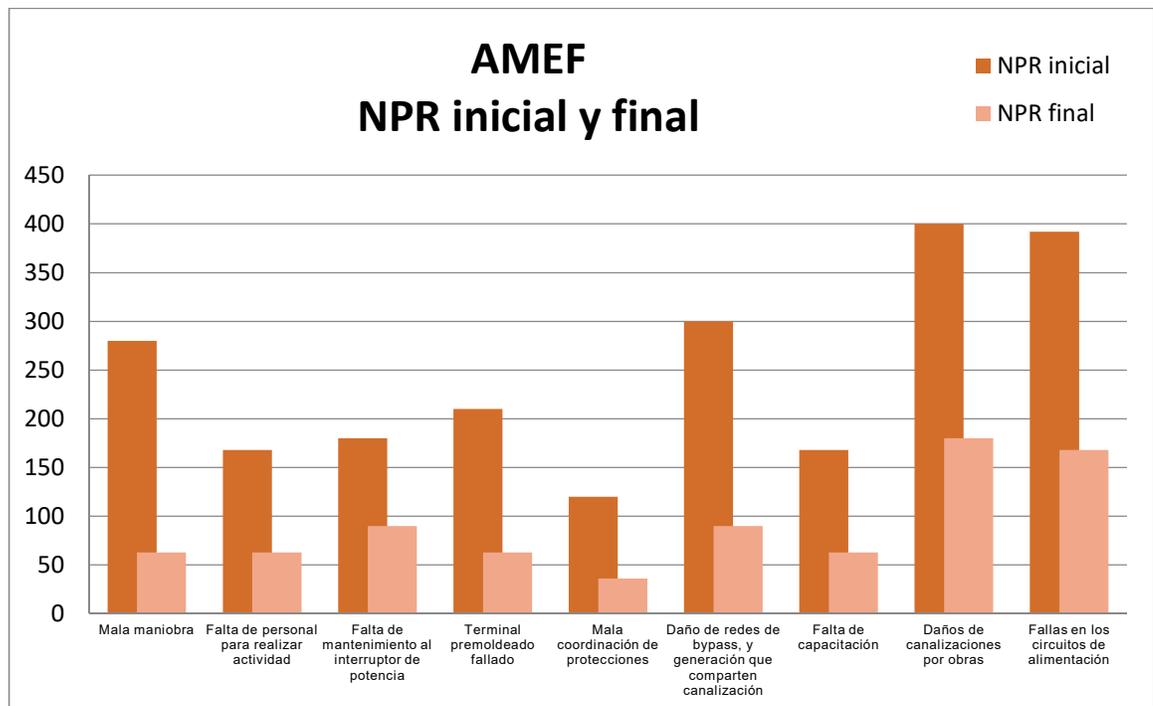
Se realiza el análisis de modos y efectos de fallas, ejecutado sobre la S/E TU, en el que se identifican sus elementos principales: Tren de celdas 34,5kV, Tren de celdas 11,4 kV, Transformadores de Potencia 20/30MVA, Transformadores de instrumentación, Servicios Auxiliares.

Se identificó el modo de fallo, su efecto y las causas para poder así determinar la falla potencial mediante la ponderación de tres (3) parámetros: Severidad, Método de detección y Frecuencia. ...Véase 2.3.5 Cálculo Número de Prioridad por cada Riesgo (RPN)...

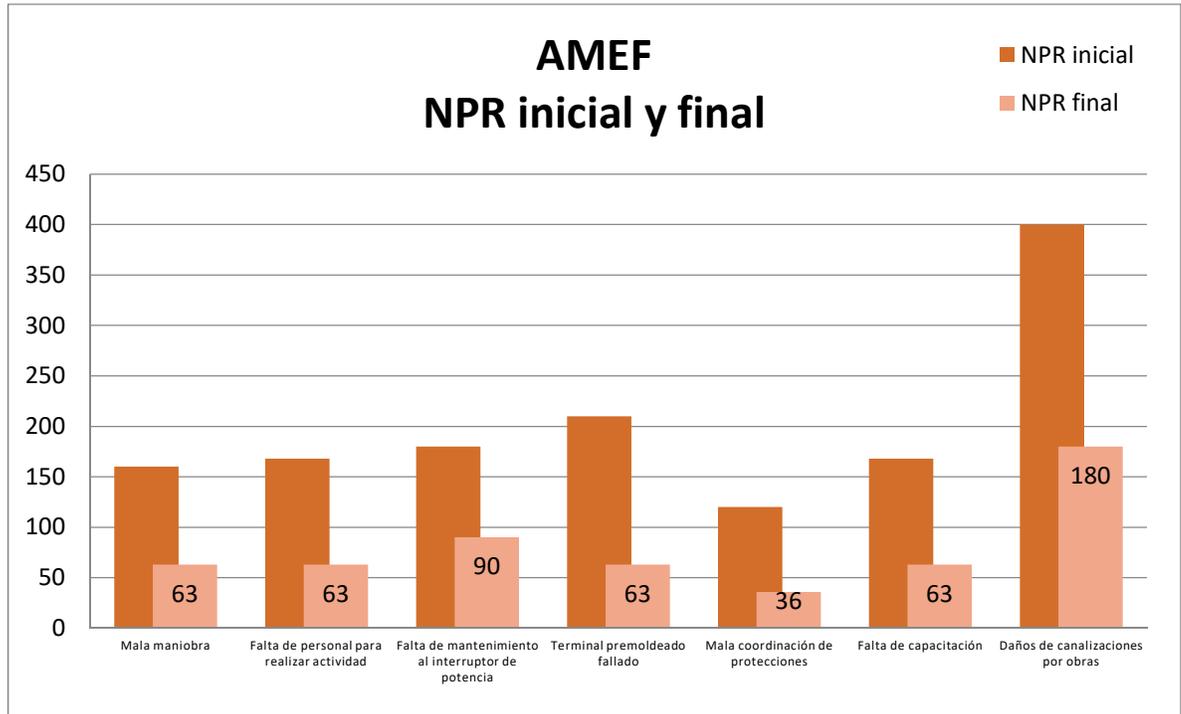
Se obtiene un RPN inicial, y se plantean unas acciones para poder mitigar la ocurrencia de estas fallas, se describe teóricamente una acción tomada, para obtener un RPN final.

Con el fin de demostrar el comportamiento de estos valores de RPN se entregan estas gráficas para brindar al lector un resumen del AMEF elaborado.

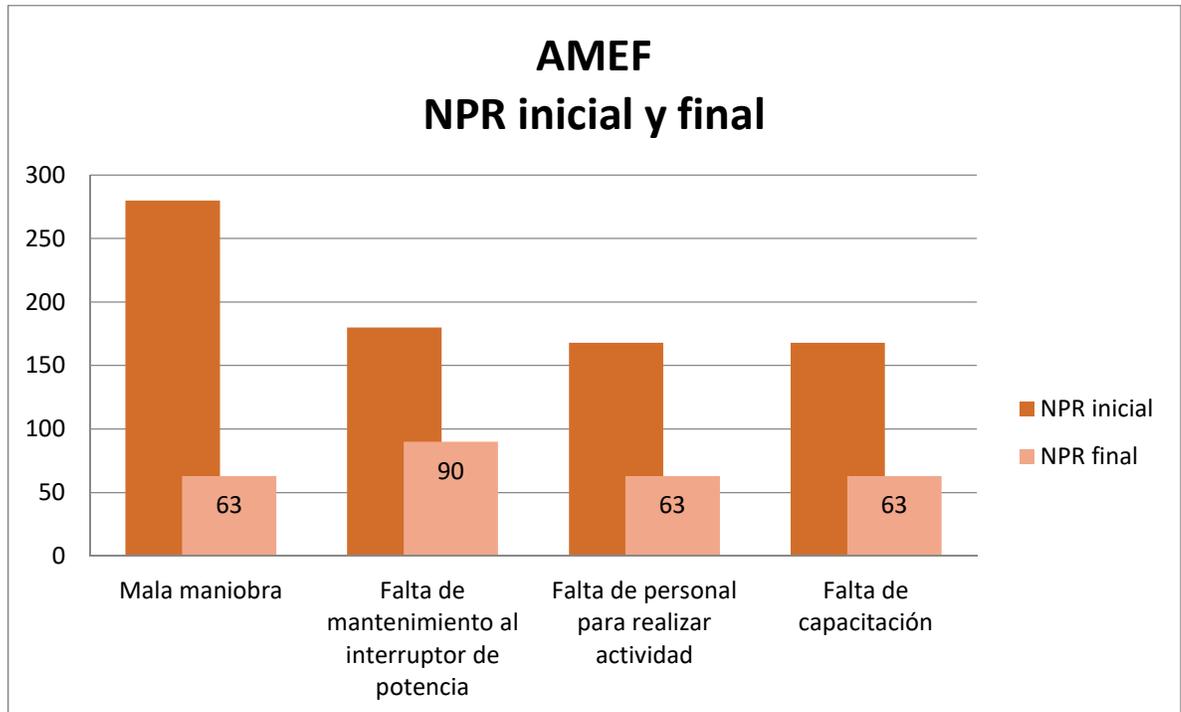
Gráfica 9. AMEF Tren de Celdas 34,5 kV



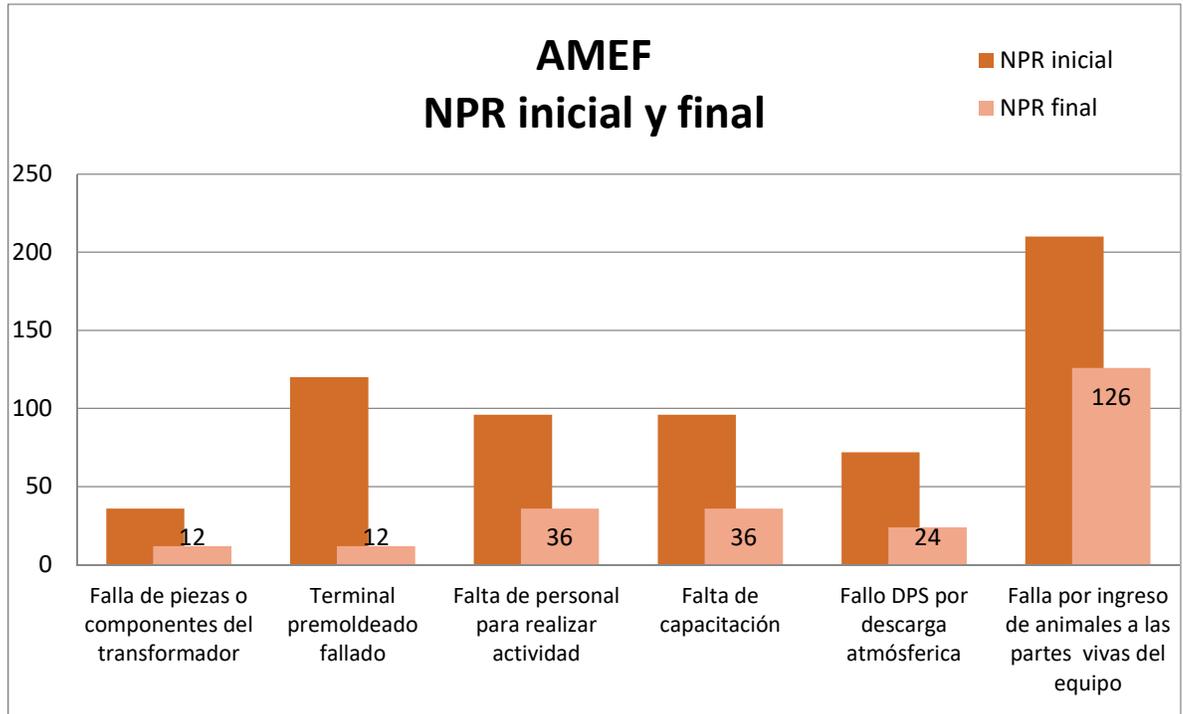
Gráfica 10. AMEF Tren de Celdas 11,4 kV



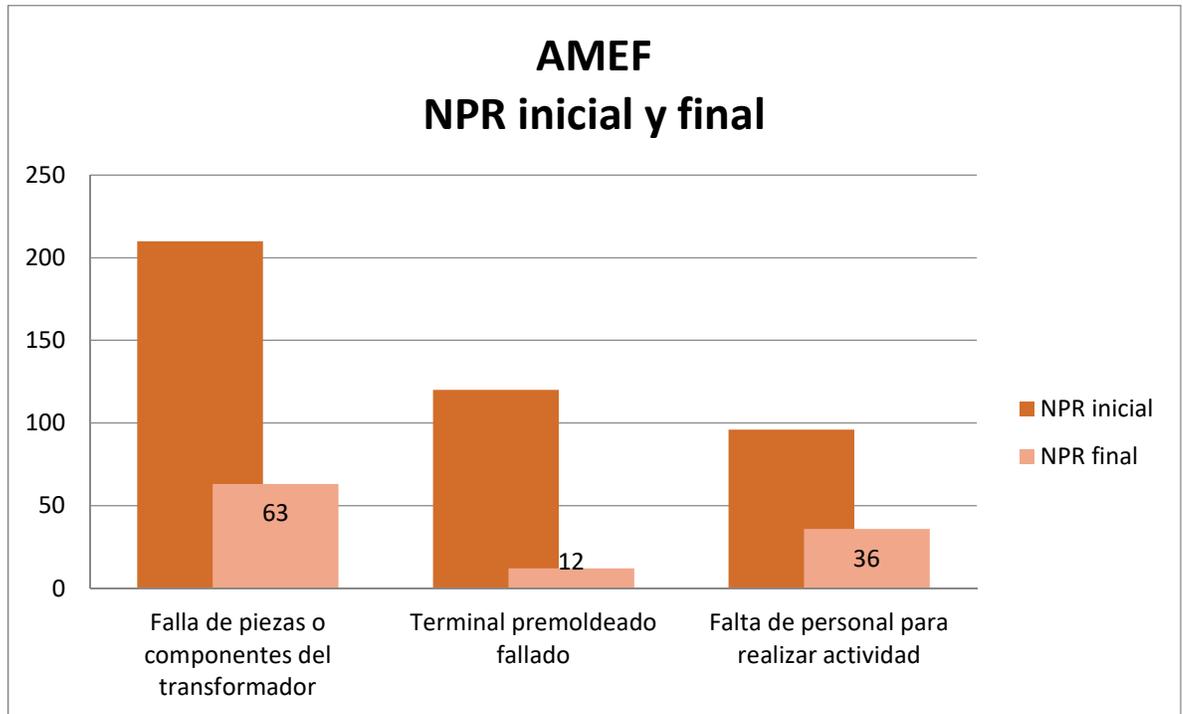
Gráfica 11. Acople de Barras



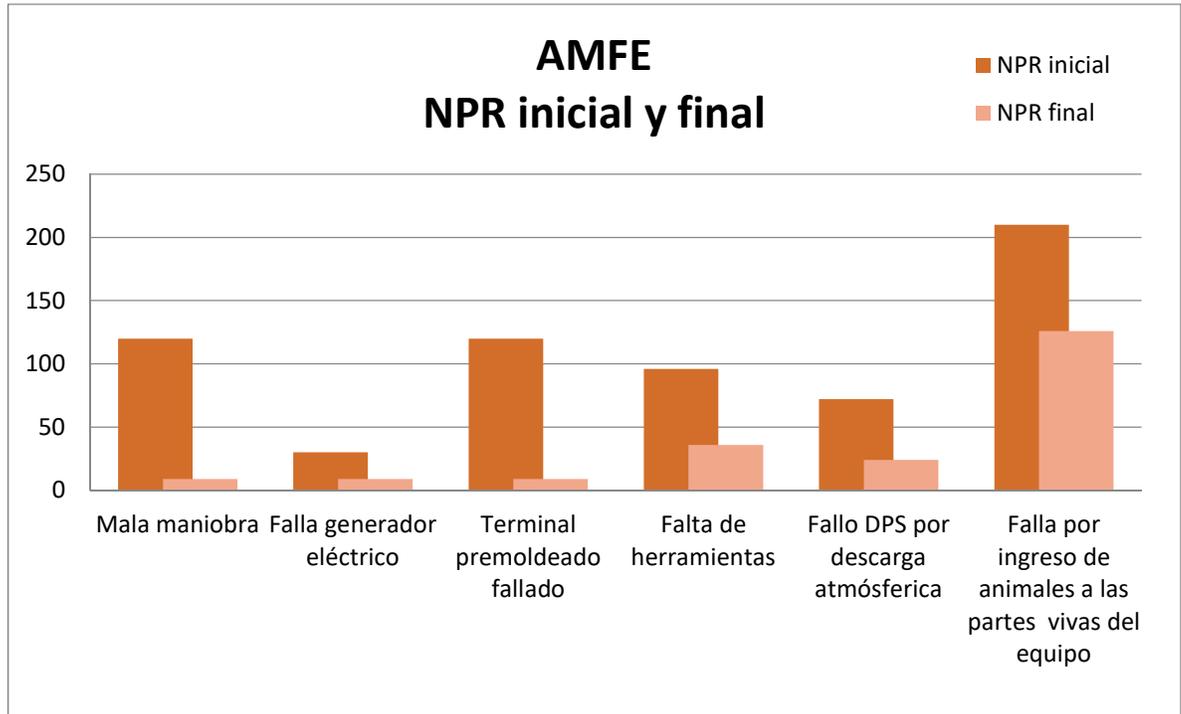
Gráfica 12. Transformadores de Potencia 20/30 MVA



Gráfica 13. Transformadores de Instrumentación



Gráfica 14. Servicios Auxiliares



Por medio del análisis de modos de fallo y efectos de fallas se pueden plantear acciones correctivas, aplicando la acción de mantenimiento pro activo, de igual forma mediante el diagrama de causa efecto se pudo determinar los principales modos de falla presentes en la subestación, así como la evaluación de los índices de riesgo para tener conocimiento de la probabilidad de que un evento no deseado ocurra, o se presente pasado el tiempo de operación determinado por el plan de mantenimiento. Dentro del Anexo C se muestra el AMEF desarrollado.

3.5 PLAN DE MANTENIMIENTO

Una vez analizada toda la información y observando que el plan de mantenimiento actual puede ser mejorado, buscando en todo caso la reducción de la posibilidad de un evento de fallo asociado a cualquier tipo de modo de fallo.

En cualquiera de las actividades que se describan a continuación se debe preservar la vida humana, promoviendo el uso adecuado de los Elementos de Protección Personal (EPP's), las herramientas en buen estado. Por lo que se requiere que sea garantizado el presupuesto suficiente, no solo para dotar a los trabajadores si no para realizar las capacitaciones necesarias para un trabajo seguro.

3.5.1 Inspecciones visuales. Esta rutina consiste en identificar posibles y diversas afectaciones que se pueden presentar en cualquiera de los componentes principales de la subestación, con el fin que puedan ser previstas y corregidas antes de que ocurra la falla y en cadena se vea afectado el suministro de energía a El Dorado. Es importante que durante las inspecciones se lleve control sobre las diferentes variables externas que puedan afectar a la subestación, como es el control fauna y/o intervenciones cerca de las redes subterráneas.

Se deben tener en cuenta los siguientes componentes a la hora de realizar la inspección visual:

- En el patio retirar maleza, basura y demás elementos que no hacen parte de la subestación.
- Dentro de la subestación y los cárcamos, barrer de forma controlada para no levantar partículas de polvo que luego caigan a los elementos activos de la subestación, retirar elementos que no hacen parte de la subestación.
- Verificación de los transformadores de potencia, nivel de aceite, nivel de humedad, ruidos, estado de conexiones de los conductores.
- Verificación de los transformadores de servicios auxiliares, nivel de aceite, ruidos, estado de conexiones de los conductores.
- Verificación de la planta eléctrica, nivel de combustible, estado del cargador de baterías, baterías, precalentador de camisas, nivel del aceite de motor.

- Verificar variables eléctricas (mínimo voltajes y corrientes) en todas las celdas que tengan medida (Medidor, Relé, PLC, etc.)
- Verificar de acuerdo con el diagrama unifilar que todos los interruptores estén insertados y cerrados, en caso de encontrar con un interruptor abierto o extraído éste debe estar tarjetado y bloqueado, de lo contrario se debe notificar al Ingeniero de Mantenimiento para contar con la aprobación de realizar un cierre de los elementos.
- Verificar las conexiones de puesta a tierra y protección contra descargas atmosféricas.
- Verificar conexiones y estado de las baterías de los servicios auxiliares

Estas inspecciones deben ser llevadas a cabo con una frecuencia semanal (S), a cargo de dos (2) técnicos eléctricos capacitados y entrenados en el manejo de la subestación, y al menos uno (1) de ellos con alta capacidad de respuesta y toma de decisiones para actuar sobre cualquier elemento potencial para causar una falla

3.5.2 Termografía. Esta inspección debe ser realizada por el Ingeniero o el Supervisor de Mantenimiento (Termógrafo Nivel I mínimo), buscando ejecutarla en períodos de máxima demanda del sistema, identificando las fallas presentadas y el grado de urgencia para su reparación. A juicio del termógrafo se requiere establecer o categorizar la necesidad de realizar un paro inmediato, para realizar acciones correctivas o preventivas según el caso para corregir la anomalía, o si por el contrario, el elemento puede ser atendido en un corte programado.

Como mínimo se deben evaluar los siguientes puntos:

- Puntos de conexión de Media Tensión
- Cuba y/o tanque de expansión en los transformadores
- Banco de condensadores

- Baterías

La frecuencia de esta actividad debe ser semestral (Se)

3.5.3 Mantenimiento de transformadores. Esta rutina pretende garantizar el buen desempeño del equipo, llevando a cabo las recomendaciones del fabricante. Aprovechando con la redundancia que se cuenta para estos equipos se debe realizar la actividad con el equipo desenergizado, y se deben realizar como mínimo las siguientes actividades:

- Análisis fisicoquímico y cromatografía de gases al aceite. (Se requiere subcontratar).
- Pruebas eléctricas: Relación de transformación, Medida resistencia de aislamiento, Medida resistencia de los devanados.
- Verificación estado DPS.
- Verificación de las conexiones y retorqueo de tornillería.
- Limpieza con paños y productos no corrosivos
- Retiro de maleza.

La actividad debe estar liderada por el supervisor de mantenimiento y con dos (2) técnicos eléctricos. Con una frecuencia anual (A)

3.5.4 Mantenimiento de trenes de celdas. Esta rutina pretende garantizar el buen desempeño del equipo, llevando a cabo las recomendaciones del fabricante. Siempre se debe realizar la actividad con el equipo desenergizado y aplicando las cinco (5) reglas de oro, por lo que se requiere tener planeado las maniobras para realizar bypass y/o anillos de las subestaciones, se deben realizar como mínimo las siguientes actividades:

- Pruebas eléctricas: Medida resistencia de aislamiento, Medida resistencia de contactor.

- Pruebas mecánicas: verificación engranajes, lubricación, extracción e inserción del interruptor sin tensión y sin carga, pruebas de disparo manual, prueba al sistema de puesta a tierra.
- Verificación de las conexiones y retorqueo de tornillería.
- Limpieza con paños y productos no corrosivos
- Validación del estado de los terminales premoldeados

Esta actividad se debe realizar bajo el liderazgo del supervisor de mantenimiento, y con dos (2) técnicos eléctricos. Con una frecuencia anual (A)

3.5.5 Mantenimiento planta eléctrica. Esta rutina pretende garantizar el buen desempeño del equipo, llevando a cabo las recomendaciones del fabricante, se deben realizar como mínimo las siguientes actividades:

- Cambio de aceite y filtros (De acuerdo a las horas de trabajo)
- Cambio filtros de combustible y aire (De acuerdo a las horas de trabajo)
- Revisión nivel de líquido refrigerante
- Medición nivel de carga de las baterías
- Limpieza con paños y productos no corrosivos

Esta actividad se debe realizar bajo el liderazgo del supervisor de mantenimiento, y con dos (2) técnicos eléctricos. Con una frecuencia anual (A)

3.5.5 Mantenimiento Sistema Puesta a Tierra (SPT) y Sistema Protección con Rayos y descargas Atmosféricas (SIPRA). Con el fin de garantizar las condiciones de seguridad para la vida humana y los equipos, se establece rutina de mantenimiento al SPT y SIPRA, el cual debe contemplar mínimo:

- Verificación y ajuste de las conexiones entre elementos
- Limpieza puntas captadoras con elementos no corrosivos
- Medida de resistencia de la malla de puesta a tierra

- Medida de tensiones de paso y de contacto (Bienio)
- Medida de continuidad del SIPRA desconectando del SPT
- Medida de continuidad del SPT con todos los elementos metálicos de la subestación (Bienio)

Esta rutina debe ser llevada a cabo con una frecuencia anual (A), salvo aquellas actividades que se indique lo contrario, a cargo de dos (2) técnicos eléctricos capacitados en el manejo del “Megger” y con sólidos conocimiento sobre SPT y SIPRA.

4. CONCLUSIONES

El desarrollo de la metodología presentada en esta monografía, permitió recopilar información sobre las fallas presentadas durante un período de tiempo de tres (3) años, permitió realizar un análisis completo del estado actual de la subestación y de igual forma poder determinar los modos de fallas que caracterizan estos eventos.

Del análisis de la información, se pudo determinar que la mayor causa de falla presentada en la subestación corresponde a la mano de obra, logrando identificar que las causas están asociadas a la falta de personal técnico y capacitación al grupo de trabajo, dependiendo estos factores al poco presupuesto destinado para el departamento.

La necesidad de aumentar la confiabilidad de la Subestación Terminal Única, para garantizar el suministro de energía eléctrica para el Aeropuerto Internacional El Dorado, fue el indicador fundamental para realizar el análisis de los modos y efectos de fallas.

Una vez realizado el AMEF y calculado el RPN, se puede proponer un plan de mantenimiento enfocado en la confiabilidad de la subestación, mejorando el actual lineamiento del mantenimiento preventivo proyectado.

Al haber realizado el AMEF y analizado la información recolectada por la bitácora del departamento de mantenimiento, se determina que la confiabilidad de la subestación es elevada respecto a los requerimientos contractuales que dispone el contrato de concesión entre OPAIN S.A. y la ANI.

5. RECOMENDACIONES

El plan de mantenimiento propuesto debe ser apoyado con una estrategia de capacitación y gestión del conocimiento para asegurar que la mano de obra ejecute el plan de manera correcta, propiciado a que el personal pueda identificar más elementos de control.

Los datos recolectados en la bitácora de mantenimiento son relevantes, aunque se pueden ampliar la información a diligenciar para poder determinar MTTR y MTBF, índices valiosos para poder establecer criterios de mantenibilidad.

Teniendo en cuenta que el Mantenimiento Total Productivo (TPM), es una filosofía de mantenimiento que exige calidad total en el trabajo de mantenimiento (Factor humano), buscando llegar al nivel de “cero fallas”, y por otro lado el Mantenimiento Centrado en Confiabilidad (RCM), considera que un sistema debe continuar con su trabajo normal a pesar del surgimiento de alguna falla o de la falencia de algún componente del sistema. Se considera que un próximo estudio debe enfocarse en actualizar su plan de mantenimiento basado en estos dos tipos de mantenimiento con el fin de aumentar aún más la confiabilidad y disponibilidad de la Subestación Terminal Única.

BIBLIOGRAFÍA

Aeropuertos del mundo [sitio web]. Guía del pasajero - Aeropuerto de Bogotá El Dorado (BOG). (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: <https://www.aeropuertosdelmundo.com.ar/americanadelsur/colombia/aeropuertos/el-dorado.php>

AGUILAR OCEGUEDA, Christian, et al. Evolución Y Taxonomía Del Mantenimiento. [En línea] (Recuperado en 27 agosto 2018). Disponible en: <https://es.scribd.com/presentation/384348841/1-1-Evolucion-Del-Mantenimiento-UNIDAD-I>

BARBOSA CUBILLOS, Carlos Andrés. Implementación del método de árbol de fallas para la confiabilidad de subestaciones de alta tensión modelado en MATLAB, Universidad de La Salle, Trabajo de grado ingeniería año 2008.

Celis Guerra, Laura Cristina. Diseño de un Plan de Mantenimiento Productivo Total en la Empresa Industrias Metalex S.A.S. Trabajo de grado para optar el título de Ingeniería Industrial. Bucaramanga: Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga, Facultad de Ingeniería Industrial, 2017, p. 35 (Recuperado en 27 mayo 2018). Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/11610/2018lauracelis.pdf?sequence=1>

CHRYSLER Corporation; FORD Motor Company; General Motors Corporation. Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), Second Edition, February 1995.

CRAVEN, Paul. El FMEA del sistema hidráulico, disponible en internet: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/hydraulic-system-fmea-made-easy>

DENISIS, Alonzo; MILLÁN, Gabriela; MOYA, Francelis. Detección y análisis de fallas. Análisis de modos y efectos de fallas, Universidad Nacional Antonio José de Sucre, Trabajo de grado año 2012.

DIAZ CAJAS, Christian Santiago y QUIMBIURCO VILLA, Miguel Eduardo. Automatización del análisis de modos de falla y efectos FMEA en la ingeniería de mantenimiento aplicado a la industria ecuatoriana. [En línea]. Proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico. Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería Mecánica. 2008. p. 81-83. (Recuperado en 27 febrero 2018). Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/889/1/CD-1771%282008-11-05-11-33-01%29.pdf>

El Espectador [sitio web]. El Dorado, de una leyenda a un aeropuerto que vuela al futuro. (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: <https://www.elespectador.com/noticias/economia/el-dorado-de-una-leyenda-un-aeropuerto-vuela-al-futuro-articulo-539604>

GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, Francisco Javier. Teoría y Práctica del Mantenimiento Industrial Avanzado. España: FC Editorial, 2011. 640p.

HÉRNAN MORFÍN, David. Análisis del modo y efecto de las fallas potenciales aplicado a un caso de estudio, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis de Maestría en Ingeniería año 2005. P.23-37

Ley 1529 de 2012, Colombia. Diario Oficial No. 48.432 de 16 de mayo de 2012. (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: <http://wsp.presidencia.gov.co/Normativa/Leyes/Documents/ley152916052012.pdf>

MARTÍNEZ GIRALDO, León Augusto. Metodología para la definición de tareas de mantenimiento basado en confiabilidad, condición y riesgo aplicada a equipos del sistema de transmisión nacional, Universidad Nacional de Colombia año 2014.

MORA FLÓREZ, Juan José; CARRILLO CAICEDO, Gilberto; JAIMES BÁEZ, Jorge Antonio. Atención de Fallas en Subestaciones de Transmisión de Energía. Revista Latinoamericana IEEE, vol. 2, No 3, Septiembre 2004.

MUÑOZ ABELLA, Maria Belén. Mantenimiento Industrial, Universidad Carlos III de Madrid. p.3 (Recuperado en 27 mayo 2018). Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-mecanica/teoria-de-maquinas/lecturas/MantenimientoIndustrial.pdf>

PEREIRA, Ron. 10 Pasos del análisis de modo y efecto de la falla (FMEA), Diciembre 2016, disponible en internet: <https://www.gembaacademy.com/blog/es/2016/12/30/10-pasos-del-analisis-de-modo-y-efecto-de-la-falla-fmea>

PortalBogotá.com. [sitio web]. La historia de El Dorado marzo de 2015. (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: <http://www.portalbogota.com/Historia-aeropuerto-el-Dorado-Bogota.html>

Rincón Eléctrico [sitio web]. MANTENIMIENTO DE SUBESTACIONES ELECTRICAS. (Recuperado en 27 mayo 2018). Disponible en: http://www.javierbotero.com/Javier_Botero/MANTENIMIENTO_DE_SUBESTACIONES.html

TROFFÉ, Mario. Análisis ISO 14224 / OREDA. Relación con RCM-FMEA, disponible en internet:

<http://www.mantenimientomundial.com/sites/mm/notas/0605MarioTroffeISO14224.pdf>

Semana [sitio web]. El consorcio Opain ganó la licitación para modernizar y operar el aeropuerto El Dorado. (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: <https://www.semana.com/on-line/articulo/el-consorcio-opain-gano-licitacion-para-modernizar-operar-aeropuerto-el-dorado/80607-3>

SIERRA ÁLVAREZ, Gabriel Antuán. Programa de Mantenimiento Preventivo para la Empresa Metalmecánica Industrias AVM S.A. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Trabajo de grado año 2004, disponible en internet: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2004/112490.pdf>

Wikipedia [sitio web]. Aeropuerto Internacional El Dorado. (Recuperado en 14 junio 2018). Disponible en: https://es.wikipedia.org/wiki/Aeropuerto_Internacional_El_Dorado

QUEZADA BANCHÓN, Marco Antonio. Plan para la implementación del mantenimiento centrado en la confiabilidad en plantas de tratamientos de agua potable. Proyecto de grado previo a la obtención del título de ingeniería industrial. Ecuador: Universidad Estatal De Milagro, Facultad Ciencias De La Ingeniería, 2014, p. 7

YOC DE LA CRUZ, Juan Pablo. Mantenimiento predictivo en subestaciones de distribución de EEGSA utilizando termografía de rayos infrarrojos. Proyecto de grado previo a la obtención del título de ingeniero mecánico electricista. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad De Ingeniería, 2005, p. 36-40, 49-61

ANEXO B. Consolidado de solicitudes de servicios relacionados a fallos de la S/E TU

FECHA EVENTO	HORA EVENTO	EVENTO	UBICACIÓN FALLA	CARGO FUNCIONARIO	FALLA	ACCIONES	# SOLICITUD DE SERVICIO	# ORDEN DE TRABAJO
2/02/2015	8:00	Corte energía en la terminal unificada	S/E TU	Supervisor	Disparo protección principal 34,5, por daño acometida alimentación Subestación OPAIN 2, Personal CCND se encontraba realizando pilotaje.	Se repone el servicio y se presta alimentación a OPAIN 2 por medio de OPAIN 3, mientras CCND realiza reparación conductores afectados.	RESUELVE CCND	RESUELVE CCND
13/03/2015	23:00	Algunas zonas del aeropuerto sin energía	S/E TU	Técnico	Disparo protección subestación OPAIN 1, al realizar mala operación en el cierre de interruptores de la barra partida	El supervisor de turno realiza deslastre de carga y reinicia la reconexión de la subestación.	SS: XXXX	OT: XXXX
17/04/2015	11:00	Corte energía en la terminal unificada	S/E TU	Supervisor	Disparo protección principal 34,5, por daño acometida alimentación Subestación OPAIN 4, Personal CCND se encontraba realizando pilotaje.	Se repone el servicio y se presta alimentación a OPAIN 4 por medio de OPAIN 1, mientras CCND realiza reparación conductores afectados.	RESUELVE CCND	RESUELVE CCND
5/08/2015	1:00	Con el fin de regresar una maniobra, se queda sin energía	S/E TU	Técnico	Una mala maniobra ocasiona el cortocircuitos entre circuitos de anillo	Deslastre de cargas y reconexión de subestación afectada	SS: XXXX	OT: XXXX

		subestación Bomberos						
10/09/2015	4:00	Bloqueo sistema BHS	S/E TU	Técnico	Flickeo en el circuito de la subestación Florida	Se realiza comunicación con el operador de red para cambiar el circuito de alimentación de la subestación	SS: XXXX	OT: XXXX
6/10/2015	9:00	Corte energía en la terminal unificada	S/E TU	Supervisor	Disparo protección principal 34,5, por daño acometida alimentación Subestación OPAIN 4, Personal CCND se encontraba realizando pilotaje.	Se requiere realizar bypass de las acometidas entre el centro de generación y OPAIN 4, OPAIN 1, CODENSA 4	RESUELVE CCND	RESUELVE CCND
8/10/2015	18:00	Corte energía en el muelle sur de la terminal unificada	S/E TU	Técnico	Se realiza el cierre accidental de una protección con alimentadores en falla, se produce cortocircuito en la barra de 11,4kv disparando protección 34,5kv	Se extrae protección de la celda con alimentadores en falla, y se realiza la reconexión de las subestaciones	SS: XXXX	OT: XXXX
24/11/2015	23:00	No se puede realizar maniobras para adecuaciones de obra civil cerca de la subestación madre	S/E TU	Técnico	Mala manipulación del carro del interruptor no permite realizar anillado de subestaciones para desenergización de la acometida de la s/e OPAIN 4	Se solicita asistencia técnica de SIEMENS para dar solución. Se evidencia que se dañó un mecanismo del interruptor y debe ser reemplazado	SS: XXXX	OT: XXXX
29/02/2016	10:00	Corte energía en la	S/E TU	Técnico	Disparo protección principal	Se requiere realizar ajuste a la coordinación de	RESUELVE CCND	RESUELVE CCND

		subestación OPAIN 4			subestacione OPAIN 4, al momento de ingresar la nueva carga de la ampliación del edificio	protecciones de la Subestación para poder meter la nueva carga		
17/03/2016	9:00	Corte energía en la terminal unificada	S/E TU	Supervisor	Disparo protección principal 34,5, por daño acometidas alimentación subestaciones OPAIN 1, 2, 3, 4 y Centro de generación. Personal CCND se encontraba realizando adecuación de cajas de paso	Se repone el servicio, realizando de forma manual el encendido del centro de generación y haciendo la reconexión de las subestaciones OPAIN	RESUELVE CCND	RESUELVE CCND
23/08/2016	6:00	Corte energía en la terminal unificada	S/E TU	Supervisor	Disparo protección principal 34,5, por daño acometida alimentación Subestación OPAIN 2, Personal CCND se encontraba realizando pilotaje.	Se repone el servicio y se presta alimentación a OPAIN 2 por medio de OPAIN 3, mientras CCND realiza reparación conductores afectados.	RESUELVE CCND	RESUELVE CCND
26/11/2016	2:00	Bloqueo sistema BHS	S/E TU	Técnico	Flickeo en el circuito de la subestación Florida	Se realiza comunicación con el operador de red para cambiar el circuito de alimentación de la subestación	SS: XXXX	OT: XXXX
25/01/2017	15:00	Durante inspección	S/E TU	Técnico	Técnico inserta interruptor y le da	Se extrae protección de la celda con alimentadores en	SS: XXXX	OT: XXXX

		rutinaria se evidencia interruptor de subestación OPAIN 4 extraído			cierre ocasionando un corto circuito, ya que el interruptor se encontraba así por daño en las líneas que alimentan la S/E	falla, y se realiza la reconexión de las subestaciones. Se marca interruptor para evitar que sea operado nuevamente hasta no despegar la falla		
18/03/2017	11:00	Encendido de centro de generación	S/E TU	Supervisor	Una subtensión en la red que alimenta la Subestación madre, ocasina que se enciendan las plantas pero no hay necesidad de realizar transferencia	Se realiza comunicación con el operador de red para subir el nivel de tensión	SS: XXXX	OT: XXXX
13/08/2017	2:00	Bloqueo sistema BHS	S/E TU	Técnico	Flickeo en el circuito de la subestación Florida	Se realiza comunicación con el operador de red para cambiar el circuito de alimentación de la subestación	SS: XXXX	OT: XXXX

ANEXO C. Análisis de Modos y Efectos de Fallos

ANÁLISIS DE MODOS Y EFECTOS DE FALLAS (AMEF)

Nombre del Sistema (Título):	SUBESTACIÓN TERMINAL ÚNICA	Fecha AMFE:	10/04/2018
Responsable (Dpto. / Área):	MANTENIMIENTO ELÉCTRICO	Fecha Revisión	
Responsable de AMFE (persona):	JORGE ENRIQUE PULIDO		

Función o Componente del Servicio	Modo de Fallo	Efecto	Causas	Método de detección	G gravedad	O ocurrencia	D detección	NPR inicial	Acciones recomend.	Responsable	Acción Tomada	G gravedad	O ocurrencia	D detección	NPR final
Tren de celdas 34,5 kV	Mano de obra	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Mala maniobra	Visual	7	4	10	280	Realizar capacitación al personal técnico	Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento	Se capacita al personal	7	3	3	63
	Mano de obra	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Falta de personal para realizar actividad	Visual	7	3	8	168	Autorizar en el presupuesto aumento del personal operativo	Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento	Se actualiza el plan de mantenimiento	7	3	3	63

	Elementos	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Falta de mantenimiento al interruptor de potencia	Visual	10	3	6	180	Actualizar plan de mantenimiento	Jefe de Mantenimiento	Se actualiza el plan de mantenimiento	10	3	3	90
	Elementos	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Terminal premoldeado fallado	Instrumento y visual	7	3	10	210	Actualizar plan de mantenimiento, incluir termografía	Jefe de Mantenimiento	Se realizan inspecciones de termografía	7	3	3	63
	Diseño	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Mala coordinación de protecciones	Instrumento y visual	4	3	10	120	Realizar ajuste y/o calibración de relés	Ingeniero de mantenimiento	Se realiza ajuste de los relés	4	3	3	36
	Diseño	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Daño de redes de bypass, y generación que comparten canalización	Visual	10	3	10	300	Identificar alimentadores en cada una de las cajas de paso	Ingeniero de mantenimiento	Se identifican los alimentadores de manera que sea fácil y rápida	10	3	3	90
	Mantenimiento	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Falta de capacitación	Visual	7	3	8	168	Gestión del conocimiento, programar capacitaciones	Ingeniero de mantenimiento	Se realiza gestión del conocimiento	7	3	3	63

	Causa Externa	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Daños de canalizaciones por obras	Visual	10	4	10	400	En coordinación con el constructor validar las zonas a intervenir y realizar liberación de la zona	Jefe de Mantenimiento	Se planea con anticipación la actividades relacionadas con demolición o perforación	10	3	6	180
	Causa Externa	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Fallas en los circuitos de alimentación	Visual	7	7	8	392	Gestionar ante el operador de red para garantizar alta disponibilidad de los circuitos	Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento	Compromiso por parte de CODENSA para garantizar confiabilidad en los circuitos	7	3	8	168
Tren de celdas 11,4 kV	Mano de obra	Interrupción del suministro de energía en cualquiera de las subestaciones OPAIN	Mala maniobra	Visual	4	4	10	160	Realizar capacitación al personal técnico	Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento	Se capacita al personal	7	3	3	63
	Mano de obra	Interrupción del suministro de energía en cualquiera de las subestaciones	Falta de personal para realizar actividad	Visual	7	3	8	168	Autorizar en el presupuesto aumento del personal operativo	Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento	Se actualiza el plan de mantenimiento	7	3	3	63

	ones OPAIN													
Elementos	Interrupción del suministro de energía en cualquiera de las subestaciones OPAIN	Falta de mantenimiento al interruptor de potencia	Visual	1 0	3	6	180	Actualizar plan de mantenimiento	Jefe de Mantenimiento	Se actualiza el plan de mantenimiento	10	3	3	90
Elementos	Interrupción del suministro de energía en cualquiera de las subestaciones OPAIN	Terminal premoldeado fallado	Instrumento y visual	7	3	1 0	210	Actualizar plan de mantenimiento, incluir termografía	Jefe de Mantenimiento	Se realizan inspecciones de termografía	7	3	3	63
Diseño	Interrupción del suministro de energía en cualquiera de las subestaciones OPAIN	Mala coordinación de protecciones	Instrumento y visual	4	3	1 0	120	Realizar ajuste y/o calibración de relés	Ingeniero de mantenimiento	Se realiza ajuste de los relés	4	3	3	36

	Mantenimiento	Interrupción del suministro de energía en cualquiera de las subestaciones OPAIN	Falta de capacitación	Visual	7	3	8	168	Gestión del conocimiento, programar capacitaciones	Ingeniero de mantenimiento	Se realiza gestión del conocimiento	7	3	3	63
	Causa Externa	Interrupción del suministro de energía en cualquiera de las subestaciones OPAIN	Daños de canalizaciones por obras	Visual	10	4	10	400	En coordinación con el constructor validar las zonas a intervenir y realizar liberación de la zona	Jefe de Mantenimiento	Se planea con anticipación la actividades relacionadas con demolición o perforación	10	3	6	180
Acople de barras 34,5 o 11,4 kV	Mano de obra	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Mala maniobra	Visual	7	4	10	280	Realizar capacitación al personal técnico	Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento	Se capacita al personal	7	3	3	63
	Elementos	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Falta de mantenimiento al interruptor de potencia	Visual	10	3	6	180	Actualizar plan de mantenimiento	Jefe de Mantenimiento	Se actualiza el plan de mantenimiento	10	3	3	90

	Mantenimiento	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Falta de personal para realizar actividad	Visual	7	3	8	168	Autorizar en el presupuesto aumento del personal operativo	Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento	Se actualiza el plan de mantenimiento	7	3	3	63
	Mantenimiento	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Falta de capacitación	Visual	7	3	8	168	Gestión del conocimiento, programar capacitaciones	Ingeniero de mantenimiento	Se realiza gestión del conocimiento	7	3	3	63
Transformadores de Potencia 20/30 MVA	Elementos	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Falla de piezas o componentes del transformador	Instrumento y visual	4	3	3	36	Actualizar plan de mantenimiento	Jefe de Mantenimiento	Se actualiza el plan de mantenimiento	4	3	1	12
	Elementos	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Terminal premoledado fallado	Instrumento y visual	4	3	10	120	Actualizar plan de mantenimiento, incluir termografía	Jefe de Mantenimiento	Se realizan inspecciones de termografía	4	3	1	12
	Mantenimiento	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Falta de personal para realizar actividad	Visual	4	3	8	96	Autorizar en el presupuesto aumento del personal operativo	Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento	Se actualiza el plan de mantenimiento	4	3	3	36

	Mantenimiento	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Falta de capacitación	Visual	4	3	8	96	Gestión del conocimiento, programar capacitaciones	Ingeniero de mantenimiento	Se realiza gestión del conocimiento	4	3	3	36
	Medio Ambiente	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Fallo DPS por descarga atmosférica	Instrumento y visual	4	3	6	72	Actualizar plan de mantenimiento, incluir medidas de aislamiento sobre DPS	Jefe de Mantenimiento	Se realizan medidas de aislamiento	4	3	2	24
	Medio Ambiente	Interrupción del suministro de energía en El Dorado	Falla por ingreso de animales a las partes vivas del equipo	Visual	7	3	10	210	Realizar campañas de aseo y de no alimentar animales	Control Fauna	Se crean estrategias para mitigar el ingreso de animales	7	3	6	126
Transformadores de Instrumentación	Elementos	Interrupción parcial del suministro de energía en El Dorado	Falla de piezas o componentes del transformador	Instrumento y visual	7	3	10	210	Actualizar plan de mantenimiento, incluir termografía	Jefe de Mantenimiento	Se realizan inspecciones de termografía	7	3	3	63
	Elementos	Interrupción parcial del suministro de energía en El Dorado	Terminal premoldeado fallado	Instrumento y visual	4	3	10	120	Actualizar plan de mantenimiento, incluir termografía	Jefe de Mantenimiento	Se realizan inspecciones de termografía	4	3	1	12

	Mantenimiento	Interrupción parcial del suministro de energía en El Dorado	Falta de personal para realizar actividad	Visual	4	3	8	96	Autorizar en el presupuesto aumento del personal operativo	Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento	Se actualiza el plan de mantenimiento	4	3	3	36
Servicios Auxiliares	Mano de obra	Pérdida de los elementos de control de la subestación	Mala maniobra	Visual	4	3	10	120	Realizar capacitación al personal técnico	Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento	Se capacita al personal	1	3	3	9
	Elementos	Pérdida de los elementos de control de la subestación	Falla generador eléctrico	Visual	1	3	10	30	Actualizar plan de mantenimiento	Jefe de Mantenimiento	Se actualiza el plan de mantenimiento	1	3	3	9
	Elementos	Pérdida de los elementos de control de la subestación	Terminal premoldeado fallado	Instrumento y visual	4	3	10	120	Actualizar plan de mantenimiento, incluir termografía	Jefe de Mantenimiento	Se realizan inspecciones de termografía	1	3	3	9
	Mantenimiento	Pérdida de los elementos de control de la subestación	Falta de herramientas	Instrumento y visual	4	3	8	96	Autorizar en el presupuesto adquisición de herramientas	Gerencia de Ingeniería y Mantenimiento	Se realiza compra de herramientas	4	3	3	36

	Medio Ambiente	Pérdida de los elementos de control de la subestación	Fallo DPS por descarga atmosférica	Instrumento y visual	4	3	6	72	Actualizar plan de mantenimiento, incluir medidas de aislamiento sobre DPS	Jefe de Mantenimiento	Se realizan medidas de aislamiento	4	3	2	24
	Medio Ambiente	Pérdida de los elementos de control de la subestación	Falla por ingreso de animales a las partes vivas del equipo	Visual	7	3	10	210	Realizar campañas de aseo y de no alimentar animales	Control Fauna	Se crean estrategias para mitigar el ingreso de animales	7	3	6	126