



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**ANÁLISIS RAM DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA GUACARA I, 115Kv/34.5-13.8 Kv,
USANDO DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL Y DE WEIBULL**

Autora: María Angélica Terán T.
Tutor: MSc. Ing. César A. Salazar V.

Valencia, diciembre de 2018



**UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN DE POSTGRADO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**CONSTANCIA DE ACEPTACIÓN DEL TUTOR
Y APROBACIÓN DEL PROFESOR DE SEMINARIO**

**ANÁLISIS RAM DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA GUACARA I, 115Kv/34.5-13.8 Kv,
USANDO DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL Y DE WEIBULL**

**Aprobado en el Área de Estudios de Postgrado por Dra. Zoraida Linárez
Profesor del Seminario de Investigación y Trabajo de Grado**

Dra. Zoraida Linárez

C.I. 3.583.701

**Acepto la Tutoría del presente Trabajo según las condiciones del Área de Estudio de
Postgrado de la Universidad de Carabobo.**

MSc. Ing. César A. Salazar V.

C.I. 1.195.033

Valencia, diciembre de 2018

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
ÁREA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA
MAESTRIA DE INGENIERIA ELÉCTRICA

VEREDICTO

Nosotros, Miembros del Jurado designado para la evaluación del trabajo de Grado titulado:
**ANÁLISIS RAM DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA GUACARA I, 115Kv/34.5-13.8
Kv. USANDO DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL Y DE WEIBULL.** presentado por María
Angélica Terán Terán para optar al Título de Magister en Ingeniería Eléctrica estimamos que el
mismo reúne los requisitos para ser considerado como:

APROBADO

Nombre, apellido, C.I. Firma del Jurado

Geraci A. Salazar CI: 1195033 Geraci Salazar
Katiuska Sandoz CI: 13000009 Katiuska Sandoz
Teddy V. Rojas CI: 4896233 Teddy Rojas

VALENCIA, 07/06/19



ACTA DE DISCUSIÓN DE TRABAJO DE GRADO

En atención a lo dispuesto en los Artículos 137, 138 y 139 del Reglamento de Estudios de Postgrado de la Universidad de Carabobo, quienes suscribimos como Jurado designado por el Consejo de Postgrado de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a lo previsto en el Artículo 135 del citado Reglamento, para estudiar el Trabajo de Grado titulado:

"ANÁLISIS RAM DE LA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA GUACARA I, 115Kv/34,5-13.5 Kv, USANDO DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL Y DE WEIBULL"

Presentado para optar al grado de **MAGÍSTER EN INGENIERÍA ELÉCTRICA** por la aspirante:

MARIA A. TERÁN

C.I.: V.- 8.669.611

Habiendo examinado el Trabajo presentado, decidimos que el mismo está **APROBADO**.

En Valencia, a los siete (07) día del mes de agosto del año dos mil diecinueve.

Prof. Cesar A. Salazar V

C.I. 1.195.111

Fecha: 07/08/2019

Prof. Katuska del Valle Sánchez

C.I. 13.666.334

Fecha: 07/08/2019

Prof. Teddy Vicente Rojas Zorrilla

C.I. 4.876.233

Fecha: 07/08/2019

Recibido
18/10/2019

Índice

Introducción	1
Capítulo I El Problema	3
Planteamiento del Problema	3
Objetivos	5
Objetivo General	5
Objetivos Específicos	5
Justificación	5
Delimitación y Alcance	7
Limitaciones	7
Capítulo II Marco Teórico	9
Antecedentes de la investigación	9
Bases teóricas	11
Teoría de fallas	11
Curva de la Bañera	12
Mantenimiento	13
Parámetros utilizados en mantenimiento	13
Diagrama de Pareto	15
Mantenibilidad.	15
Disponibilidad.	16
Confiabilidad	17
Teoría de la confiabilidad de sistemas	18
Distribución Exponencial	18
Distribución de Weibull	20
Sistemas Reparables	22
Diagramas de bloques de confiabilidad (DBC).	22
Análisis de modos y efectos de fallas	25
Árbol de falla	26
Análisis RAM	28
Subestaciones eléctricas	33
Transformadores de potencia	34

Disyuntores de potencia	35
Capítulo III Marco Metodológico	36
Diseño de la investigación	36
Tipo de investigación	36
Población y muestra	37
Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	37
Fases de la investigación	38
Validez y confiabilidad de los instrumentos	40
Capítulo IV Análisis de Resultados	41
Subestación eléctrica Guacara I.	41
Histórico de fallas	42
Pareto de la subestación eléctrica Guacara I.	42
Confiabilidad de la subestación Guacara I, usando distribución Exponencial.	43
Infiabilidad de la subestación Guacara I, usando distribución Exponencial.	43
Confiabilidad e infinidad de la subestación Guacara I, usando distribución Exponencial.	44
Función densidad de probabilidad de la subestación Guacara I, usando distribución Exponencial.	44
Confiabilidad, infinidad y función densidad de probabilidad de la subestación Guacara I, usando distribución Exponencial.	44
Tasa de fallas de la subestación Guacara I, usando distribución Exponencial.	45
Confiabilidad de la subestación Guacara I, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β .	45
Infiabilidad de la subestación Guacara I, usando distribución de Weibull para diferentes valores de β .	46
Función densidad de probabilidad ($f(t)$ o pdf) de la subestación Guacara I, usando distribución Weibull para diferentes valores de β .	46
Tasa de falla de la subestación Guacara I, usando distribución de Weibull para diferentes valores de β .	46

Curva de la Bañera de la subestación Guacara I.	47
Disponibilidad de la subestación Guacara I, usando distribución Exponencial	47
Mantenibilidad de la subestación Guacara I, usando distribución Exponencial	47
Análisis de modos y efectos de fallas de transformadores de potencia	48
Árbol de falla del transformador de potencia	48
Análisis de modos y efectos de fallas del disyuntor de potencia	48
Árbol de falla del disyuntor de potencia	48
Árbol de falla de la subestación Guacara I	48
Estudio de los elementos y equipos fallados en la subestación Guacara I	48
Confiabilidad e in fiabilidad de transformador 1	49
Confiabilidad e in fiabilidad de transformador 2	49
Confiabilidad e in fiabilidad de transformador 3	49
Confiabilidad e in fiabilidad de transformador 4	50
Confiabilidad del disyuntor de baja tensión del transformador 4	50
Confiabilidad de la barra 115 Kv	50
Modos de fallas presente en el histórico de fallas de la subestación Guacara I.	50
Confiabilidad de la subestación Guacara I a partir del diagrama de bloques	51
Capítulo V Conclusiones y Recomendaciones	53
Conclusiones	53
Recomendaciones	56
Referencias	58
Apéndices	61
Apéndice 1. Histórico de fallas de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018	62
Apéndice 2. Determinación de los parámetros TPF, TEF, TPR, TPEF, TPPR, λ y μ	70
Apéndice 3. Pareto de frecuencia absolutas de las fallas registradas en la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018	73
Apéndice 4. Pareto de frecuencia relativas de las fallas registradas en la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018	74

Apéndice 5. Tabla de datos de confiabilidad ($R(t_i)$) in fiabilidad ($Q(t_i)$), densidad de probabilidad (pdf o $f(t_i)$) y tasa de fallas ($r(t_i)$) de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución Exponencial.	75
Apéndice 6. Confiabilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución Exponencial.	77
Apéndice 7. Infiabilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución Exponencial.	78
Apéndice 8. Confiabilidad e in fiabilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución Exponencial.	79
Apéndice 9. Función densidad de probabilidad (pdf) de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución Exponencial.	80
Apéndice 10. Confiabilidad, in fiabilidad y función densidad de probabilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución Exponencial.	81
Apéndice 11. Tasa de fallas de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución Exponencial.	82
Apéndice 12. Tabla de datos de confiabilidad $R(t)$ de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β	83
Apéndice 13. Confiabilidad $R(t)$ de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β .	85
Apéndice 14. Tabla de datos de in fiabilidad $Q(t)$, de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β	86
Apéndice 15. Infiabilidad $Q(t)$ de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β .	88

Apéndice 16. Tabla de datos de función densidad de probabilidad ($f(t)$ o pdf) de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β .	89
Apéndice 17. Función densidad de probabilidad ($f(t)$ o pdf) de la subestación Guacara I para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β .	91
Apéndice 18. Tabla de datos de la tasa de fallas de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β .	92
Apéndice 19. Tasa de fallas ($\lambda(t)$) de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β .	94
Apéndice 20. Curva de la Bañera para la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β .	95
Apéndice 21. Tabla de datos de disponibilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución Exponencial.	96
Apéndice 22. Disponibilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución Exponencial.	98
Apéndice 23. Tabla de datos de mantenibilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando Distribución Exponencial.	99
Apéndice 24. Mantenibilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 a octubre de 2018, usando distribución Exponencial.	101
Apéndice 25. Análisis de modos y efectos de falla del transformador de potencia	102
Apéndice 26. Árbol de falla del transformador de potencia	105
Apéndice 27. Análisis de modos y efectos de falla del disyuntor	106
Apéndice 28. Árbol de falla del disyuntor	108
Apéndice 29. Árbol de falla de la subestación eléctrica Guacara I	109

Apéndice 30. Tabla de datos de confiabilidad e Infiabilidad del transformador de potencia 1	110
Apéndice 31. Confiabilidad e infiabilidad del transformador de potencia 1	111
Apéndice 32. Tabla de confiabilidad e infiabilidad del transformador de potencia 2	112
Apéndice 33. Confiabilidad del transformador de potencia 2	113
Apéndice 34. Tabla de confiabilidad e infiabilidad del transformador de potencia 3	114
Apéndice 35. Confiabilidad del transformador de potencia 3	115
Apéndice 36. Tabla de confiabilidad e infiabilidad del transformador de potencia 4	116
Apéndice 37. Confiabilidad del transformador de potencia 4	117
Apéndice 38. Diagrama de bloque de la subestación Guacara I	118
Apéndice 39. Calculo de confiabilidad a partir del diagrama de bloques de la subestación Guacara I	119
Apéndice 40. Reducción del diagrama de bloques de la subestación Guacara I	120
Anexos	121
Anexo 1. Subestación Guacara I	122
Anexo 2. Plano subestación Guacara I hasta febrero 2018	123
Anexo 3 Plano actual de la subestación Guacara I	124
Anexo 4. Datos de placa transformador 1	125
Anexo 5. Datos de placa transformador 2	126
Anexo 6. Datos de placa transformador 3	127
Anexo 7. Datos de placa transformador 4	128

Índice de Figuras

Figura 1. Manifestaciones y causas de fallas en los equipos electromecánicos	12
Figura 2. Curva de la Bañera	13
Figura 3. Confiabilidad de acuerdo a la distribución Exponencial.	20
Figura 4. Confiabilidad de acuerdo a la distribución Weibull, para diferentes valores de β .	21
Figura 5. Diagrama de sistema en serie.	23
Figura 6. Diagrama de sistema en paralelo.	24
Figura 7. Diagrama de sistemas redundantes.	25
Figura 8. Representación gráfica del árbol de falla	27

Índice de Tablas

Tabla 1. Fases de la investigación y su relación con los objetivos específicos	39
Tabla 2. Plan de trabajo.	39
Tabla 3. Pareto	43
Tabla 4. Modos de falla de los equipos y elementos fallados en la subestación Guacara I, e identificación del modo y efecto de falla dentro de la AMEF de los transformadores de potencia y disyuntores	51
Tabla 5. Parámetros de falla de los elementos fallados de la subestación Guacara I	52

Dedicatoria

A mis Padres, Angélica y Carlos (Chicho), por darme la vida, por su infinito apoyo y no dejarme caer nunca...sé que mi Padre esta presente, aunque ya no esté físicamente...

A mi hija, Arantxa Gabriela, por ser lo más hermoso de la vida.

A mi primer esposo, Freddy, que, aunque no esté presente físicamente, sé que estaría orgulloso de este logro.

María Angélica...

Agradecimientos

A mi Madre y a mi Padre por el apoyo incondicional que me han brindado en la vida, ya que sin ellos no hubiese logrado ser lo que soy hoy.

A mi primer esposo, Freddy, por haberme impulsado a inscribirme en el Postgrado, y haber estado siempre atento a mis requerimientos durante el curso de mis primeras materias durante sus últimos años de vida.

A mi hija, Arantxa Gabriela, por su paciencia ante mis ausencias al cursar mis materias y realizar esta Maestría.

A mi esposo, Richard, por ser tan paciente, por consentirme y ser tan considerado, apoyándome constantemente a resolver los problemas que se presentan día a día.

A mis hermanas Yrene, María Alejandra y Marisol por su gran apoyo siempre.

Al Profesor César A. Salazar V., inmensamente agradecida por haber sido un excelente guía.

Al Ing. Jorge Rey Lago, por su importante aporte que contribuyo con la consecución de este trabajo.

Al Ing. Carlos García por apoyar con el histórico de fallas, básico para este estudio.

María Angélica...

Introducción

En el presente trabajo se desarrolla el Análisis RAM, por sus siglas en inglés (reliability, availability and maintainability) o Análisis CDM (confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad), a la subestación eléctrica Guacara I, de la Corporación Eléctrica Nacional, S.A (CORPOELEC), buscando pronosticar el comportamiento en el tiempo, de los equipos y de la subestación en general.

Para este análisis se utilizan los históricos de fallas del Sistema de Administración de Operaciones (SAO) de la empresa CORPOELEC, aplicando métodos matemáticos-estadísticos, diagrama de bloques de la subestación, la distribución Exponencial y la distribución de Weibull.

En el capítulo I de la investigación, se plantea el problema, definiendo el objetivo general, los objetivos específicos, las razones que justifican la investigación, el alcance, delimitación y las limitaciones del estudio.

El capítulo II, expone aspectos bibliográficos asociados al problema, tales como investigaciones previas, así como teorías y conceptos, como el Análisis RAM, teoría de fallas, confiabilidad, mantenibilidad, disponibilidad, diagrama de Pareto, distribución Exponencial, distribución de Weibull, diagramas de bloque de confiabilidad, análisis y modos de fallas, árbol de fallas, subestaciones eléctricas, transformadores de potencia, disyuntores, entre otros.

En el capítulo III, se presenta el marco metodológico que permitirá realizar el Análisis RAM, esbozando el tipo de investigación, fases de la investigación, población y muestra, aspectos referentes a las variables, técnica de recolección de datos, entre otros.

El Capítulo IV, muestra el análisis de los resultados; estudiándose el histórico de fallas, el pareto, todas las curvas obtenidas del Análisis RAM, curva de la bañera, el diagrama de bloques de confiabilidad, como también se le hace un estudio de confiabilidad a los

transformadores de potencia. De igual manera, se presentan los modos y efectos de fallas y el árbol de falla de los elementos primarios de la subestación, como son los transformadores y disyuntores.

Finalizando, con el Capítulo V, donde se despliegan todas las conclusiones y recomendaciones al respecto.

Capítulo I

El Problema

Planteamiento del Problema. Las subestaciones eléctricas son un componente fundamental dentro de los sistemas eléctricos de potencia, que deben prestar un servicio continuo los veinticuatro (24) horas del día, y de acuerdo a la demanda eléctrica que manejan los diferentes procesos del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), como son generación, transmisión y distribución, las subestaciones eléctricas de transmisión destacan su importancia debido a los grandes bloques de energía que manejan para cubrir la alta demanda.

Entre las subestaciones de transmisión en el estado Carabobo, se dispone de la subestación Guacara I, de la Corporación Eléctrica Nacional (CORPOELEC), dependiente de la Gerencia de Transmisión Carabobo, la cual alimenta circuitos residenciales, comerciales y mixtos, como también circuitos industriales exclusivos. La importante zona industrial el Tigre es alimentada por esta subestación, donde surte energía a la subestación de distribución de CORPOELEC Pruinca y a las subestaciones industriales exclusivas de las empresas Alucasa, Ponderosa y Papeles Venezolanos. De manera tal, que una falla en ella implicaría la interrupción del servicio a muchos usuarios, ocasionando la suspensión de importantes actividades productivas en el sector industrial, residencial y comercial, acarreando enormes pérdidas económicas, desmejorando la calidad de vida para la sociedad en general.

Debido a la creciente demanda eléctrica que ha sufrido el SEN en los últimos veinte (20) años, del cual no se escapa el Municipio Guacara, se han presentado fallas en la subestación Guacara I que ameritan atención. De manera tal, que para mejorar el desempeño de la subestación Guacara I, es necesario implementar una efectiva y adecuada estrategia de mantenimiento, para lo cual la Gerencia de Transmisión Carabobo de CORPOELEC, aplica

diferentes estrategias de mantenimiento preventivo, sin embargo como punto de partida para lograr determinar esta adecuada estrategia de mantenimiento es conveniente la contribución de estudios actualizados, como lo es el Análisis RAM, por sus siglas en inglés (reliability, availability and maintainability) o Análisis CDM (confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad).

Este Análisis RAM se encuentra sustentado en diferentes estándares y normas que soportan su metodología, entre los cuales se tienen los estándares internacionales de la Comisión Electrotécnica Internacional, por sus siglas en inglés IEC (International Electrotechnical Comisión), con los estándares, IEC61078: Técnicas de análisis de confiabilidad - Método de diagrama de bloques de confiabilidad y el IEC61025: Análisis de árbol de fallas, entre otros.

Para determinar los parámetros del Análisis RAM se encuentran diversas funciones matemáticas, entre ellas destaca la distribución Exponencial, debido a que considera la probabilidad de que el elemento falle en un determinado tiempo, sin depender del tiempo que lleve funcionando, considerándose adecuada para modelar el intervalo funcional del ciclo de vida de la subestación y sus equipos. De igual manera, se incluirá en el análisis, la distribución de Weibull, por ser flexible a la hora de crear modelos de varios tipos de comportamiento de riesgo, además, puede describir bastante bien muchas situaciones reales.

De manera tal, que se plantea el “Análisis RAM de la subestación eléctrica Guacara I, 115kv/34.5-13.8 Kv, usando distribución Exponencial y de Weibull”, buscando pronosticar en el tiempo el comportamiento de los equipos y de la subestación en general.

Objetivo de la Investigación.

Objetivo General.

Realizar el Análisis RAM de la subestación eléctrica Guacara I, 115Kv/34.5-13.8 Kv, usando distribución Exponencial y de Weibull.

Objetivos Específicos.

- Recolectar los datos de falla de la subestación Guacara I, en el periodo desde noviembre de 2012 hasta octubre de 2018.
- Revisar los datos de falla recolectados.
- Determinar los parámetros y elementos del Análisis RAM.
- Analizar los resultados obtenidos.

Justificación. Los planes de mantenimiento de los equipos aplicados al SEN, y entre ellos, los de las subestaciones eléctricas de transmisión, se han visto afectados por la falta de algunos reactivos e insumos, viéndose en muchos casos reducidas las pruebas que se le hacen a estos equipos, pruebas que apuntan al establecimiento de actividades propias del mantenimiento predictivo y preventivo, generando un mayor riesgo de uso a mediano y largo plazo, comprometiendo su buen desempeño y vida útil.

De igual manera, las condiciones de operación, debido al aumento abrupto de la demanda eléctrica en años anteriores, han ocasionado que se les saque el máximo provecho a algunos transformadores de potencia, que, en muchos casos, funcionan a los máximos regímenes posibles y en ocasiones por encima del nominal; es decir sobrecargados, lo cual ha generado en la subestación Guacara I, quema de un equipo transformador, con la consecuente sustitución, originando una gran pérdida económica a la empresa. Por otro lado, la contingencia

vivida con el fenómeno del niño en años pasados, originó numerosos cierres y aperturas de los disyuntores en la subestación, disminuyendo así la vida útil de estos equipos.

De acuerdo a la Norma Venezolana para evaluar los sistemas de mantenimiento en la industria, la Norma 2500-93, de la Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN) (1993), que dice: “La organización tiene establecido por objetivo lograr efectividad del sistema asegurando la disponibilidad de objetos de mantenimiento mediante estudio de confiabilidad y mantenibilidad” (p.70), sumado a la manera de trabajo en la que han estado sometidos los equipos de la subestación Guacara I, como lo es la falta de reactivos, transformadores en operación de sobrecarga, número creciente de apertura y cierres sufrido por disyuntores, situaciones que tienden a envejecer prematuramente los equipos y elementos de la subestación.

De acuerdo a las situaciones precedentes y a la necesidad de dar respuesta a preguntas, tales como; ¿Qué trabajos faltan por hacer?, ¿Dónde es más importante comenzar a trabajar? y ¿Dónde enfocar las acciones?, entre muchas otras preguntas, se hace necesario de una gestión de mantenimiento preventivo óptimo, siendo el Análisis RAM una alternativa conveniente para establecer planes de mantenimiento preventivo y predictivo. Representando, este Análisis RAM, una actividad que hoy en día es utilizada por las empresas para mantener sus equipos en óptimas condiciones, teniendo en cuenta los índices de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad para desempeñar su función.

Igualmente, este trabajo pretende contribuir al Análisis RAM en los sistemas eléctricos de potencia en la Universidad de Carabobo, donde se han efectuado algunos estudios de confiabilidad a sistemas eléctricos de potencia.

Este estudio favorecerá a que la Universidad de Carabobo, una vez más, se enrumbe hacia el uso de esta tecnología en el área de la investigación, generando nuevos conocimientos

que permitan proporcionar soluciones a las necesidades técnicas en las industrias del estado Carabobo.

Delimitación y Alcance. El estudio se enfoca en la subestación eléctrica Guacara I, perteneciente a la Gerencia de Transmisión Carabobo, de la empresa CORPOELEC, ubicada en el municipio Guacara, del estado Carabobo.

El historial de fallas a utilizar proviene de la empresa CORPOELEC, específicamente del Despacho de Carga de la Región Central, quien maneja el Sistema de Administración de Operaciones (SAO), sistema que registra los eventos del SEN para el proceso de transmisión, disponiendo de un historial de fallas para un periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018. Tomando las fallas debidas solo a causas imputables a los elementos y equipos de la propia subestación, sin tomar en cuenta las fallas ocasionadas por las líneas de alimentación, ni las fallas a consecuencia de la salida de otras subestaciones. Tampoco se toma en cuenta para el estudio, los tiempos utilizados en mantenimiento preventivo.

En el Análisis RAM, específicamente a la hora de determinar la confiabilidad se utilizará la distribución Exponencial y la distribución de Weibull. De igual manera, se estudiará la mantenibilidad y la disponibilidad de la subestación, como también su diagrama de bloques, utilizándose para el estudio solo los parámetros de falla, como son disponibilidad, mantenibilidad y confiabilidad obtenidos a partir de los datos del mencionado histórico de fallas.

Limitaciones. En cuanto al historial de fallas, se encontraron, en algunos casos falta de información, en cuanto a las causas de fallas, evidenciándose falta de investigación de algunas de ellas, así como boletas cerradas a destiempo. Se presento dificultad para visitar la subestación por la falta de operador y por la inseguridad que presenta la misma.

En esta investigación se dispuso de ventajas en cuanto a la ubicación geográfica, ya que la subestación Guacara I está ubicada en el estado Carabobo, por lo que la ubicación no representa una limitación para este trabajo de maestría.

Capítulo II

Marco Teórico

Antecedentes de la Investigación. Dentro de la ingeniería de mantenimiento, surge la técnica de confiabilidad, aplicada al final de la década de los años cuarenta (1941-1950) después de la Segunda Guerra Mundial; luego en los años cincuenta se inicia la era espacial con satélites, sondas y vehículos tripulados, promoviendo la implementación de la metodología de confiabilidad para componentes y sistemas, después, a principios de la década de los setenta, con la crisis petrolera que generó un cambio en la economía mundial y marcó la apertura del liderazgo japonés en la calidad y la confiabilidad de productos y servicios. Posteriormente, surge el Análisis RAM, combinando técnicas de la ingeniería de confiabilidad para equipos y sistemas, pronosticando la mayor cantidad de escenarios de fallas del proceso de producción, modelando las incertidumbres de los procesos de deterioro y fallas que sufrirán los elementos del sistema.

Para la realización de este trabajo se consultaron investigaciones realizadas en el ámbito de aplicaciones del Análisis RAM en sistemas industriales, la confiabilidad de sistemas, como a diferentes elementos del sistema eléctrico de potencia y en algunos casos, de manera más específica, a las subestaciones eléctricas, interruptores y transformadores.

Martínez, P., en la Universidad de Sevilla, en España, durante el 2013, realizó la tesis doctoral denominada “Mejoras en el cálculo del índice de fiabilidad en redes malladas de distribución de energía eléctrica”, donde desarrollo una metodología y una herramienta específica para los análisis de contingencias y de fiabilidad de dichas redes, donde presenta información sobre los índices de fiabilidad para diversas configuraciones de subestaciones.

Durante el 2016, en la Universidad de Pamplona, el Ingeniero Salamanca, J. y los Magister, Velazco, J. y Acevedo, E., realizaron el “Análisis de criticidad y arboles de diagnóstico de fallas para transformadores de potencia”, lo cual resulta un aporte para el desarrollo del árbol de falla del transformador de potencia de este trabajo.

El “Análisis de fiabilidad (confiabilidad) aplicado a interruptores de potencia en subestaciones eléctricas” fue estudiado por el Dr. Brian González y el Dr. José Galaviz, ambos de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, en México, para el 2016, donde utilizan el modelo grafico de Weibull para establecer la confiabilidad, la vida media y la desviación típica de los fallos de un grupo de interruptores de potencia utilizados en la compañía de suministro eléctrico en Apizaco, Tlaxcala, México.

En el área de confiabilidad de sistemas, para el año 2010, Juana Veloz, trabajó en el “Establecimiento de estrategias de mantenimiento centrado en confiabilidad, para a un llenadero de combustibles, utilizando distribución de Weibull y la distribución Log Normal, encontrando, entre otras, confiabilidad y mantenibilidad. Este trabajo fue presentado ante la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional (UNEFA), para optar al título de magister.

En el trabajo: “Mantenimiento centrado en Confiabilidad en subestaciones del sistema nacional de transmisión”, de Quito, Perú, realizado por Echeverria, F y Preciado, E., en el 2008, en la Escuela Politécnica Nacional, realizo aportes para la elaboración de los AMEF del transformador de potencia y el disyuntor.

En 2017, el Ing. Ely Flores, para optar al título de especialista en confiabilidad de sistemas industriales, en la Universidad Simón Bolívar desarrollo la “Aplicación y sistematización de un Análisis RAM en un sistema productivo del tipo manufacturero”, donde

presenta un modelo esquematizado (paso a paso) de las metodologías CDM (RAM), permitiendo la introducción de esta herramienta de la ingeniería en Confiabilidad en el sistema productivo de una empresa de manufactura, desarrollando una ruta a seguir por la organización para que sea posible administrar los recursos y además propiciar la implementación de la mejora continua de la misma.

Base Teórica.

Teoría de Fallas. A continuación, diversas definiciones referentes a fallas:

Falla. “Es un evento no previsible, inherente a los sistemas productivos que impide que estos cumplan su función bajo condiciones establecidas o que no la cumplan” (COVENIN 3049-93, p. 4).

Tasa de falla (λ). “La densidad de probabilidad de ocurrencia de un mal funcionamiento en el instante t , de un dispositivo que ha sobrevivido hasta el momento t ” (Pieruschka E., 1963, p. 63). También se puede definir, como la cantidad media de fallas de un componente por unidad de tiempo de exposición.

Historial de fallas. “Es la recopilación de la información requerida a las averías sucedidas a cada objeto de mantenimiento y obtenida de los registros de las diferentes órdenes de trabajo ejecutadas al objeto en estudio”. (COVENIN 3049-93, p. 4).

Modo de falla. Es la forma en la cual se manifiesta la falla, es decir, son todas aquellas posibles causas que se encuentran en un activo, por lo cual puede llegar a un estado de falla.

Falla funcional. Es la incapacidad de un elemento de un equipo para satisfacer un esquema de operación deseado. Las fallas funcionales pueden intervenir en forma parcial en una función, cuando el equipo funciona de manera ineficiente, y de forma total, cuando el equipo pierde su capacidad de operación. En la figura 1, se puede visualizar la manifestación y

causas de fallas en los equipos electromecánicos, como los presentes en las subestaciones eléctricas.

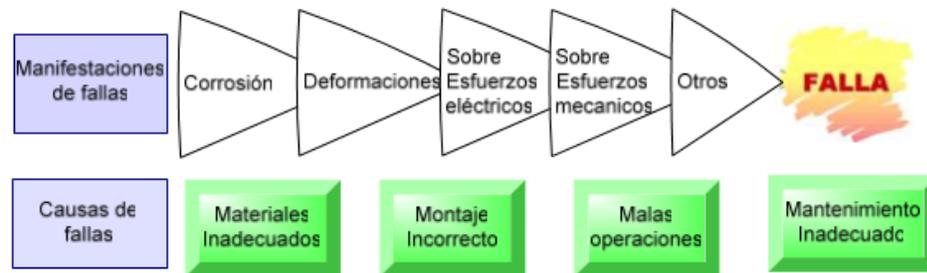
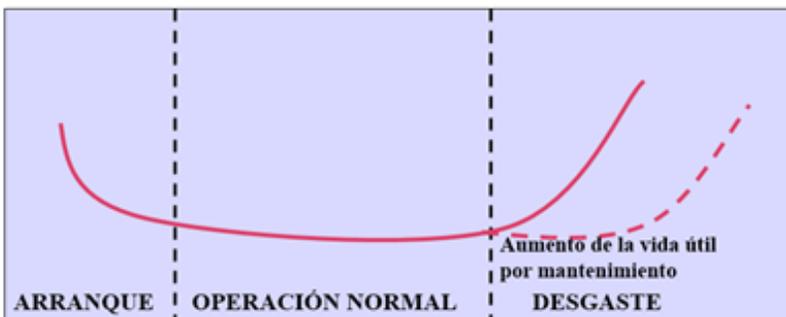


Figura 1. Manifestación y causas de fallas en los equipos electromecánicos. Fuente: Echeverría, F. y Preciado, E. (2008).

Curva de la Bañera. La vida útil de un producto, también se puede representar por la curva de la Bañera (ver figura 2), la cual se define desde la tasa de fallas, constituyendo la base conceptual para gran parte del estudio de confiabilidad.

La curva de la Bañera tiene las siguientes consideraciones:

- Arranque o mortalidad infantil, la cual representa las fallas debidas a problemas de diseño o ensamble, después que la maquina salió de la fábrica, con tasa de falla decreciente respecto al tiempo. Una vez se revisa el diseño o se ajusta el componente empieza su vida útil.
- Operación normal o la zona de vida útil, es la zona que representa una tasa de fallas con el valor más bajo de todo el desempeño y constante respecto al tiempo, con un aumento muy lento durante muchos años de servicio. Las fallas ocurren en forma completamente aleatoria.
- Desgaste o envejecimiento representa la zona de tasa de falla creciente cuando el componente está llegando al fin de su vida útil.



Periodo	Arranque	Operación Normal	Desgaste
Causa de la Falla	Diseño Montaje Errores de Fabrica	Mala operación Accidentes	Uso continuo Esfuerzo Fatiga
Acciones	Verificación y Pruebas de montaje	Operación con las especificaciones	Mejoras Inspecciones
	Mantenimiento Preventivo		

Figura2. Curva de la Bañera con el ciclo de vida de un producto. Fuente: Albornoz, E. (2008).

Mantenimiento. “Es el conjunto de acciones que permite conservar o restablecer un sistema productivo a un estado específico, para que pueda cumplir un servicio determinado” (COVENIN 3049-93, p.70). Siendo un conjunto de técnicas destinadas a conservar equipos e instalaciones industriales en servicio, durante el mayor tiempo posible, buscando la más alta disponibilidad con el máximo rendimiento.

Parámetros utilizados en mantenimiento. Los parámetros o indicadores de mantenimiento pueden ser:

Tiempo para reparar (TPR). Es el tiempo de intervención correctiva para un sistema, equipo o elemento, después del cual queda operativo.

Tiempo promedio para reparar (TPPR). Relaciona el tiempo total de intervención correctiva en un conjunto de ítems en falla con el número total de fallas detectadas en esos ítems, durante el intervalo de estudio. Lo ideal para este indicador es que sea lo más bajo posible.

Definiéndose matemáticamente como:

$$TPPR = \frac{\sum_1^n TPR(i)}{n}$$

Donde:

TPR= tiempo para reparar

n= número de fallas

Tiempo para fallar (TPF). Muestra el tiempo que pasa entre la finalización de una falla y el comienzo de la siguiente falla, para un sistema, equipo o elemento.

Tiempo promedio para fallar (TPPF). “Es el tiempo medio de exposición entre fallas consecutivas de un componente y puede estimarse dividiendo el tiempo de exposición por el número de fallas en ese período, siempre que se haya producido un número suficiente de fallas en ese período”. (Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) Std 493-1997, p.5).

Siendo su expresión matemática como sigue:

$$TPPF = \frac{\sum_1^{n-1} TPF(i)}{n - 1}$$

Donde:

TPF= tiempo para fallar

n= número de fallas

Tiempo entre fallas (TEF). Es el tiempo entre el comienzo de una falla y el comienzo de otra falla, para un sistema, equipo o elemento.

Tiempo promedio entre fallas (TPEF). Es la relación entre el tiempo total de los eventos de comienzo de una falla y aparición de otra falla, entre el número total de fallas detectadas.

Siendo su expresión como sigue:

$$TPEF = \frac{\sum_1^{n-1} TEF(i)}{n - 1}$$

Donde:

TEF= tiempo entre fallas

n= número de fallas

Diagrama de Pareto.

El diagrama de Pareto, es una herramienta que permite identificar visualmente en un gráfico, las causas o las categorías, a las que es importante prestar atención en la solución de un problema y de esta manera llevar a cabo acciones de mejora sin malgastar esfuerzos en las causas que poco inciden en el problema o en los costos asociados. Esta herramienta constituye un sencillo método gráfico de análisis, que permite discriminar entre las causas más importantes de un problema, como son las causas “pocas y vitales”, de las causas “muchas y triviales”. También es conocido como la Regla del 80/20, el cual establece que, aunque un efecto es producido por varias causas, una parte importante del efecto como el 80% habitualmente es explicado por unas pocas causas como lo es el 20%. (Salazar, 2018, p. 25).

En otras palabras, el Pareto permite la jerarquización de equipos del sistema de acuerdo a sus fallas, que permite priorizar las actividades del mantenimiento, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde es más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad basada en la realidad actual.

Mantenibilidad. “La mantenibilidad es la característica inherente de un elemento, asociada a su capacidad de ser recuperado para el servicio cuando se realiza la tarea de mantenimiento necesaria” (Knezevic, 1996, p. 47).

Basados en el concepto y ampliando el concepto de mantenibilidad, se puede decir que la mantenibilidad está inversamente relacionada con la duración y el esfuerzo requerido por las actividades de mantenimiento. Puede ser asociada de manera inversa con el tiempo que se toma

en lograr acometer las acciones de mantenimiento, en relación con la obtención del comportamiento deseable del sistema. Esto incluye la duración (horas) o el esfuerzo (horas-hombre) invertidos en desarrollar todas las acciones necesarias para mantener el sistema o uno de sus componentes para restablecerlo o conservarlo en una condición específica.

Expresión para el cálculo de mantenibilidad:

$$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$$

Donde:

M (t)= mantenibilidad del sistema o equipo en el tiempo

μ = tasa de reparación = 1/TPPR

Disponibilidad. De acuerdo a Knezevic (1996) “La disponibilidad es una característica que resume cuantitativamente el perfil de funcionabilidad de un elemento” (p. 27). Es la probabilidad que un sistema, subsistema o equipo esté disponible para su uso durante un tiempo dado.

El sistema no debe haber tenido fallas, o bien en caso de haberlas tenido, debe haber sido reparado en un tiempo menor que el máximo permitido para su mantenimiento.

Se define la disponibilidad de acuerdo a la distribución Exponencial a partir de los términos, tiempo promedio para reparar (TPPR) y el tiempo promedio para fallar (TPPF), siendo la disponibilidad instantánea para un sistema descrita por la siguiente expresión:

$$D(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}$$

Donde:

D (t)= disponibilidad del sistema o equipo en el tiempo

μ = tasa de reparaciones=1/TPPR

λ = tasa de fallas=1/TPPF

$t = \text{TPF}$

Confiabilidad. Una definición probabilística común de confiabilidad, según Meeker y Escobar (citado en Escobar, Villa y Yáñez, 2006), es la siguiente: “Confiabilidad es la probabilidad de que una unidad realice su función hasta un tiempo especificado bajo las condiciones de uso encontradas” (p. 6). Es importante que esta probabilidad sea evaluada a las condiciones ambientales o de funcionamiento real de los equipos, en lugar de las condiciones de trabajo para las que el producto fue diseñado.

En consecuencia, la confiabilidad es calidad a través del tiempo, por lo tanto, un producto confiable debe permanecer dentro de sus límites de especificación durante su vida tecnológica. Por lo que, buena calidad es necesaria pero no suficiente para garantizar buena confiabilidad. Presentándose otro aspecto importante, la confiabilidad de un producto se puede evaluar directamente solo después de que ha estado en servicio por algún tiempo, por lo tanto, la evaluación y pronóstico de la confiabilidad presenta varios retos técnicos.

Un estudio de confiabilidad está fundamentado en un análisis de fallas de un equipo o componente. Este análisis es el paso decisivo en el estudio económico de un plan de mantenimiento y este depende de la determinación y el conocimiento del índice de fallas de los equipos que participan en dicho plan. En un estudio de confiabilidad, los componentes de un producto o el sistema se analizan en un esfuerzo para predecir la frecuencia con la cual el producto o el sistema no fallarán.

Teoría de la Confiabilidad de Sistemas. En la teoría de confiabilidad se parte de la hipótesis de que el tiempo hasta que ocurre una falla en un equipo es una variable aleatoria, a la que llamaremos “ τ ”, que puede tomar cualquier valor real “ t ”, desde 0 a ∞ . Si $F(t)$ es la función de distribución y $f(t)$ la función de densidad de τ , se tiene:

$$F(t) = P(\tau \leq t) = \int_0^t f(x) dx$$

$$F(0) = 0 \quad F(\infty) = 1$$

$F(t)$ es la probabilidad de que el equipo falle antes del instante t , es decir que $\tau \leq t$, a $f(t)$ también se le denomina función de in fiabilidad, también denotada por $Q(t)$.

Distribución Exponencial. La distribución Exponencial es ampliamente usada en el análisis de confiabilidad, como distribución de la variable aleatoria “tiempo para fallar” de equipos o sistemas. Genéricamente describe la cantidad de tiempo que transcurre entre eventos, tal como el tiempo para fallar de los equipos. Se caracteriza porque la tasa de fallas es constante, no presenta mortalidad infantil y no han aparecido todavía desgastes, representa la forma normal de operación del equipo.

Al ser un modelo adecuado para estas situaciones tiene una gran utilidad en los siguientes casos:

- Distribución del tiempo de espera entre sucesos de un proceso de Poisson.
- Distribución del tiempo que transcurre hasta que se produce una falla, si se cumple la condición de que la probabilidad de producirse una falla en un instante no depende del tiempo transcurrido.
- Aplicaciones en confiabilidad y teoría de la supervivencia.

Función de densidad de probabilidad de acuerdo a la distribución Exponencial. La función de densidad $f(t)$ es continua si cumple para $f(t) \geq 0$, el área bajo la curva es igual a 1, en confiabilidad el intervalo es de cero a infinito, o sea:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = 1$$

Para el caso de la distribución Exponencial, se tiene que:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad t \geq 0$$

Función de distribución acumulada de acuerdo a la distribución Exponencial. Esta función se define como la integral de la función de densidad desde cero hasta el tiempo t y representa la probabilidad de fallar antes del tiempo t , como sigue:

($P(t) \leq t$), es decir:

$$P(T \leq t) = F(t) = \int_0^t f(x) dx = 1$$

Para el caso de la distribución Exponencial se tiene:

$$P(T \leq t) = F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} dx = -e^{-\lambda x} \Big|_0^t = 1 - e^{-\lambda t}, \quad t \geq 0$$

Calculo de la tasa de fallas (λ) de acuerdo a la distribución Exponencial. La tasa de fallas se define a partir del (TPPF), siendo:

$$\lambda = \frac{1}{TPPF}$$

Donde:

TPPF= tiempo promedio para fallar

Confiabilidad de acuerdo a la distribución Exponencial. Es una función decreciente denominada también función de supervivencia, es la probabilidad de sobrevivir hasta el tiempo t y se representa como:

$$R(t) = 1 - F(t)$$

El parámetro de la distribución Exponencial es la tasa de fallas (λ), la cual define la confiabilidad ($R(t)$) como se puede apreciar a continuación:

$$R(t) = e^{-(\lambda t)}$$

Donde:

$R(t)$ = confiabilidad

λ = tasa de fallas

t = TPF

Siendo el comportamiento de $R(t)$, como sigue:

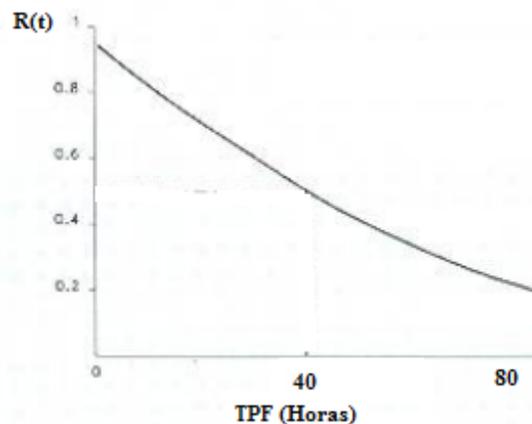


Figura 3. Confiabilidad de acuerdo a la distribución Exponencial. Fuente: Tamborero, J. 1999

Infiabilidad de acuerdo a la distribución Exponencial. Es la función distribución acumulativa $f(t)$ la cual representa el complemento de la función confiabilidad y se define según la distribución Exponencial de la siguiente manera:

$$Q(t) = 1 - e^{-(\lambda \cdot t)}$$

Donde:

$Q(t)$ = infiabilidad

λ = tasa de fallas

t = TPF

Distribución de Weibull.

La distribución de Weibull, es muy útil para solucionar diferentes tareas de mantenimiento, ya que describe las fallas durante cualquier periodo en la vida de un equipo, es decir, el número de ocurrencia de eventos por unidad de tiempo no

permanece necesariamente constante, la tasa de ocurrencia de eventos puede crecer o decrecer con el tiempo. Es la distribución más útil y flexible definida por los parámetros; forma (β) y escala (α), (Nava, 2012, p. 28).

Confiabilidad de acuerdo a la distribución de Weibull. La confiabilidad de tres parámetros de Weibull, como sigue:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Donde:

γ = parámetro de localización.

η = parámetro de escala.

β = parámetro de forma o pendiente.

$t = \text{TPF}$

Se muestra en la figura 4, el efecto que tiene el valor del parámetro de forma o pendiente

β .

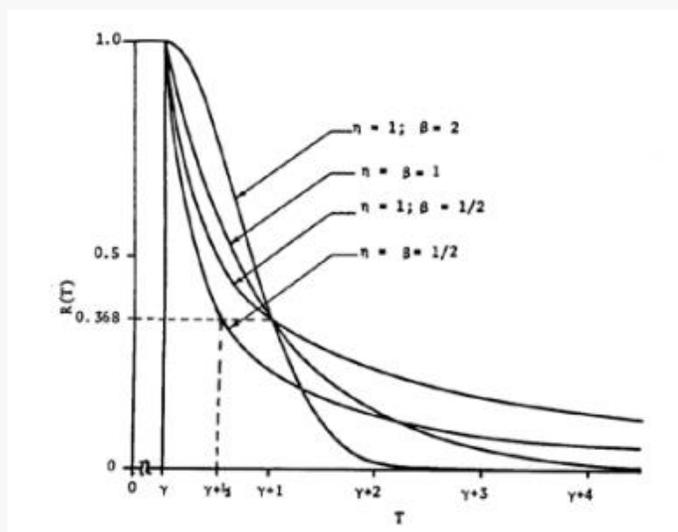


Figura 4. Confiabilidad aplicando distribución de Weibull, para diferentes valores de β . Fuente: Hernández E., Pérez F., Rojano A., Salazar R (2011).

Infiabilidad de acuerdo a la distribución de Weibull. Esta dada como el complemento de la función confiabilidad, siendo de la siguiente manera:

$$Q(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$$

Donde:

Q (t) = infiabilidad

γ = parámetro de localización.

η = parámetro de escala.

β = parámetro de forma o pendiente.

t =TPF

Sistemas Reparables. De acuerdo a Yáñez y otros (2004): “se define un sistema reparable como aquel que acepta reparaciones y sus funciones pueden ser restauradas por cualquier método de reparación, sin tener que reemplazar todo el sistema”. (p. 25).

Otras salidas que afectan a un sistema o componente reparable. La disponibilidad de los componentes reparables se ve afectada por los siguientes tipos de salidas:

- Otras salidas no planeadas: vandalismo, accidentes, fenómenos atmosféricos, temblores. Siendo de naturaleza aleatoria en cuanto a su ocurrencia y duración.
- Salidas planeadas, mantenimiento preventivo o programado, inspección, toma de medidas. Son determinísticas en cuanto a su ocurrencia, pero aleatorias en cuanto a su duración. Una característica muy importante de las salidas planeadas es que pueden posponerse si no afectan severamente la seguridad o desempeño del sistema.

Diagramas de Bloques de Confiabilidad (DBC).

Un diagrama de bloques de confiabilidad (DBC o RBD) es una representación gráfica del funcionamiento exitoso de un sistema. Muestra la conexión lógica de los

componentes (en funcionamiento, representados por bloques) necesarios para el funcionamiento exitoso del sistema (en lo sucesivo denominado "éxito del sistema"). Por lo tanto, un DBC es equivalente a una ecuación lógica de variables booleanas y los cálculos probabilísticos se relacionan principalmente con los valores constantes de las probabilidades de éxito/fracaso del bloque. Se encuentran disponibles muchos métodos analíticos diferentes de análisis de confiabilidad, de los cuales el DBC es uno. (Estándar Internacional, IEC 61078, 2016, p. 3).

Sistema en Serie. Gómez de la Vega (como se citó en Flores E., 2017, p. 32) “Desde el punto de vista de confiabilidad, un sistema en serie es definido como aquel sistema en donde todos sus componentes deben operar para que el sistema en su totalidad opere”, como se muestra en la figura 5.

La confiabilidad de un sistema de componentes conectados en serie se puede mejorar de las siguientes maneras:

- Reduciendo el número de componentes
- Aumentando la confiabilidad individual de cada componente. Esto equivale a mejorar la calidad de los componentes, lo cual implica un aumento en los costos.

La confiabilidad para este tipo de sistema en serie viene dada por la ecuación mostrada a continuación donde R_{sist} representa la confiabilidad del sistema, la cual, depende de la confiabilidad de los distintos elementos que componen el sistema bajo estudio.

$$R_{sist} = \prod_1^n R_i(t)$$

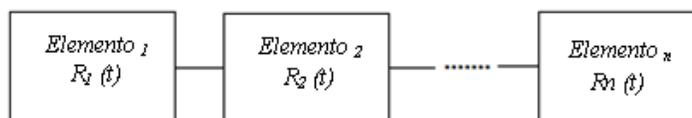


Figura 5. Diagrama de bloque de sistema en serie. Fuente: Flores E., 2017

Sistema en Paralelo. Desde el punto de vista de confiabilidad, un sistema en paralelo como se muestra en la figura 6, es definido como aquel sistema en donde todos sus componentes deben fallar para que el sistema en su totalidad no opere. La confiabilidad para este tipo de sistema en paralelo viene dada por la ecuación mostrada a continuación donde “ R_{sist} ” representa la confiabilidad del sistema, la cual, depende de la confiabilidad de los distintos elementos que componen el sistema bajo estudio.

$$R_{sist} = 1 - \prod_1^n (1 - R_i(t))$$

Se puede concluir que la confiabilidad de un sistema conformado por componentes conectados en paralelo se aumenta conforme se aumenta el número de componentes, sin embargo, el aumentar el número de componentes redundantes tiene las siguientes desventajas:

- Se aumenta el costo del sistema, costo de inversión y operativo
- Se aumentan las dimensiones del sistema, aunque el aumento en peso y volumen puede afectar las prestaciones del sistema.

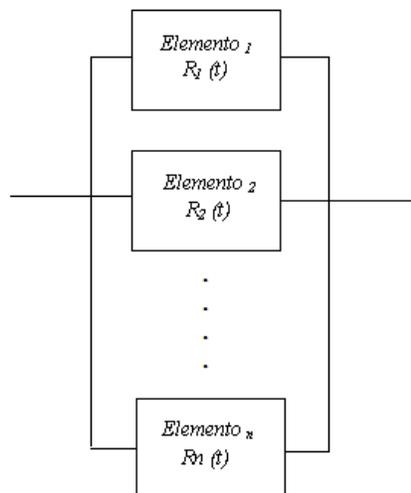


Figura 6. Diagrama de bloque de sistema en paralelo. Fuente: Flores E., 2017

Sistema Redundante. Se utilizan para aumentar la confiabilidad global del sistema, de esta forma se delinean sistemas duales, triples, etc., es decir elementos en reserva que se encuentran sin operación, estando a la espera de una falla en un elemento idéntico para comenzar a operar, con unidades idénticas o diferentes, ver figura 7. Se dice que el sistema trabaja “k” de “n” elementos, como puede observarse a continuación.

$$R_{sist} = \sum_{i=k}^n \binom{n}{i} [R(t)]^i [1 - R(t)]^{n-i}$$

Donde:

R_{sist} = confiabilidad del sistema.

N= número total de componentes en paralelo.

K= número mínimo de componentes requeridos.

R (t)= confiabilidad de cada componente en el tiempo “t”.

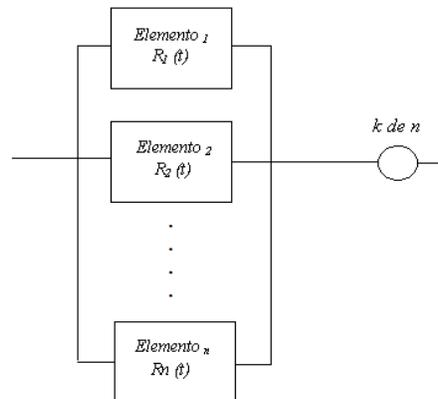


Figura 7. Diagrama de sistema redundantes. Fuente: Flores E., 2017

Análisis de Modos y Efectos de Falla. Representa una técnica de ingeniería conocida como AMEF (Failure mode and effect analysis, también conocida como FMEA) usada para definir, identificar y eliminar fallas conocidas o potenciales, así como problemas y errores, a partir del diseño, proceso u operación de un sistema, antes de que pueda afectar al usuario. El análisis puede darse de dos formas: uno utilizando datos históricos o modelos estadísticos,

matemáticos y herramientas de la ingeniería de la confiabilidad, con las cuales se puede identificar y definir las fallas.

Los modos de fallas son los causantes de la pérdida de una función, su presencia origina ineficiencia en la capacidad de trabajo en equipo. Esto permite entender ¿qué es lo que se está tratando de prevenir? Encontrando la raíz de problema y no mal gastando el tiempo en tratar el síntoma.

Árbol de Falla. La técnica del árbol de fallas, FTA, surgió en 1962 con su primera aplicación a la verificación de la fiabilidad de diseño del cohete Minuteman. Posteriormente aplicada en el campo nuclear y más tarde, en el campo químico. Es una herramienta deductiva de análisis, excelente para identificar, prevenir y determinar la actividad para corregir fallas, ver figura 8. Pueden usarse para prevenir o identificar fallas antes de que ocurran, pero se usan con más frecuencia para analizar accidentes o como herramientas investigativas para señalar fallas.

Al ocurrir un accidente o una falla, se puede identificar la causa raíz del evento negativo. Esta herramienta parte de la previa selección de un "suceso no deseado o evento que se pretende evitar", sea éste un accidente de gran magnitud (explosión, fuga, derrame, etc.) o sea un suceso de menor importancia (fallo de un sistema de cierre, etc.) para averiguar en ambos casos los orígenes de los mismos.

Se usan símbolos para representar varios eventos y para describir relaciones, como son:

- Compuerta AND: la cual representa una condición en la cual todos los eventos mostrados debajo de la compuerta (compuerta de entrada) tienen que estar presentes para que ocurra el evento arriba de la compuerta (evento de resultado).

Compuerta OR: representa una situación en la cual cualquiera de los eventos mostrados debajo de la compuerta (compuerta de entrada) llevarán al evento mostrado arriba de la compuerta (evento resultado)

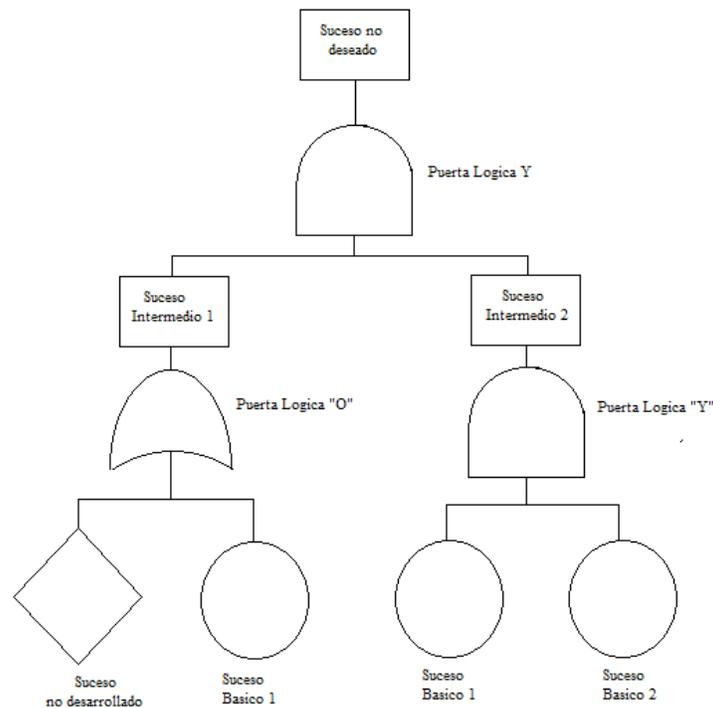


Figura 8. Representación gráfica del árbol de fallas. Fuente: Ardanuy, T. y Cejalvo A. (1998).

- Compuerta OR: representa una situación en la cual cualquiera de los eventos mostrados debajo de la compuerta (compuerta de entrada) llevarán al evento mostrado arriba de la compuerta (evento resultado)
- Rectángulo: es el principal componente básico del árbol analítico, representa el evento negativo y se localiza en el punto superior del árbol, además puede localizarse por todo el árbol para indicar otros eventos que pueden dividirse. Este es el único símbolo que tendrá abajo una compuerta de lógica y eventos de entrada.

- Círculo: representa un evento base en el árbol, encontrándose en los niveles inferiores del árbol y no requieren más desarrollo o divisiones. No hay compuertas o eventos debajo del evento base.
- Diamante: identifica un evento terminal sin desarrollar. Tal evento es uno no completamente desarrollado debido a una falta de información o significancia.
- Óvalo: representa una situación especial que puede ocurrir solamente si ocurren ciertas circunstancias. Esto se explica adentro del símbolo del ovalo.
- Triángulo: significa una transferencia de una rama del árbol de fallas a otro lugar del árbol.

Seguidamente, de manera sistemática y lógica se representan las combinaciones de las situaciones que pueden dar lugar a la producción del "evento a evitar", conformando niveles sucesivos, de tal manera que cada suceso esté generado a partir de sucesos del nivel inferior, siendo el nexo de unión entre niveles la existencia de "operadores o puertas lógicas". El árbol se desarrolla en sus distintas ramas hasta alcanzar una serie de "sucesos básicos", denominados así porque no precisan de otros anteriores a ellos para ser explicados. También alguna rama puede terminar por alcanzar un "suceso no desarrollado" en otros, sea por falta de información o por la poca utilidad de analizar las causas que lo producen. Los nudos de las diferentes puertas y los "sucesos básicos o no desarrollados" deben estar claramente identificados.

Análisis RAM.

El análisis de confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad conocido como Análisis CDM o Análisis RAM, por sus siglas en inglés (Reliability, availability, maintainability), es una de las metodologías de confiabilidad utilizadas desde hace varios años, que permite predecir el comportamiento del factor de servicio de un sistema

productivo, con base al comportamiento de fallas y reparaciones de sus equipos y componentes, configuración de sus componentes, filosofía operacional y flexibilidades que pueden afectar la disponibilidad del mismo. (Romero y otros, 2014, p. 1).

Representa una técnica de mantenimiento Clase Mundial, que tiene como fuente primordial de información los tiempos promedios para fallar (TPPF) y tiempos promedios para reparar (TPPR) de los diversos componentes que afectan la disponibilidad de producción del sistema, los cuales deben ser adecuadamente “construidos” de acuerdo a las fuentes de información disponibles.

Según De Piño, como se citó en Caña, 2006: mantenimiento Clase Mundial es un conjunto de prácticas que reúne elementos de distintos enfoques en el área de mantenimiento, para crear un todo armónico de alto valor práctico, las cuales aplicadas en forma coherente generan sustanciales ahorros en la gestión del mantenimiento” (p.29).

De acuerdo a Caña, A. (2006):

El Análisis RAM determina el tiempo probable en el cual el sistema este en capacidad de cumplir su misión (disponibilidad), la probabilidad que un sistema sea reparado y llevado a condiciones normales de operación dentro de un tiempo dado (mantenibilidad) y la probabilidad que el sistema este en capacidad de cumplir su misión dentro de un tiempo determinado y bajo ciertas condiciones de trabajo (confiabilidad). En otras palabras, se pronostica el comportamiento de los equipos y del sistema en el tiempo.

Los objetivos del Análisis RAM. Los objetivos del Análisis RAM son:

Optimizar la productividad:

- Pronosticar la mayor cantidad de escenarios de fallas del proceso de producción, modelando las incertidumbres de los procesos de deterioro y fallas que sufrirán los elementos del sistema, subsistemas y equipos.
- Hallar las implicaciones de cada escenario probable, considerando la disposición del sistema, la confiabilidad de los elementos del sistema, políticas de mantenimiento y filosofía operacional, para así lograr mejorar las estrategias de mantenimiento.
- Establecer frecuencias de mantenimiento óptimas.
- Contribuir con la producción de estrategias de operación y mantenimiento que funcionen bajo un marco de confiabilidad y manejo del riesgo preestablecidos.
- Identificar áreas en las que se pueden aplicar cambios a equipos, procedimientos, operaciones, etc. para disminuir la probabilidad de pérdida de producción.
- Identificar los “cuellos de botella” del sistema.
- Determinar el impacto de los inventarios y los servicios en la producción.
- Detectar fallas de diseño y/o filosofía operacional.

Minimizar costos:

- Minimizar las pérdidas debido a fallas en la producción.
- Disminuir los excesos de atención a áreas que no son críticas.
- Permitir la optimización de los inventarios y de los recursos de mantenimiento.

De acuerdo a Reliability & Risk Management (R2M), existen estándares y normas que soportan la aplicación de esta metodología, entre los más importantes se tiene:

- DoD – Department of defense de los EEUU - Guide for achieving reliability, availability, and maintainability.

- DoD 3235.1-H - Department of defense de los EEUU- Test & evaluation of system reliability, availability and maintainability.
- IEC61078: Analysis techniques for dependability - Reliability block diagram method.
- IEC61025: Fault tree analysis.
- IEC61165: Application on Markov techniques (Reliability & Risk Management (R2M), (2017).

Etapas de un Análisis RAM. Según DEKRA Insight, las etapas del Análisis RAM son:

- Definición de los requerimientos de disponibilidad: inicialmente se define el porcentaje de tiempo durante el que el sistema debe operar correctamente.
- Identificación de los sistemas o equipos críticos: se seleccionan aquellos sistemas o equipos que tienen, o pueden tener, una importancia crítica sobre el desempeño del proceso.
- Recopilación de datos de confiabilidad y mantenibilidad: se investiga, en bases de datos o a través de expertos, información acerca de las tasas de falla, o se calculan con históricos de fallas, los tiempos promedio para fallas (TPPF) y los tiempos promedio para reparar (TPPR) del sistema o de los distintos equipos. También es necesario conocer la filosofía operacional y la política de mantenimiento e Inspección del establecimiento.
- Desarrollo de los diagramas de bloques de confiabilidad (DBC): se crean diagramas de bloques para cada sistema del proceso, que ilustran la funcionalidad de un Sistema de manera gráfica y simplificada.

- Desarrollo de árboles de falla: se definen árboles de falla para los distintos sistemas, con el fin de determinar las causas de las posibles fallas.
- Cálculo de indisponibilidad y jerarquización de equipos: se calcula el tiempo durante el cual se espera que el proceso se encuentre no disponible, y se jerarquizan los distintos equipos de acuerdo a su implicación en el proceso (DEKRA Insight, 2016).

Con respecto a lo anterior, se considera que la jerarquización de los equipos de acuerdo a su criticidad se realiza con el diagrama de Pareto, y otra consideración es que en el momento de desarrollar los árboles de falla se elabora previo los modos y efectos de falla (AMEF).

De acuerdo a R2M, el Análisis RAM se sustenta en un modelo que toma en cuenta los efectos de:

- La confiabilidad de los equipos.
- La configuración del sistema.
- Las fallas aleatorias y sus reparaciones (mantenimiento correctivo).
- Las pérdidas de producción y sus consecuencias
- La influencia del “error humano”.
- Las pérdidas de capacidad por degradación.
- En algunos casos, se toma en cuenta el tiempo fuera de servicio por mantenimiento preventivo, predictivo o programado.
- La disponibilidad de recursos humanos y materiales.
- La probabilidad de ocurrencia de eventos especiales no deseados (Reliability & Risk Management (R2M), (2017).

En el presente trabajo se toma en cuenta el tiempo dedicado al mantenimiento correctivo, no así, el tiempo dedicado a mantenimiento predictivo ni preventivo.

Los resultados obtenidos con el estudio RAM dependen en gran medida de la representatividad que se logre con el modelo desarrollado, el cual debe ser capaz de reproducir el comportamiento real del sistema dentro de su contexto operacional.

Subestaciones eléctricas. Una subestación es un nodo del sistema eléctrico de potencia, en el cual la energía es transformada en niveles correspondientes de voltaje y corriente que permitan su transporte, distribución y consumo. Está conformada por un conjunto de equipos y componentes que controlan el flujo de energía y garantizan la seguridad del sistema por medio de dispositivos automáticos de protección. En cuanto a la calidad de servicio eléctrico son imputables, en su mayor parte, a las subestaciones eléctricas, la continuidad del suministro, las variaciones de voltaje y los armónicos. Los elementos primarios de las subestaciones eléctricas son los transformadores de potencia, siguiéndole en importancia los disyuntores.

La confiabilidad de una subestación no depende solamente de sus componentes y configuración, sino también de la capacidad que tenga el sistema para soportar las contingencias. Hay otros aspectos que afectan la confiabilidad de una subestación, tales como la política de repuestos, la adecuada utilización del esquema de barras adoptado, el tiempo de respuesta del personal de operación para subsanar las salidas del sistema ya sea con maniobras de reconfiguración o por medio de reparaciones.

Puesto que los sistemas de potencia están definidos por procesos de estado discretos homogéneos y con continuidad en el tiempo, pueden ser descritos por medio de modelos de Márkov con los cuales es posible considerar eventos con una dependencia estadística compleja. Para sistemas de potencia, las condiciones de estado estables de los procesos son especialmente

importantes, ya que son una herramienta para la evaluación y planeación de la confiabilidad de los sistemas.

El esquema de barras de una subestación, es una parte muy importante del sistema de potencia, y puede tener una fuerte influencia sobre el comportamiento de todo el sistema. Tales esquemas de barras deben mostrar altos índices de confiabilidad, así como de efectividad-costo.

La confiabilidad requerida de una subestación juega un papel importante en la selección de configuración óptima. Normalmente, la disminución de costos con la configuración viene acompañada de una disminución del índice de confiabilidad de la misma; debe hacerse, por tanto, un balance entre los dos factores de acuerdo con la importancia que tenga la subestación dentro del sistema.

Transformadores de Potencia. Los transformadores de potencia son los equipos más importantes, más confiables, grandes, pesados, complejos y también más costosos dentro de una subestación eléctrica. Ellos cumplen con una función muy importante en los sistemas eléctricos de potencia, ya que transforman el voltaje y la corriente del sistema de un nivel a otro, debiendo ser capaces de transportar el flujo de potencia en forma continua hacia una parte particular del sistema o hacia la carga.

Los transformadores al ser máquinas eléctricas estáticas, no poseen partes móviles, por tal motivo no requieren maniobras de mantenimiento con tanta frecuencia como en otros tipos de máquinas eléctricas, lo que no quiere decir que tales maniobras no deban hacerse.

La confiabilidad de los transformadores de potencia depende del diseño adecuado, de un cuidadoso montaje, de un mantenimiento oportuno y de una provisión adecuada de elementos de protección.

Disyuntores de Potencia.

Es aquel dispositivo mecánico de interrupción capaz de unir, conducir e interrumpir corrientes bajo condiciones normales del circuito; también unir, conducir e interrumpir, para un tiempo específico y de interrupción, corrientes bajo condiciones específicas anormales del circuito, tal como un corto-circuito. Norma IEEE C37.100-1992 (p.5).

Capítulo III

Marco Metodológico

Diseño de la investigación. Ya precisado el planteamiento del problema y el alcance del trabajo investigativo, entre otros elementos, en el capítulo I, y con el fin de cubrir los objetivos fijados, se define el plan o estrategia para obtener la información deseada; es decir el diseño de la investigación, y partiendo de que este proceso investigativo es cuantitativo, se tiene que el diseño de la investigación es de Campo no experimental y transeccional.

Esta investigación se orienta hacia la descripción, predicción y explicación, con datos numéricos de eventos de fallas y análisis estadístico de los elementos y parámetros propios del Análisis RAM a través de las distribuciones Exponencial y de Weibull, además de realizar análisis causa efecto con la determinación de las AMEF de los elementos primarios de la subestación, como son los transformadores de potencia y los disyuntores, lo cual justifica el proceso investigativo cuantitativo.

El diseño de la investigación se considera no experimental puesto que en ella no se manipula deliberadamente ninguna variable; es decir no se varía en forma intencional las variables independientes para ver sus efectos sobre otras variables. En este trabajo no experimental se observan los eventos de fallas que ocurren en los elementos y equipos de la subestación Guacara I en su contexto natural, sin posibilidad de manipularlos; es decir no se tiene control directo sobre la creación de una falla ni de influir en su reparación, puesto que estos eventos ya sucedieron.

Tipo de investigación. El presente proyecto, sobre el Análisis RAM de la subestación Guacara I, fue realizado mediante una investigación de campo de tipo descriptivo, ya que involucra la descripción, análisis e interpretación de la una situación actual. En cuanto a la

profundidad del estudio, el diseño es multivariable de totalidad, ya que estudia la totalidad de rasgos o características posibles en una sola unidad de estudio o grupo de unidades de estudio para describirlo y analizarlo, estableciendo al conjunto de elementos y parámetros del Análisis RAM como un conjunto de variables que permitirá entender el problema.

Se analizaron sistemáticamente los parámetros de confiabilidad, disponibilidad y mantenibilidad, además del Pareto, modos y efectos de falla, diagrama de bloques y árbol de falla, con el objeto de describir el comportamiento de la subestación Guacara I, ajustándose a la definición de investigación de campo conocida como un estudio sistemático de problemas reales, con el propósito, de describirlos, interpretarlos, entender su naturaleza y factores constituyentes, explicar sus causas y efecto.

Población y muestra

En esta investigación, la población está dada por el conjunto de eventos de fallas sufridas por los elementos y equipos que conforman la subestación en estudio, lo cual representan el sistema.

La muestra es referencial debido a que la población es referencial; siendo la muestra representada por el histórico de fallas recolectado por la empresa CORPOELEC, por otro lado, la muestra seleccionada no requiere un proceso de muestreo, ya que de acuerdo con Hurtado (2000) "...el objetivo se centra en el estudio de casos típicos o representativos, por lo cual tampoco se justifica el muestreo..." (p. 154), entendiéndose que la muestra elegida define fielmente las características de la población.

Técnicas e instrumentos para la recolección de datos. Como se evidencia, la población, está constituida por los eventos de falla sufridas por los elementos y equipos de la subestación, los cuales por sí mismos no proporcionan la información requerida para realizar el análisis

deseado, por lo que se procesaron a través de un procedimiento matemático-estadístico, como son las distribuciones Exponencial y de Weibull, siendo necesario utilizar como instrumento de recolección de datos al historial de fallas de CORPOELEC, que maneja el SAO, sistema que registra los eventos del SEN para el proceso de transmisión.

Fases de la investigación

Como ya se sabe, el diseño de la investigación constituye el plan general (plan de trabajo a seguir) del investigador para obtener respuestas a las interrogantes o comprobar la hipótesis de investigación., por esto en este apartado se muestra esquemáticamente el modelo conceptual y operativo que permitirá cumplir los objetivos de la presente investigación.

El esquema se ha dividido en fases sustentadas en el modelo de Ary, D., Jacobs, L. y Razavieh, A. (1992). En la Tabla 1, se muestra de forma esquemática la guía estratégica por la cual se regirá el proceso de la investigación, observándose la relación directa entre los objetivos específicos y las fases de la investigación, estando el tercer objetivo específico conformado por ocho (08) fases.

Estando las fases de investigación diseñadas como una serie de etapas que llevan una secuencia lógica, para lograr alcanzar los objetivos específicos y finalmente el objetivo general.

Tomando en cuenta, que, para alcanzar en el objetivo específico, donde se terminan los parámetros y elementos del Análisis RAM, es necesario lograr las fases de investigación número 3,4,5,6,7,8,9 y 10. Siendo el objetivo que mas exige tiempo y dedicación, como se vera más adelante en el plan de trabajo.

Tabla 1 *Fases de la investigación y su relación con los objetivos específicos*. Fuente: la Autora, 2018.

Objetivo Específico de la Investigación	Fases de la Investigación	
Recolectar los datos de falla de la subestación Guacara I.	Fase 1	Documentación del problema: Historial de fallas de CORPOELEC
Revisar los datos de falla recolectados.	Fase 2	Revisión de datos de falla
	Fase 3	Determinación del diagrama de Pareto.
	Fase 4	Calculo de la confiabilidad de la subestación, y a los elementos o equipos fallados
	Fase 5	Calculo de la mantenibilidad de la subestación
	Fase 6	Calculo de disponibilidad de la subestación
	Fase 7	Curva de la Bañera de la subestación
	Fase 8	Elaboración del diagrama de bloques
Determinar los parámetros y elementos del Análisis RAM	Fase 9	Determinación de los modos y efectos de los transformadores y disyuntores
	Fase 10	Determinación el árbol de falla de los transformadores, disyuntores y de la subestación Guacara I.
	Fase 11	Estudio y análisis de los resultados obtenidos
Analizar los resultados obtenidos	Fase 11	Estudio y análisis de los resultados obtenidos

En el siguiente cuadro se detalla un plan de trabajo estimado para la elaboración de la investigación.

Tabla 2 *Plan de trabajo*. Fuente: la Autora, 2018.

FASES DE LA INVESTIGACION		Período de Tiempo
Fase 1	Documentación del problema Historial de fallas de CORPOELEC	1 semanas
Fase 2	Revisión de datos de falla	1 semana
Fase 3	Determinación del diagrama de Pareto.	1 semana
Fase 4	Calculo de la confiabilidad de la subestación, y a los elementos o equipos fallados	2 semanas
Fase 5	Calculo de la mantenibilidad de la subestación	1 semana
Fase 6	Calculo de disponibilidad de la subestación	1 semana
Fase 7	Curva de la Bañera de la subestación	2 semanas
Fase 8	Elaboración del diagrama de bloques	3 semana
Fase 9	Determinación de los modos y efectos de los transformadores y disyuntores	4 semanas
Fase 10	Determinación el árbol de falla de los transformadores, disyuntores y de la Subestación Guacara I.	4 semanas
Fase 11	Estudio y análisis de los resultados obtenidos	1 semana

Validez y Confiabilidad de los Instrumentos

Para este caso, los instrumentos elegidos son confiables debido a que la información proviene de registros y documento de la empresa CORPOELEC.

Capítulo IV

Análisis de Resultados

Subestación eléctrica Guacara I. La subestación Guacara I (Anexo 1), es una subestación de transmisión, que opera con niveles de voltaje de 115 Kv/34.5 Kv-13.8 Kv, puesta en marcha en el año 1976, dependiente de la Gerencia de Transmisión Carabobo, se encuentra ubicada en la Urb. Industrial el Tigre, al lado de la empresa La Lucha, Guacara, del estado Carabobo, forma parte del anillo de 115 Kv.

La importante zona industrial El Tigre es alimentada por esta subestación, donde suministra energía a subestaciones de distribución de CORPOELEC, como son, la subestación Pruinca y las subestaciones industriales exclusivas de las empresas Alucasa y la Ponderosa. Es importante mencionar que el histórico de fallas de la mencionada subestación es recogido por el Despacho de Carga de la Región Central, de la empresa CORPOELEC, a través del Sistema de Administración de Operaciones (SAO), Sistema que registra los eventos del SEN de transmisión, disponiendo de un histórico de fallas, para un período comprendido entre noviembre del 2012 a octubre del 2018.

De acuerdo a información obtenida del departamento de Información Geográfica del Centro de Operaciones de CORPOELEC Carabobo, hasta principios del 2018 se presentaba el plano de la subestación Guacara I como se puede ver en el Anexo 2, donde se puede apreciar la presencia de un transformador móvil en 34,5 kv/13,8 kv alimentándose del transformador 4 en 115 Kv/34,5kv y surtiendo energía al circuito el Morro. Este plano sufrió modificaciones, mostrando la realidad actual en el plano del Anexo 3, donde se puede visualizar que el circuito el Morro fue normalizando a través del transformador 1 115Kv/13.8 Kv.

Para el año 2013 sufrió daños uno de los transformadores de potencia 115Kv/34.5KV, el cual fue sustituido.

Histórico de fallas. Comúnmente se pueden encontrar datos de fallas que se encuentran fuera de lo que se considera “normal” en el comportamiento de fallas y reparaciones de los equipos, por lo que la data cruda obtenida del sistema SAO fue depurada, logrando así obtener el histórico de fallas de la subestación Guacara I que se muestra en el Apéndice 1. Esto representa el punto de partida para realizar el Análisis RAM, al cual se le determinara la confiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad. De manera tal, que se obtuvo cuarenta y cinco (45) fallas que afectaron a la subestación Guacara I, en el periodo comprendido entre noviembre de 2012 al octubre de 2018, pudiéndose determinar los parámetros de fallas TPF, TEF, TPR, TPPF, TPPR, tasa de fallas (λ) y tasa de reparación (μ), como puede apreciarse en el Apéndice 2.

Pareto. En este Pareto aparecen los siete (07) elementos y equipos que sufrieron todas las fallas que experimentó la subestación en el periodo en estudio, logrando realizar la jerarquización de los equipos, pudiéndose apreciar en la tabla 3 correspondiente a las frecuencias absolutas y relativas para el diagrama de Pareto, que el elemento o equipo con mayor falla fue el transformador 4.

En tanto que, en el Apéndice 3 se puede visualizar el grafico de las frecuencias absolutas y las frecuencias absolutas acumuladas, como en el Apéndice 4 puede apreciarse frecuencias las relativas y las frecuencias relativas acumuladas de las fallas, verificando de manera tal, que entre los pocos y vitales, del 83.3% que menciona la teoría de Pareto se encuentran los transformadores 4, 2, 3 y 1.

Tabla 3 Frecuencias absolutas y relativas para el diagrama de Pareto. Fuente: la Autora, 2018.

Ítem	Equipo o Elemento Fallado	Frecuencia Absoluta de Fallas	Frecuencias Relativas de Fallas	Frecuencia Absoluta Acumulada de Fallas	Frecuencias Relativas Acumuladas de Fallas
1	T 4 de 115/34.5 KV	14	31,1	14	31,1
2	TX 2 de 115/13.8 KV	9	20,0	23	51,1
3	TX 3 de 115/34,5 KV	8	17,8	31	68,9
4	TX 1 de 115/13.8 KV	8	17,8	39	86,7
5	TX Móvil de 34.5/13.8 KV	3	6,7	42	93,3
6	Disyuntor BT TX4	2	4,4	44	97,8
7	Barra 115 Kv	1	2,2	45	100,0

Confiabilidad de la subestación Guacara I, utilizando distribución Exponencial.

Con los cálculos derivados del Análisis RAM utilizando distribución Exponencial del Apéndice 5, se obtuvo la confiabilidad utilizando distribución Exponencial (Apéndice 6), donde en el tiempo dispuesto para su estudio, la probabilidad de supervivencia disminuye a medida que el tiempo de operación aumenta. Encontrándose una función de confiabilidad, como sigue:

$$R(ti) = e^{-0,001019 \cdot ti}$$

Siendo el tiempo promedio para fallar de 981,61 horas, arrojando una confiabilidad de:

$$R(981,61 \text{ horas}) = 0,3678$$

Evidenciando que existe un 36,78% de probabilidades de que no se hayan producido fallas al pasar un tiempo igual al tiempo promedio para fallar (TPPF= 981,61 horas).

Infiabilidad de la subestación Guacara I, utilizando distribución Exponencial.

Conforme a los cálculos procedentes del Análisis RAM utilizando distribución Exponencial del Apéndice 5, se determinó la infinidad utilizando distribución Exponencial (Apéndice 7), donde se puede considerar que, en el tiempo dispuesto para su estudio, la

probabilidad de fallas crece a medida que el tiempo de operación también crece. teniendo un tiempo promedio para fallar de 981,61 horas, arrojando una expresión para la infiabilidad de:

$$Q(ti) = 1 - e^{-(0,001019*ti)}$$

Teniendo un valor de:

$$Q(981,61 \text{ horas}) = 0,6322$$

Por lo que existe un 63,22% de probabilidades de que se produzcan fallas al pasar un tiempo igual al tiempo promedio para fallar (TPPF= 981,61 horas).

Confiabilidad e infiabilidad de la subestación Guacara I, utilizando distribución Exponencial. Acorde al comportamiento de la gráfica que muestra la confiabilidad e infiabilidad utilizando distribución Exponencial en el Apéndice 8, se puede apreciar el punto donde se interceptan las dos gráficas en 0.50 del eje de las abscisas, el cual representa en el eje de las ordenadas 680,40 horas, momento límite para comenzar el mantenimiento de la subestación.

Función densidad de probabilidad de la subestación Guacara I, usando distribución Exponencial. De acuerdo al Apéndice 5, donde se encuentran los cálculos procedentes del Análisis RAM utilizando distribución Exponencial, se logró graficar el comportamiento de la función densidad de probabilidad utilizando distribución Exponencial (Apéndice 9), donde el punto máximo representa el 0,3678 de confiabilidad, siendo un 36,78% de probabilidad de que no se hayan producido fallas al pasar un tiempo igual al tiempo promedio para fallar (TPPF= 981,61 horas).

Confiabilidad, infiabilidad y función densidad de probabilidad de la subestación Guacara I, usando distribución Exponencial. Como se puede ver en el Apéndice 10, donde además de observar el punto donde se interceptan la confiabilidad e infiabilidad (como se vio

en la explicación anterior), se puede observar el punto de corte entre la confiabilidad y la densidad de probabilidad, en las ordenadas es 981,61 horas, lo cual representa el tiempo promedio para fallar (TPPF), el cual, como ya se mencionó es el tiempo donde la subestación comenzaría a fallar sino se ha realizado el respectivo y oportuno mantenimiento.

Tasa de fallas de la subestación Guacara I, utilizando distribución Exponencial.

Derivado de los cálculos procedentes del Análisis RAM utilizando distribución Exponencial (Apéndice 5), se obtuvo la tasa de fallas, también llamada frecuencia de ocurrencia de fallas, utilizando distribución Exponencial como se puede ver en el Apéndice 11, donde se observa que la tasa de fallas de la subestación Guacara I aumenta de manera Exponencial.

Confiabilidad de la subestación Guacara I, utilizando distribución de Weibull, para diferentes valores de β . Conforme a los cálculos procedentes del Apéndice 12, se obtuvo el estudio de confiabilidad utilizando distribución de Weibull (Apéndice 13), donde se confirman los resultados obtenidos con la distribución Exponencial, donde la probabilidad de supervivencia disminuye a medida que el tiempo de operación aumenta. encontrándose que las tres graficas se interceptan en un tiempo promedio para fallar de 981,61 horas, arrojando una confiabilidad de:

$$R(981,61 \text{ horas}) = 0.3678$$

Evidenciando que existe un 36,78% de probabilidades de que no se hayan producido fallas al pasar un tiempo igual al tiempo promedio para fallar (TPPF= 981,61 horas).

La función de confiabilidad de Weibull se inicia en 1, para todos los valores de β , dado que se supone que al iniciar la misión todos los equipos se encuentran en buenas condiciones y conforme pasa el tiempo la confiabilidad va disminuyendo, como lo muestra la gráfica del

apéndice 13, mostrando que para $\beta=0.5$ la función de Confiabilidad disminuye de manera asintótica, exponiendo un descenso más abrupto para el valor de β más alto, es decir $\beta=3$.

Infiabilidad de la subestación Guacara I, utilizando distribución de Weibull para diferentes valores de β . De acuerdo a los datos de la tabla del Apéndice 14, se logró graficar el comportamiento de la infiabilidad utilizando distribución de Weibull para diferentes valores de β (Apéndice 15), donde se confirman los resultados obtenidos con la distribución Exponencial, donde la probabilidad de falla aumenta a medida que el tiempo de operación aumenta. Encontrándose que las tres graficas se interceptan en un tiempo promedio para fallar de 981,61 horas, arrojando una infiabilidad de:

$$Q(981,61 \text{ horas}) = 0,6322$$

Por lo que existe un 63,22% de probabilidades de que se produzcan fallas al pasar un tiempo igual al tiempo promedio para fallar (TPPF= 981,61 horas).

Función densidad de probabilidad (f (t) o pdf) de la subestación Guacara I, utilizando distribución de Weibull para diferentes valores de β . Basados en la tabla de datos del Apéndice 16 se presenta la gráfica función densidad de probabilidad en el Apéndice 17. En estas curvas se puede observar el efecto del parámetro β , teniendo que para $\beta=0.5$ la función $f(t)$ es decreciente y es convexa a medida que aumenta el tiempo, en tanto, que para $\beta=1$ decrece y decrece más suavemente que para $\beta=0.5$, finalmente, para $\beta=3$ se aproxima a la $f(t)$ normal, teniendo un valor máximo para TPPF=981,61 horas.

Tasa de falla de la subestación Guacara I, utilizando distribución de Weibull para diferentes valores de β . basados en la tabla de datos del apéndice 18 se presenta la gráfica función en el de Probabilidad en el Apéndice 19, donde se puede verificar que la Función Tasa de Falla para $\beta=0.5$ se inicia en el $+\infty$, decreciendo con el tiempo monótonamente, para $\beta=1$, se

mantiene constante, representando la tasa de falla constante de la vida útil de la subestación, coincidiendo para este valor con la función Exponencial. Concluyendo que para $\beta=3$, $\lambda(t)$ se incrementa con el tiempo, aproximándose a la tasa de falla normal.

Las tres curvas representadas para los tres (03) valores de β son características propias de la curva de la Bañera.

Curva de la Bañera de la subestación Guacara I. La curva de la Bañera (Apéndice 20), donde se estudia el ciclo de vida de la subestación, indica que existió una primera etapa en donde las fallas iniciales que presento la subestación eran elevadas, disminuyendo con el tiempo de operación, teniendo, aproximadamente a partir de las 251,00 horas un periodo donde presenta un valor casi constante y muy bajo de la tasa de fallas, para luego, alrededor de las 570,00 horas incrementarse, encontrándose en la etapa de envejecimiento o fallas por desgaste. El valor de TPPF de 981,61 horas se encuentra en esta última etapa, lo cual indica que la subestación se encuentra en la etapa de envejecimiento.

Disponibilidad de la subestación Guacara I, utilizando distribución Exponencial. Partiendo de los datos del Apéndice 21, se muestra la disponibilidad de la subestación utilizando la distribución Exponencial en el Apéndice 22, siendo la función de disponibilidad como sigue:

$$D(ti) = 0,9980 + 0,0019948e^{-(0,510719)*t}$$

Mantenibilidad de la subestación Guacara I, utilizando distribución Exponencial.

De acuerdo a los datos de la mantenibilidad utilizando la distribución Exponencial del Apéndice 23, se presenta la curva de mantenibilidad en el Apéndice 24, como se puede observar, el comportamiento es Exponencial, lo cual indica que tiene tendencia a una alta

mantenibilidad, el TPPR= 1,96 horas, lo que indica que para tiempos mayores de reparaciones la mantenibilidad se incrementa. Siendo la función de mantenibilidad como sigue:

$$M(ti) = 1 - e^{-0,5097*ti}$$

Análisis de modos y efectos de fallas (AMEF) del transformador de potencia.

Existen diversos modos de falla que se puedan presentar en un transformador de potencia, como podemos observar en el Apéndice 25, donde también se registran los efectos de las fallas y la posible causa. Estos modos de falla producen inoperatividad del transformador y por ende de la subestación, teniendo algunos modos la posibilidad de presentarse con mayor frecuencia que otros.

Árbol de falla del transformador de potencia. Derivándose del AMEF se tiene el árbol de falla del transformador de potencia, como se representa en el Apéndice 26, mostrando catorce (14) modos de fallas.

Análisis de modos y efectos de fallas (AMEF) del disyuntor de potencia. En el Apéndice 27 se incorporan los modos y efectos de falla del disyuntor, así como la posible causa de la avería.

Árbol de falla del disyuntor de potencia. En el Apéndice 28, se muestra el árbol de falla del disyuntor, siendo a su vez representado por diez (10) modos de fallas.

Árbol de falla de la subestación Guacara I. En el Apéndice 29, se muestra el árbol de falla de la subestación Guacara I, como se puede observar la subestación está dividida en siete (07) subsistemas que pueden generar fallas y sacar a la Subestación de operación.

Estudio de los elementos fallados de la Subestación Guacara I. De acuerdo al Pareto de la figura 3, donde el estudio arrojó a siete (07) elementos o equipos fallados, de los cuales el

transformador móvil es uno de ellos, pero para la fecha actual ya fue deshabilitado, derivándose un análisis para el resto de los seis (06) elementos, como sigue:

Confiabilidad e in fiabilidad del transformador 1. De acuerdo a los datos registrados en el Apéndice 30 se obtuvieron las gráficas de confiabilidad e in fiabilidad del transformador 1, ver Apéndice 31, arrojando un TPPF de 3639,30 Horas, dando lugar a una confiabilidad de 36,78% y una in fiabilidad 63,22%. Como se puede verificar el corte de las dos gráficas, corresponde a 2522,77 Horas. Esto indica que el mantenimiento debe comenzar a las 2522,77 Horas, pues de no realizarse el mantenimiento se prevé que a las 3639,30 Horas ocurra una falla en el mencionado transformador.

Confiabilidad e in fiabilidad del transformador 2. De acuerdo a los datos registrados en el Apéndice 32 se obtuvieron las gráficas de confiabilidad e in fiabilidad del transformador 2, ver Apéndice 33, arrojando un TPPF de 3797,21 Horas, dando lugar a una confiabilidad de 36,78% y una in fiabilidad 63,22%. Como se puede verificar el corte de las dos gráficas, corresponde a 2632,03 Horas. Esto indica que el mantenimiento debe comenzar a las 2632,03 Horas, pues de no realizarse el mantenimiento se prevé que a las 3797,21 Horas ocurra una falla en el mencionado Transformador.

Confiabilidad e in fiabilidad del transformador 3. De acuerdo a los datos registrados en el Apéndice 34 se obtuvieron las gráficas de confiabilidad e in fiabilidad del transformador 3, ver Apéndice 35, arrojando un TPPF de 4981,30 Horas, dando lugar a una confiabilidad de 36,78% y una in fiabilidad 63,22%. Como se puede verificar el corte de las dos gráficas, corresponde a 3452,76 Horas. Esto indica que el mantenimiento debe comenzar a las 3452,76 Horas pues de no realizarse el mantenimiento se prevé que a las 4981,30 Horas ocurra una falla en el mencionado transformador.

Confiabilidad e in fiabilidad del transformador 4. De acuerdo a los datos registrados en el Apéndice 36 se obtuvieron las gráficas de confiabilidad e in fiabilidad del transformador 4, ver Apéndice 37, arrojando un TPPF de 2276,06 Horas, dando lugar a una confiabilidad de 36,78% y una in fiabilidad 63,22%. Como se puede verificar el corte de las dos gráficas, corresponde a 1577,65 Horas. Esto indica que el mantenimiento debe comenzar a las 1577,65 Horas, pues de no realizarse el mantenimiento se prevé que a las 2276,06 Horas ocurra una falla en el mencionado transformador.

Tomando en cuenta que este es el equipo más fallado dentro de la Subestación, teniendo mucha incidencia en este numero de fallas la existencia del transformador móvil 34.5 Kv/13.8Kv.

Confiabilidad del disyuntor de baja tensión del transformador 4. De acuerdo a las pocas fallas registradas en el disyuntor B480, se encontró el TPPF de 14165,78 Horas, siendo la tasa de fallas $\lambda = 0.00007059$,

Confiabilidad de la barra 115Kv. En cuanto a la barra 115 Kv, donde se registro un puente roto, se determino el TPPF es de 58370,78 Horas, siendo la tasa de fallas $\lambda = 1,713E-05$, siendo una tasa de falla bastante baja.

Modos de fallas presente en el histórico de fallas de la subestación Guacara I.

Los modos de fallas que se presentaron en los equipos y elementos de la subestación Guacara I, de acuerdo al histórico de fallas presentado en el sistema SAO se visualizan, a continuación, en la tabla 4, donde se incluye el número de identificación del modo y efecto de falla dentro del AMEF de los transformadores de potencia (Apéndice 25) y de los disyuntores (Apéndice 27).

Tabla 4. Modos de falla de los equipos y elementos fallados en la subestación Guacara I, e identificación del modo y efecto de falla dentro de la AMEF de los transformadores de potencia y disyuntores. Fuente: la Autora, 2018.

Modos o Causas de Falla	Barra 115 Kv	Disyuntor BT TX4	TX Móvil	TX1	TX2	TX3	TX4	Total	Identificación en AMEF del Transformador	Identificación en AMEF del Disyuntor
Animal				1			1	2	T1D	
Cable de control flojo		1						1		I2D
Copa terminal							1	1		
Descarga atmosférica						1		1	T3A	
Desconocida				4	4	6	7	21		
Mala maniobra				1				1	T13	
Fuga SF6		1						1		I7
Incendio maleza						1	2	3	T2	
Cambiador de tomas				1				1	T11C	
Protecciones				1	4			5	T5C	
Puente roto en línea	1							1		
Puesta a tierra			1					1	T9C	
Servicios Auxiliares			1					1	T5A	
Sobrecarga					1			1	T12B	
Termómetros AT y BT fallados por humedad							1	1	T10	
Vegetación			1				2	3	T1D	
Total	1	2	3	8	9	8	14	45		

Confiabilidad de la subestación Guacara I a partir del diagrama de bloques.

En el Apéndice 38 se muestra el diagrama de bloque de la subestación Guacara I, como se puede apreciar en el subsistema Barra 115 Kv, existen dos barras, las cuales están “puenteadas”, dejando a las dos barras en serie. De igual manera, las barras de transferencia en 34.5 Kv y 13.8 Kv están presentes como elementos redundantes.

De acuerdo a los análisis de confiabilidad realizados a los elementos o equipos fallados, y evaluando la confiabilidad para un $t_i=3939,30$ Horas se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 5.

Se considera que el resto de los elementos de la subestación no fallados tienen confiabilidad 1. Realizando el análisis de diagrama de bloques para confiabilidad, como se observa en el Apéndice 39, de acuerdo a las fórmulas presentadas en el capítulo II y para $t_i=$

3639,30 Horas hasta reducir el diagrama de bloque como se puede ver en el Apéndice 40. De tal manera, que se obtiene una confiabilidad del 78%, la cual se considera aceptable para el concepto de confiabilidad, pero no para lo que se espera de una Subestación Eléctrica de Transmisión.

Tabla 5. Parámetros de falla de los elementos fallados de la subestación Guacara I. Fuente: la Autora, 2018.

TR	TPPF (Horas)	λ	$R(ti) = e^{-(\lambda * ti)}$	
			ti= 3639,30 horas	
TX1	3639,30	0,000274778	0,37	
TX2	3797,21	0,000263351	0,38	
TX3	4981,30	0,000200751	0,48	
TX4	2276,06	0,000439356	0,20	
Disyuntor BT TX4	14165,78	7,05927E-05	0,77	
Barra 1 115 Kv	58370,78	1,71319E-05	0,94	

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Los objetivos planteados para la realización de este trabajo fueron completamente desarrollados. Este análisis arrojó iguales valores de confiabilidad, in fiabilidad, función densidad de probabilidad y tasa de fallas, usando distribución Exponencial, como para la distribución de Weibull para tres diferentes parámetros de β . También se obtuvieron los valores de mantenibilidad y disponibilidad usando distribución Exponencial, de igual manera que, la curva de la Bañera con la distribución de Weibull. Se obtuvo un TPPF para la subestación de 981,61 horas y un tiempo límite para iniciar mantenimiento de 680,40 horas, además de un TPPR de 1.96 horas.

Se determino con ayuda del Pareto, los elementos y/o eventos de la subestación que generan mayor indisponibilidad. Se pudo jerarquizar los diferentes elementos influyentes en la indisponibilidad, como lo representan los cuatro transformadores y en especial el transformador 4, que resultó ser el más fallado, presentando la mayor tasa de falla y el menor TPPF. Y con esta jerarquización de equipos poder estar consciente de donde se debe concentrar el mayor empeño en el mantenimiento de los transformadores, comenzando con el transformador 4. Para que luego, con actividades complementarias que apunten a detectar el origen de las fallas en estos transformadores, lograr establecer un plan de mantenimiento adecuado y proponer mejoras que ayuden a mitigar dichos eventos no deseados.

La curva de la Bañera arrojó importante información referente al desempeño de la subestación Guacara I, mostrando que se encuentra funcionando en la etapa de obsolescencia, aunque debe considerarse la situación que se presentó, donde el transformador 4 experimento el

mayor número de fallas, las cuales en su mayoría se desconoce la causa del evento, como lo muestra el histórico de fallas; sin embargo, la presencia durante unos años del periodo de estudio, de un transformador móvil alimentado por el transformador 4 puede haber sido la causa en gran medida de esta cantidad de fallas presentadas. Por esta razón se considera que la deshabilitación del transformador móvil, el cual presentaba problemas con los servicios auxiliares y las protecciones, y la normalización de la salida del circuito el Morro por el transformador 1 constituye una buena decisión que mejorará la confiabilidad y la disponibilidad de la subestación.

La confiabilidad, así como la mantenibilidad determinadas en este análisis son el resultado de la consideración de efectos de diferentes factores sobre la disponibilidad de la subestación, factores como son la confiabilidad de los equipos, por ejemplo los transformadores, disyuntores, entre otros, la configuración de la subestación, las fallas aleatorias y sus reparaciones, la influencia del “error humano”, por alguna mala maniobra, las pérdidas de capacidad por degradación, la indisponibilidad de recursos humanos y materiales, la probabilidad de ocurrencia de eventos especiales no deseados, como incendios forestales y la presencia de animales en los bushing, conductores y elementos.

La confiabilidad encontrada a partir del diagrama de bloque de la subestación para el tiempo $t_i=3939,30$ arroja un valor satisfactorio de 78%, que para la teoría de confiabilidad se considera un valor aceptable de confiabilidad, sin embargo, para Subestaciones de Transmisión debería ser mayor, por lo que debe mejorarse.

En cuanto a la configuración de la subestación, se puede mencionar que la configuración de dos (02) barras en 115 Kv mejora la confiabilidad de la subestación, pero en este caso el

disyuntor de barra 115 Kv (h120), se encuentra fuera de operación, puesto que esta “puenteado”, desaprovechando esta posibilidad, perdiendo confiabilidad.

La configuración de barra principal con barra de transferencia en los subsistemas de barra 34,5 Kv y de barra 13,8 Kv aumenta la confiabilidad de la subestación.

De acuerdo a las causas de fallas visualizadas en el histórico de fallas se desprende la necesidad de realizar desmalezamiento, control químico de maleza de manera continua, reposición de piedra picada, oportuna y eficiente, para evitar incendios innecesarios que puedan provocar daños mayores a los que ya fueron registrados en la subestación y disminuir su confiabilidad y por ende su disponibilidad.

Para mejorar el desempeño de la subestación es indispensable que se aumente la confiabilidad, expresada por el aumento del TPPF, disminuir la mantenibilidad, reduciendo el tiempo empleado en la reparación, expresado por la reducción del TPPR, logrando así una mayor disponibilidad.

Se puede mejorar la disponibilidad de la subestación logrando reducir el tiempo que se invierte en reparación, esto se puede obtener: perfeccionando la logística de atención de averías, disponiendo de una flota en buen estado para el traslado del personal, amplio conocimiento del personal en cuanto a las labores de operaciones y mantenimiento, disponibilidad de materiales y elementos de reemplazo, al igual que tener un número de personal de cuadrilla acorde con la actividad de mantenimiento a realizar.

Con el presente análisis, se logró transmitir la importancia de contar con un histórico de fallas, ya que esto añade luces a la incertumbre natural de las fallas de la subestación. Mientras la información sea más detallada, de calidad y fidedigna, los análisis realizados serán más

acertados, lo cual, se traduce en mejor conocimiento de las situaciones para tomar la decisión estratégicamente más adecuada.

Se debe considerar de vital importancia la formación del talento humano, pues permite mejorar las aptitudes, capacidades, conocimientos y destrezas del personal en el uso efectivo de las comunicaciones y la responsabilidad para el registro sistemático de la información, es decir, cultivar la cultura del dato en la organización, lo cual, traerá como beneficio inmediato un mejor histórico de fallas, con menos causa de fallas “desconocidas”, para alimentar los Análisis RAM, obteniendo una mejor calidad en la información, lo que se traduce en una respuesta del análisis más apegada a la realidad operacional de los Sistemas de la Corporación Eléctrica.

Finalmente, este estudio es replicable a otras subestaciones eléctricas.

Recomendaciones

Se recomienda habilitar el disyuntor de barra 115 kv (h120) para lograr aprovechar la configuración de la infraestructura y mejorar la confiabilidad y disponibilidad de la subestación.

Se recomienda a las Gerencias involucradas, que, a partir del Pareto y los modos de fallas registrados para la subestación, establecer acciones para minimizar las amenazas externas que están presentes, por ejemplo: falta de material, falta de reactivos de pruebas para los transformadores, falta de desmalezamiento con su respectivo control químico de maleza, inseguridad y robo de material operativo, para llevar a cabo los mantenimientos preventivos necesarios.

Capacitar a los operadores, en cuanto a cómo ejecutar maniobras de operaciones adecuadas para cada situación, como también a los linieros y técnicos, en las actividades de mantenimiento, para así disminuir el TPPR y evitar la reducción de la vida útil de los equipos por malas maniobras.

Instruir y hacer seguimiento al personal que se encarga de cargar los eventos o histórico de falla, concientizándolos en la necesidad de cargar la información completa sin dejar incertidumbres, puesto que se registraron muchas fallas con causa desconocida, y el deber ser es que se debe investigar cada una de las fallas en su totalidad.

Para el caso de la subestación Guacara I, que data del año 1976, sus transformadores han estado en servicio durante muchos años bajo diferentes condiciones ambientales, eléctricas y mecánicas. Además de los costos asociados con su posible reparación o reemplazo, la pérdida de capital y de producción suele contarse en millones. Debido a esta motivación económica, el mantenimiento y diagnóstico temprano, pasan a ser de extremo beneficio, es por esto que la aplicación de la curva de la Bañera, confiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y el Pareto representan el punto de partida, el cual en conjunto con el análisis de modos y efectos de fallas (AMEF) y de los árboles de falla apuntan al establecimiento de un plan de mantenimiento que contribuiría a aumentar su disponibilidad y el direccionamiento de los primeros esfuerzos del diagnóstico hacia los elementos que resultaron con mayor probabilidad de falla, como lo representan los cuatro (04) transformadores y en especial el transformador 4.

Apoyados en este Análisis RAM, como son los valores de TPPF, Pareto, AMEF y árboles de fallas, en conjunto con una inspección termográfica y pruebas a los equipos, se recomienda la elaboración de un plan de mantenimiento preventivo y predictivo para la subestación Guacara I.

Referencias

- Ardanuy, T. y Cejalvo A. (1998). Centro Nacional de Condiciones de Trabajo NTP 333: Análisis probabilístico de riesgos: Metodología del "Árbol de fallos y errores", España
- Albornoz, E. (2008). Cálculo de los Parámetros de Mantenimiento, Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre (UNEXPO), Puerto Ordaz, Venezuela.
- Ary, D; Jacob, L. y Razavieh, A. (1992). Introducción a la Investigación Pedagógica. (2ª ed.), México: Mc Graw-Hill Interamericana.
- Caña, A. (2006). Análisis RAM de la Planta de Inyección de agua Resor de Petróleos de Venezuela, S.A. (Tesis de Grado, Especialización en Confiabilidad de Sistemas Industriales). Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.
- Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN 2500-93) (1993). "Manual para Evaluar los Sistemas de Mantenimiento en la Industria", recuperado de: <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/2500-93.pdf>
- Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN 3049-93) (1993). "Mantenimiento. Definiciones", recuperado de: <http://www.sencamer.gob.ve/sencamer/normas/3049->
- DEKRA Insight. (2016). Análisis RAM. Recuperado de: <http://www.dekra-insight.com>
- Echeverría, F y Preciado, E. (2008). Estudio de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad en Subestaciones del Sistema Nacional de Transmisión, Quito, Perú.
- Escobar, L., Villa E. y Yáñez S., (noviembre, 2006). "Confiabilidad: Historia, Estado del Arte y Desafíos Futuros", Dyna, (70). P. 5-7. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614003>.
- Estándar Internacional de la Comisión Electrotécnica Internacional IEC 61078 (2016). Reliability Block Diagrams. Edición 3.0 2016-08.

- Flores, E. (2017). Aplicación y Sistematización de un Análisis RAM en un Sistema Productivo del tipo Manufacturero. (Tesis de Grado, Especialización en Confiabilidad de Sistemas Industriales). Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.
- González, B. y Galaviz J. (2016, 05 de diciembre). Análisis de Fiabilidad aplicado a Interruptores de Potencia en Subestaciones Eléctricas. *Avances Investigación en Ingeniería*, 14. Recuperado de: <http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/13/analisis-de-fiabilidad-aplicado-a-interruptores-de-potencia-en-Subestaciones.pdf>.
- Hernández E., Pérez F., Rojano A., Salazar R. (2011). Aplicaciones de la Distribución Weibull en Ingeniería de Confiabilidad, *Memoria del XXI Coloquio Mexicano de Economía Matemática y Econometría*. Recuperado de: <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013/1255/aplicaciones-distribucion-weibull-ingenieria-confiabilidad.pdf>
- Hurtado, J. (2000). Metodología de la investigación holística. Caracas: Instituto Universitario de Tecnología Caripito, Venezuela: Servicios y Proyecciones para América Latina (SYPAL). 3ª Edición.
- Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE), Norma IEEE C37.100-1992 (p.5).
- Knezevic, J., (1996). “Mantenibilidad”, Londres: Inglaterra: McGraw-Hill Hill.
- Martínez, P. (2013). Mejoras en el Cálculo del Índices de Fiabilidad en Redes Malladas de Distribución de Energía Eléctrica (Tesis Doctoral) Universidad de Sevilla, España.
- Mosquera, G., (2000). “Estimación de Parámetros de Confiabilidad y Mantenibilidad en Sistemas Industriales”, Caracas, Venezuela: Centro de Altos Estudios Gerenciales ISID.
- Nava, J., (2012) “Teoría de Mantenimiento Fiabilidad”, Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes.

- Reliability & Risk Management (R2M), (2017). “Análisis de Confiabilidad, Disponibilidad y Mantenibilidad - CDM o RAM”. Recuperado de: <http://reliarisk.com/post/an%C3%A1lisis-de-confiabilidad-disponibilidad-mantenibilidad-cdm-o-ram>.
- Pieruschka E., (1963). “Principios de Confiabilidad”, Inglewood Cliffs, Estados Unidos: Prentice-Hall, Inc.
- Salamanca, J., Velazco, J. y Acevedo, E., (2016) “Análisis de Criticidad y Árboles de Diagnóstico de Fallas para Transformadores de Potencia”, I. I. D. T. A. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, Pamplona, Colombia.
- Salazar, C., (2018) “Análisis RAM”, Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional (UNEFA), Guacara, Venezuela.
- Tamborero, J., (1999) “Fiabilidad de componentes: la distribución exponencial”, Madrid, España.
- Veloz, J. (2010). Estrategias de Mantenimiento Centrado en Confiabilidad, para a un llevadero de Combustibles (Tesis de Maestría, Magister Scientiarum en Gerencia de Mantenimiento). Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada Nacional (UNEFA), Naguanagua, Venezuela.
- Yáñez, M. y otros (2004). Ingeniería de Confiabilidad y Análisis Probabilístico de Riesgo. R²M, Venezuela

Apéndices

Apéndice 1

Histórico de fallas de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018 (Fuente: CORPOELEEC)

Ítem	Registro	Equipo	Modo de Falla	Fecha apertura evento	Fecha cierre evento	Descripción Evento	Efecto de la Falla	
							Consecuencias	Nota cierre
1	214	TX1	ERROR PERSONAL	02-09-2018 14:38:00.000	02-09-2018 14:49:00.000	DISPARO EL LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV EN LA S/E GUACARA I.	CORTE DE 14 MW DURANTE 11 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV EN LA S/E GUACARA I.	EN SERVICIO EL TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV EN LA S/E GUACARA I.
2	217	BARRA 115 Kv	PUENTE ROTO EN LINEA	30-08-2018 17:14:00.000	31-08-2018 02:47:00.000	PUENTE ROTO EN PUENTE DE LA LINEA CARABOBO 1- ADEMAS RELE DE PROTECCION DE SOBRECORRIENTE DEL TX2 FALLADO		En servicio TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. ESTO FUE INFORMADO POR EL OPERADOR DE GUARDIA AL MOMENTO DE HACER OPERACIONES CON LINEA SANTA CLARA POLAR GUACARA I. En servicio TRANSFORMADOR 2 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.
3	464	TX2	DESCONOCIDA	12-06-2018 17:40:00.000	12-06-2018 20:33:00.000	DISPARO DE LOS INTERRUPTORES H210 Y D280 ALTA Y BAJA DEL TRANSFORMADOR N°2 DE 115/13.8 KV DE LA S/E GUACARA I CON 18 MW.	CORTE DE 18 MW DURANTE 2 HORAS 53 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TRANSFORMADOR N°2 DE 115/13.8 KV DE LA S/E GUACARA I.	se revisó las protecciones del transformador, y las conexiones en alta y baja y los bushings a ver si tenían señales de descarga, no se encontró punto de falla y por parte de protecciones el transformador se dio disponible para su normalización. el intento de energización fue positivo y entró en servicio sin novedad.
4	520	TX3	DESCARGA ATMOSFERICA	19-05-2018 19:30:00.000	19-05-2018 20:00:00.000	DISPARO EL LADO DE ALTA Y BAJA DEL TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I CON 17 MW.	CORTE DE 17 MW DURANTE 30 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TR3 DE 115/34.5 KV DE LA S/E GUACARA I.	En servicio TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I Y SU CARGA.
5	624	TX4	INCENDIO VEGETACION	14-04-2018 13:56:00.000	14- 15:40:00.000	Disparo TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, Por causa Incendio, DISPARARON LAS SALIDAS 115 kV GUACARA I EN LAS SS/EE GUACARA II, STA. CLARA Y CARABOBO, QUEDANDO SIN TENSIÓN LAS SS/EE POLAR Y GUACARA I POR INCENDIO DE VEGETACIÓN DEBAJO DEL DISYUNTOR H410 LADO DE ALTA DEL TR4 de 115/34.5 kV EN LA S/E GUACARA I TAMBIÉN HUBO CONATO DE INCENDIO DEBAJO DEL DISYUNTOR DE TRANSFERENCIA H130 EN LA S/E GUACARA II (ESTA ACTUALMENTE TRANSFERIDA LA SALIDA 115 kV GUACARA I EN LA S/E GUACARA II).	CORTE DE 8 MW DURANTE 1 HORA 19 MINUTOS PARA LA CARGA DE LA S/E POLAR. CORTE DE 43 MW DURANTE 1 HORAS 44 MINUTOS PARA LA CARGA DE LA S/E GUACARA I.	En servicio TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla, SE REVISÓ Y NO CAUSÓ DAÑO MAYOR LA DESCARGA EN EL DISYUNTOR H410 LADO DE ALTA DEL TR4 DE 115/34.5 KV Y SE CORTO LA VEGETACIÓN ALREDEDOR DEL TR4 DE 115/34.5 KV.

6	770	TX4	DESCONOCIDA	15-02-2018 17:35:00.000	15-02-2018 17:49:00.000	DISPARA EL INT B480 LADO DE BAJA PRINCIPAL DEL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I.	CORTE DE 2 MW DURANTE 14 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.8 KV DE LA S/E GUACARA1.	EN SERVICIO EL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, ESTABA FUERA DE SERVICIO POR FALLA.
7	1094	TX2	DESCONOCIDA	01-12-2017 14:00:00.000	01-12-2017 14:28:00.000	DISPARO EL LADO DE BAJA TENSION DEL TRANSFORMADOR N°2 DE 115/13.8 KV EN LA S/E GUACARA I.	CORTE DE 17 MW DURANTE 28 MINUTOS PARA PARTE DE LA CARGA DE LA S/E GUACARA I.	EN SERVICIO EL TRANSFORMADOR N°2 DE 115/13.8 KV EN LA S/E GUACARA I.
8	1176	TX2	DESCONOCIDA	27-11-2017 17:30:00.000	27-11-2017 18:05:00.000	DISPARO EL LADO DE BAJA TENSION DEL TRANSFORMADOR N°2 DE 115/13.8 KV EN LA S/E GUACARA I.	CORTE DE 18 MW DURANTE 35 MINUTOS PARA PARTE DE LA CARGA DE LA S/E GUACARA I.	EN SERVICIO EL TRANSFORMADOR N°2 DE 115/13.8 KV EN LA S/E GUACARA I.
9	1275	TX4	DESCONOCIDA	06-11-2017 10:54:00.000	06-11-2017 11:37:00.000	DISPARO EL DISYUNTOR LADO DE BAJA B-480 DEL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I.	CORTE DE 1 MW DURANTE 43 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I.	EN SERVICIO EL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I.
10	1339	TX4	DESCONOCIDA	06-10-2017 08:25:00.000	06-10-2017 08:42:00.000	Disparo DEL INTERRUPTOR B480, LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I.	CORTE DE 07MW DURANTE 17 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TR04 115/34.5KV.	En servicio TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.
11	1497	TX1	DESCONOCIDA	23-08-2017 07:15:00.000	23-08-2017 08:25:00.000	DISPARÓ EL INTERRUPTOR D180 CORRESPONDIENTE AL LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR N° 1 DE 115/13,8 kv EN LA S/E GUACARA I CON 11 MW.	CORTE 11 MW DURANTE 1 HORA 10 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TRANSFORMADOR N° 1 DE 115/13,8 kv EN LA S/E GUACARA I.	EN SERVICIO EL TRANSFORMADOR N° 1 DE 115/13,8 kv EN LA S/E GUACARA I, ESTABA FUERA DE SERVICIO POR FALLA.
12	1571	TX4	DESCONOCIDA	15-07-2017 07:50:00.000	15-07-2017 08:37:00.000	Disparo B480 LADO DE BAJA TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I.	CORTE DE 4 MW DURANTE UN TIEMPO DE 47 MINUTOS PARA PARTE DE LA CARGA DE LA S/E GUACARA.	En servicio B480 LADO DE BAJA TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.
13		DISYUNTOR BT TX4	CABLE DE CONTROL FLOJO					En servicio TRANSFORMADOR N° 4 DE 115/34,5 kv S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. NOTA: SE TARDÓ EN NORMALIZAR DEBIDO A QUE EL INTERRUPTOR B480 CORRESPONDIENTE AL LADO DE BAJA DEL TR N° 04 DE 115/34,5 kv NO OBEDECIA
	1614			02-07-2017 16:40:00.000	02-07-2017 18:54:00.000	DISPARÓ EL INTERRUPTOR B480, CORRESPONDIENTE AL LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR N° 4 DE 115/34,5 kv EN LA S/E GUACARA I.	CORTE DE 04 MW DURANTE 02 HORAS CON 14 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TR N° 04 DE 115/34,5 kv.	ORDEN DE CIERRE POR CABLE DE CONTROL FLOJO.
14		TX4	DESCONOCIDA					

15	1631	TX1	ANIMAL	20-06-2017 04:50:00.000	20-06-2017 16:57:00.000	DISPARO EL DISYUNTOR D180, LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR N° 1 DE 115/13,8 kV EN LA S/E GUACARA I.	CORTE DE 16 MW DURANTE 12 HORAS 07 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TRANSFORMADOR N° 1 DE 115/13,8 kV EN LA S/E GUACARA I.	En servicio TRANSFORMADOR 1 DE 115/13,8 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. BARRA PRINCIPAL I DE 13,8 KV S/E GUACARA I CULMINADOS LOS TRABAJOS SIN NOVEDAD. NORMALIZADO EL TX N° 01 DE 115/13,8 kV Y SU CARGA EN LA S/E GUACARA I. NOTA: SE TARDÓ EN NORMALIZAR DEBIDO A QUE SE ESPERÓ POR PARTE DEL PERSONAL DE MANTTO. REALIZARA TRABAJOS DE DESCONTAMINACIÓN DE LA CELDA DE 13,8 kV, POR CORTOCIRCUITO OCASIONADO POR ROEDOR (RATA), SE REALIZARON PRUEBAS DE AISLAMIENTO Y LIMPIEZA. QUEDAN INDISPONIBLE LOS SACA N° 01 DE 13,8 kV (SE TRANSFIRIERON A 34,5 kV) E INDISPONIBLES LOS TRES (03) TPS DE MEDICIÓN DE LA CELDA. CULMINADOS LOS TRABAJOS SIN NOVEDAD. NORMALIZADO EL TX N° 01 DE 115/13,8 kV Y SU CARGA EN LA S/E GUACARA I.
16	1794	TX4	DESCONOCIDA	13-04-2017 06:30:00.000	13-04-2017 07:34:00.000	DISPARO EL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I.	CORTE DE 4 MW DURANTE 1 HORA Y 4 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I.	EN SERVICIO EL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S EN LA S/E GUACARA I.
17	1854	TX3	DESCONOCIDA	23-03-2017 14:20:00.000	23-03-2017 17:53:00.000	DISPARO EL TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I.	CORTE DE 7 MW DURANTE 03 HORAS Y 33 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I.	EN SERVICIO TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I.
18	1903	TX MOVIL	SERVICIOS AUXILIARES	05-03-2017 10:01:00.000	05-03-2017 10:21:00.000	Fuera de servicio TRANSFORMADOR DE 34.5 KV /13.8 KV S/E GUACARA I por trabajos de emergencia.	INDISPONIBLE TR MOVIL DE 34.5/13.8 KV. EL CIRCUITO EL MORRO SE TRANSFIRIO A SU SALIDA DE 13.8 KV. DE LA BARRA N° 1 en 20 min	En servicio TRANSFORMADOR DE 34.5 KV /13.8 KV S/E GUACARA I, concluidos los trabajos de emergencia. EL TECNICO ESPAÑA REPARO LOS SERVICIOS AUXILIARES Y SE NORMALIZO EL CIRCUITO EL MORRO POR EL TR MOVIL 5 34.5/13.8 KV
19	1989	TX4	INCENDIO VEGETACION	07-02-2017 15:00:00.000	07-02-2017 15:02:00.000	FUERA DE SERVICIO EL LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR N°4 DE 115/34.5 KV DE LA S/E GUACARA I, PARA DESENERGIZAR Y DESPEJAR EL TR MOVIL DE 34.5/13.8 KV (EL CUAL SE ENCUESTRA ALIMENTADO POR LA BARRA 4 DE 34.5 Kv), YA QUE SE QUEMARON LOS CABLES DE CONTROL Y MANDO DEL TRANSFORMADOR MOVIL EN CUESTIÓN, ESTO POR INCENDIO DE VEGETACIÓN ALREDEDOR DE LA S/E, EL CUAL SE EXTENDIO AL PATIO DE 34.5 Kv..	CORTE DE 06 MW DURANTE 02 MINUTOS PARA LA CARGA DE TX 4 DE 115/34.5 KV DE LA S/E GUACARA I.	EN SERVICIO EL LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR N°4 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I.

20	1988	TX3	INCENDIO VEGETACION	07-02-2017 13:30:00.000	07-02-2017 15:39:00.000	DISPARO EL LADO DE ALTA DEL TRANSFORMADOR N°3 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I CON 10 MW.	CORTE DE 10 MW DURANTE UN TIEMPO DE 02 HORAS 09 MINUTOS PARA PARTE DE LA CARGA DE LA S/E GUACARA I	EN SERVICIO EL TRANSFORMADOR N°3 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I.
21	2021	TX3	DESCONOCIDA	21-01-2017 18:45:00.000	21-01-2017 23:31:00.000	Disparo H310 LADO DE ALTA Y B380 LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR 3	PERDIDA DE 7MW CON UN TIEMPO DE 04 HORAS 46 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TR#3 DE 115/34.5KV	En servicio TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.
22	2056	TX1	DESCONOCIDA	11-01-2017 05:42:00.000	11-01-2017 08:52:00.000	Disparo del D180 lado de baja del TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I.	Corte de 12 MW durante 03 horas 10 minutos para la carga del TR 1 de 115/13,8 kV.	En servicio TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.
23	2109	TX1	DESCONOCIDA	03-12-2016 18:10:00.000	03-12-2016 18:20:00.000	DISPARO EL LADO DE BAJA TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV EN LA S/E GUACARA I.	CORTE DE 6 MW DURANTE UN TIEMPO DE 10 MINUTOS PARA PARTE DE LA CARGA DE LA S/E GUACARA I	En servicio LADO DE BAJA TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.
24	2326	TX4	VEGETACION	25-08-2016 02:40:00.000	25-08-2016 05:02:00.000	Disparo del TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I.	CORTE DE 3 MW DURANTE 2 HORAS 22 MINUTOS PARA LA CARGA DE TR N° 4 DE 115/34.5 KV EN LA S/E GUACARA I.	En servicio TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.
25	2404	TX3	DESCONOCIDA	23-07-2016 07:50:00.000	23-07-2016 09:26:00.000	Disparo B380 Y H310 ALTA Y BAJA DEL TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV Y EL B480 LADO DE BAJA DEL TR#4 S/E GUACARA I AL MOMENTO DE CERRAR EL B186 ENLACE DE BARRAS DE 34.5KV ASOCIADOS A LOS LADOS DE BAJA DE LOS TRANSFORMADORES N°3 Y N°4 DE 115/34.5KV CON UN TOTAL DE PERDIDA DE CARGA DE 17 MW.	07:50 PERDIDA DE 17 MW PARA PARTE DE LA CARGA DE LA S/E GUACARA I CON UN TIEMPO DE 01 HORAS 36 MINUTOS AL NORMALIZAR EL TR3 DE 115/34.5 KV. 07:50 PERDIDA DE 06 MW PARA PARTE DE LA CARGA DE LA S/E GUACARA I CON UN TIEMPO DE 40 MINUTOS AL NORMALIZAR EL TR4 DE 115/34.5 KV.	08:25 En servicio TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. 09:19 En servicio TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.

31	2512	TX3	DESCONOCIDA	31-05-2016 22:49:00.000	31-05-2016 23:40:00.000	DISPARA EL TRANSFORMADOR N° 3 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I,	CORTE DE 5MW DURANTE 51 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TRANSFORMADOR N°3 DE 115/34,5KV DE LA S/E GUACARA I.	En servicio TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. CULMINADOS LOS TRABAJOS EN FORMA DEFINITIVA
						Dispararon: Disyuntor B480 y H410 correspondientes a los lados de baja y alta del TX N° 04 DE 115/34,5 kV con 7 MW en la S/E GUACARA I, Por Causa: Fuerte explosión (Gas SF6) en el disyuntor B480 (Tipo OX), correspondiente al lado de baja del TRANSFORMADOR N° 04 DE 115/34,5 kV.	Indisponible el TRANSFORMADOR N° 04 DE 115/34,5 kV. CORTE DE SERVICIO ELÉCTRICO DE 7 MW DURANTE 18 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TRANSFORMADOR N° 04 DE 115/34,5 kV DE LA S/E GUACARA I.	
32	2965	DISYUNTOR BT TX4	Fuga SF6	19-11-2015 10:35:00.000	19-11-2015 10:53:00.000	DISYUNTOR B480 CORRESPONDIENTE AL LADO DE BAJA DEL TX N° 04 DE 115/34,5 kV, Fuga de SF6, FUÉ CONTROLADO POR EL MISMO OPERADOR DE GUARDIA DE LA S/E. LA CARGA DEL TX N° 04 DE 115/34,5 kV (7 MW), FUÉ RECUPERADA POR EL TRANSFORMADOR N° 03 DE 115/34,5 kV, A TRAVÉS DEL SECCIONADOR DE ACOUPLE DE BARRAS N° 3 Y 4 DE 34,5 kV (B124), SIENDO ASUMIDA POR ÉSTE ÚLTIMO.	LA CARGA DEL TRANSFORMADOR N° 04 DE 115/34,5 kV (7 MW), FUÉ RECUPERADA POR EL TRANSFORMADOR N° 03 DE 115/34,5 kV, A TRAVÉS DEL SECCIONADOR DE ACOUPLE DE BARRAS N° 3 Y 4 DE 34,5 kV (B124), SIENDO ASUMIDA POR ÉSTE ÚLTIMO.	En servicio TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. SE CAMBIO POLO DE LA FASE R DEL DISYUNTOR B480
								En servicio TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL TERMOMETRO DE DEVANADO DE ALTA TENSION Y BAJA TENSION. SE SUSTITUYO EL CONTACTO DE DISPARO EN AMBOS TERMOMETROS; Y LA TAPA DEL TERMOMETRO DE BAJA TENSION. SE REALIZARON PRUEBAS FUNCIONALES DE TEMPERATURA CON RESULTADOS SATISFACTORIOS.
33	2977	TX4	TERMOMETROS AT Y BT FALLADOS POR HUMEDAD	18-11-2015 06:33:00.000	18-11-2015 07:28:00.000	DISPARO DEL H410 LADO DE ALTA DEL TRANSFORMADOR N°4 DE 115/34,5 KV DE LA S/E GUACARA I CON 4 MW.	CORTE DE 4 MW DURANTE 55 MINUTOS PARA LA CARGA DEL TRANSFORMADOR N°4 DE 115/34,5 KV.	En servicio TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL TERMOMETRO DE DEVANADO DE ALTA TENSION Y BAJA TENSION. SE SUSTITUYO EL CONTACTO DE DISPARO EN AMBOS TERMOMETROS; Y LA TAPA DEL TERMOMETRO DE BAJA TENSION. SE REALIZARON PRUEBAS FUNCIONALES DE TEMPERATURA CON RESULTADOS SATISFACTORIOS.
34	3075	TX2	DESCONOCIDA	24-10-2015 00:42:00.000	24-10-2015 01:24:00.000	DISPARO EL DISYUNTOR D280, LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR 2 DE 115/13.8 KV EN LA S/E GUACARA I POR CAUSA DESCONOCIDA.	CORTE DE 17 MW DURANTE 42 MINUTOS.	EN SERVICIO EL TRANSFORMADOR 2 DE 115/13.8 KV EN LA S/E GUACARA I, ESTABA FUERA DE SERVICIO POR FALLA.

35	3101	TX4	ANIMAL	13-10-2015 10:20:00.000	13-10-2015 17:22:00.000	Disparo EL INT B480 LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, Por causa Animal.	CORTE DE 4 MW DURANTE 07HORA 02 MINUTOS.	En servicio TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. LOS CORTACORRIENTE FUERON BAIPASEADOS (FUERON DESCONECTADOS) ASOCIADORS A LA MEDICION DE LA BARRA DEL TR04 POR INDISPONIBILIDAD DE REPUESTO. EN CASO DE EVENTO, ACTUARIAN LOS CORTACORRIENTES ASOCIADOS AL BANCO DE SERV. AUXILIARES DE 34.5KV SECC B134 SE SUSTITUYO EN LAS FASES R-S. AL MOMENTO DE ENERGIZAR EL TR04 , SE PUDO CONSTATAR QUE EL SECC B483.FASE T , ESTABA FLOJO LO QUE AMERITA LA SUSTITUCION DE DICHA FASE. TRABAJO CONCLUIDO, EQUIPO DISPONIBLE.
36	3266	TX3	DESCONOCIDA	20-08-2015 14:15:00.000	20-08-2015 14:41:00.000	Disparo TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, con 5MW	CORTE DE 5 MW PARA LA CARGA DEL TR3 115/34.5KV DURANTE 26 MINUTOS. EL TR4 115/34.5 KV ASUME LA CARGA DEL TR3 115/34.5KV	En servicio solo por el lado de alta a petición del personal técnico ya que se espera por pruebas TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.
37	3916	TX4	DESCONOCIDA	27-11-2014 17:00:00.000	27-11-2014 17:53:00.000	Disparo DEL INT. B480, LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I.	CORTE DE 9MW DURANTE 53 MINUTOS. EL OPERADOR LLAMO PARA REPORTAR LA NOVEDAD APROXIMADAMENTE 15 MINUTOS DESPUES DE TRANSCURRIR EL EVENTO YA QUE ESTABA EN EL PATIO VERIFICANDO LA FALLA PARA EL DESPEJE DE LA MOVIL 34.5/13.8KV.	En servicio TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, EL CIRCUITO EL MORRO Y ALCASA FURON NORMALIZADOS A TRAVES DEL TR1 115/13.8KV
38	3986	TX4	COPA TERMINAL	08-10-2014 23:30:00.000	09-10-2014 00:10:00.000	Disparo el interruptor de baja B480 DEL TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, POR EXPLOSION EN LA COPA TERMINAL DEL TRX MOVIL DE 34.5-13.8KV DE LA FASE R ENTRE EL SECCIONADOR B604 Y B584.	CORTE DE 07 MW DURANTE 40 MINUTOS PARA EL TR4 Y ADICIONALMENTE INDISPONIBLE EL TRX MOVIL DE 34.5/13.8KV.	En servicio TRANSFORMADOR 4 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I. SE DESPEJA EL TRX MOVIL 34.5/13.8KV PARA SU REVISION DE LAS COPAS TERMINALES.

39	4640	TX3	DESCONOCIDA	29-03-2014 19:14:00.000	29-03-2014 19:44:00	DISPARO EL LADO DE ALTA Y BAJA DEL TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I.	CORTE DE 16 MW PARA PARTE DE LA CARGA DEL TRANSFORMADOR N°3 DE 115/34.5 KV DURANTE 30 MINUTOS.	En servicio TRANSFORMADOR 3 DE 115/34.5 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.
40	4773	TX1	PROTECCION	10-02-2014 15:05:00.000	10-02-2014 18:42:00.000	Disparo TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I.		En servicio TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. CONTACTO DEL DIFERENCIAL(DDT) DE LA FASE R, PEGADO(SOLDADO) EN RESTO DEL EQUIPO SIN NOVEDAD
41	4785	TX1	CAMBIADOR DE TOMAS	07-02-2014 11:52:00.000	08-02-2014 12:52:00.000	Disparo TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I..	CORTE DE 20MW 12:52 NORMALIZADOS 3MW PARA PARTE DE LA CARGA DE LA BARRA 1 DURANTE 1 HORA 00 MINUTOS. A TRAVES DEL ACOPLA DE BARRA D120 PARA	En servicio TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. Se trabajo en el cambiador de tomas el cual tiene un daño interno el mismo no se puede dejar mecánico y no se puede conmutar por lo que se decidió dejarlo fijo en la posición de tap N°18.
42	4887	TX2	SOBRECARGA	01-12-2013 08:30:00.000	01-12-2013 08:34:00.000	Disparo INT. D280, LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR 2 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I..	CORTE DE 29MW	En servicio TRANSFORMADOR 2 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.
43	4885	TX1	DESCONOCIDA	01-12-2013 05:32:00.000	01-12-2013 06:30:00.000	Disparo TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I.	Corte de 15 MW durante 58 minutos.	En servicio TRANSFORMADOR 1 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla.
44	4954	TX2	PROTECCIONES	03-11-2013 05:05:00.000	03-11-2013 10:36:00.000	Disparo TRANSFORMADOR 2 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I.	corte de 8 Mw durante 5 horas y 31 minutos	En servicio TRANSFORMADOR N° 2 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. NOTA: Se cambió la caja de empotramiento de las protecciones, debido a daños en los pines de contacto de dicha caja, con los relés de protecciones (Diferencial, Sobre corriente y Mínima Impedancia), y además por presentar humedad en la caja anterior.
45	4994	TX2	PROTECCIONES	18-10-2013 08:48:00.000	18-10-2013 11:51:00.000	Disparo TRANSFORMADOR 2 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I, sale fuera de servicio con 12 Mw.	Corte de 7 Mw durante 3 horas 03 minutos.	En servicio TRANSFORMADOR 2 DE 115/13.8 KV S/E GUACARA I, estaba fuera servicio por falla. se encontró corto circuito en pines 3 y 4 y la caja del relé diferencial en la fase T. se cambió la caja del relé.

Apéndice 2

Determinación de los parámetros de falla. Fuente: la Autora, 2018.

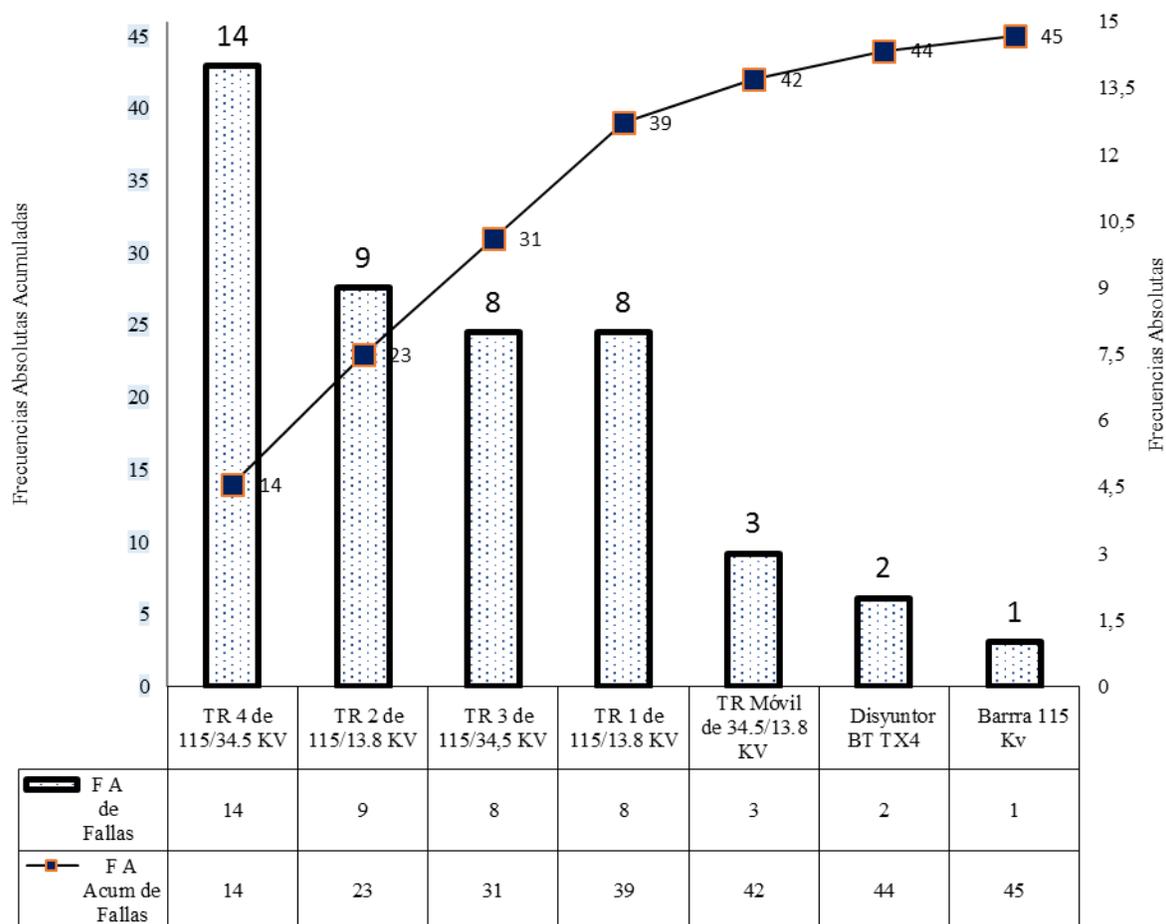
Ítem	Nro.	Equipo	Fecha apertura evento	Fecha cierre evento	Duración	TPF	TEF	TPR
1	214	TX1	02-09-2018 14:38:00.000	02-09-2018 14:49:00.000	00:11:00	59,85	69,40	0,18
2	217	BARRA 115 Kv	30-08-2018 17:14:00.000	31-08-2018 02:47:00.000	09:33:00	1.892,68	1.895,57	9,55
3	464	TX2	12-06-2018 17:40:00.000	12-06-2018 20:33:00.000	02:53:00	573,67	574,17	2,88
4	520	TX3	19-05-2018 19:30:00.000	19-05-2018 20:00:00.000	00:30:00	843,83	845,57	0,50
5	624	TX4	14-04-2018 13:56:00.000	14- 15:40:00.000	01:44:00	1.388,12	1.388,35	1,73
6	770	TX4	15-02-2018 17:35:00.000	15-02-2018 17:49:00.000	00:14:00	3.243,12	3.243,58	0,23
7	1094	TX2	01-12-2017 14:00:00.000	01-12-2017 14:28:00.000	00:28:00	91,92	92,50	0,47
8	1176	TX2	27-11-2017 17:30:00.000	27-11-2017 18:05:00.000	00:35:00	533,88	534,60	0,58
9	1275	TX4	06-11-2017 10:54:00.000	06-11-2017 11:37:00.000	00:43:00	746,20	746,48	0,72
10	1339	TX4	06-10-2017 08:25:00.000	06-10-2017 08:42:00.000	00:17:00	1.080,00	1.081,17	0,28
11	1497	TX1	23-08-2017 07:15:00.000	23-08-2017 08:25:00.000	01:10:00	934,63	935,42	1,17
12	1571	TX4	15-07-2017 07:50:00.000	15-07-2017 08:37:00.000	00:47:00	300,93	303,17	0,78
13		DISYUNTOR BT TX4			00:24:00	0,00	0,00	0,40
	1614		02-07-2017 16:40:00.000	02-07-2017 18:54:00.000				
14		TX4			01:50:00	311,72	323,83	1,83
15	1631	TX1	20-06-2017 04:50:00.000	20-06-2017 16:57:00.000	12:07:00	1.629,27	1.630,33	12,12
16	1794	TX4	13-04-2017 06:30:00.000	13-04-2017 07:34:00.000	01:04:00	492,62	496,17	1,07

17	1854	TX3	23-03-2017 14:20:00.000	23-03-2017 17:53:00.000	03:33:00	435,98	436,32	3,55
18	1903	TX MOVIL	05-03-2017 10:01:00.000	05-03-2017 10:21:00.000	00:20:00	618,98	619,02	0,33
19	1989	TX4	07-02-2017 15:00:00.000	07-02-2017 15:02:00.000	00:02:00	0,00	1,50	0,03
20	1988	TX3	07-02-2017 13:30:00.000	07-02-2017 15:39:00.000	02:09:00	397,98	402,75	2,15
21	2021	TX3	21-01-2017 18:45:00.000	21-01-2017 23:31:00.000	04:46:00	249,88	253,05	4,77
22	2056	TX1	11-01-2017 05:42:00.000	11-01-2017 08:52:00.000	03:10:00	923,37	923,53	3,17
23	2109	TX1	03-12-2016 18:10:00.000	03-12-2016 18:20:00.000	00:10:00	2.413,13	2.415,50	0,17
24	2326	TX4	25-08-2016 02:40:00.000	25-08-2016 05:02:00.000	02:22:00	41,23	42,83	2,37
25	2404	TX3	23-07-2016 07:50:00.000	23-07-2016 09:26:00.000	01:36:00	655,50	658,00	1,60
26	2454	TX2	25-06-2016 21:50:00.000	26-06-2016 00:20:00.000	02:30:00	21,83	24,10	2,50
27	2457	TX2	24-06-2016 21:44:00.000	25-06-2016 00:00:00.000	02:16:00	6,88	8,88	2,27
28	2458	TX4	24-06-2016 12:51:00.000	24-06-2016 13:14:00.000	00:23:00	0	0	0,38
29	2440	TX MOVIL	24-06-2016 12:51:00.000	24-06-2016 14:51:00.000	02:00:00	454,35	456,35	2,00
30	2459	TX MOVIL	05-06-2016 12:30:00.000	05-06-2018 14:30:00.000	02:00:00	108,83	109,68	2,00
31	2512	TX3	31-05-2016 22:49:00.000	31-05-2016 23:40:00.000	00:51:00	4.667,93	4.668,23	0,85
32	2965	DISYUNTOR	19-11-2015 10:35:00.000	19-11-2015 10:53:00.000	00:18:00	27,12	28,03	0,30
33	2977	TX4	18-11-2015 06:33:00.000	18-11-2015 07:28:00.000	00:55:00	605,15	605,15	0,92
34	3075	TX2	24-10-2015 00:42:00.000	24-10-2015 01:24:00.000	00:42:00	247,33	254,37	0,70

35	3101	TX4	13-10-2015 10:20:00.000	13-10-2015 17:22:00.000	07:02:00	1.291,65	1.292,08	7,03
36	3266	TX3	20-08-2015 14:15:00.000	20-08-2015 14:41:00.000	00:26:00	5.636,37	5.637,25	0,43
37	3916	TX4	27-11-2014 17:00:00.000	27-11-2014 17:53:00.000	00:53:00	1.216,83	1.217,50	0,88
38	3986	TX4	08-10-2014 23:30:00.000	09-10-2014 00:10:00.000	00:40:00	5.211,77	5.212,27	0,67
39	4640	TX3	29-03-2014 19:14:00.000	29-03-2014 19:44:00	00:30:00	1.128,53	1.132,15	0,50
40	4773	TX1	10-02-2014 15:05:00.000	10-02-2014 18:42:00.000	03:37:00	50,22	51,22	3,62
41	4785	TX1	07-02-2014 11:52:00.000	08-02-2014 12:52:00.000	01:00:00	1.635,30	1.635,37	1,00
42	4887	TX2	01-12-2013 08:30:00.000	01-12-2013 08:34:00.000	00:04:00	2,00	2,97	0,07
43	4885	TX1	01-12-2013 05:32:00.000	01-12-2013 06:30:00.000	00:58:00	666,93	666,93	0,97
44	4954	TX2	03-11-2013 05:05:00.000	03-11-2013 10:36:00.000	05:31:00	353,23	356,28	5,52
45	4994	TX2	18-10-2013 08:48:00.000	18-10-2013 11:51:00.000	03:03:00			3,05
						\sum TPF	43.190,77	
						TPPF	981,61	
						λ	0,001019	
						\sum TPR		88,28
						TPPR		1,961852
						μ		0,5097

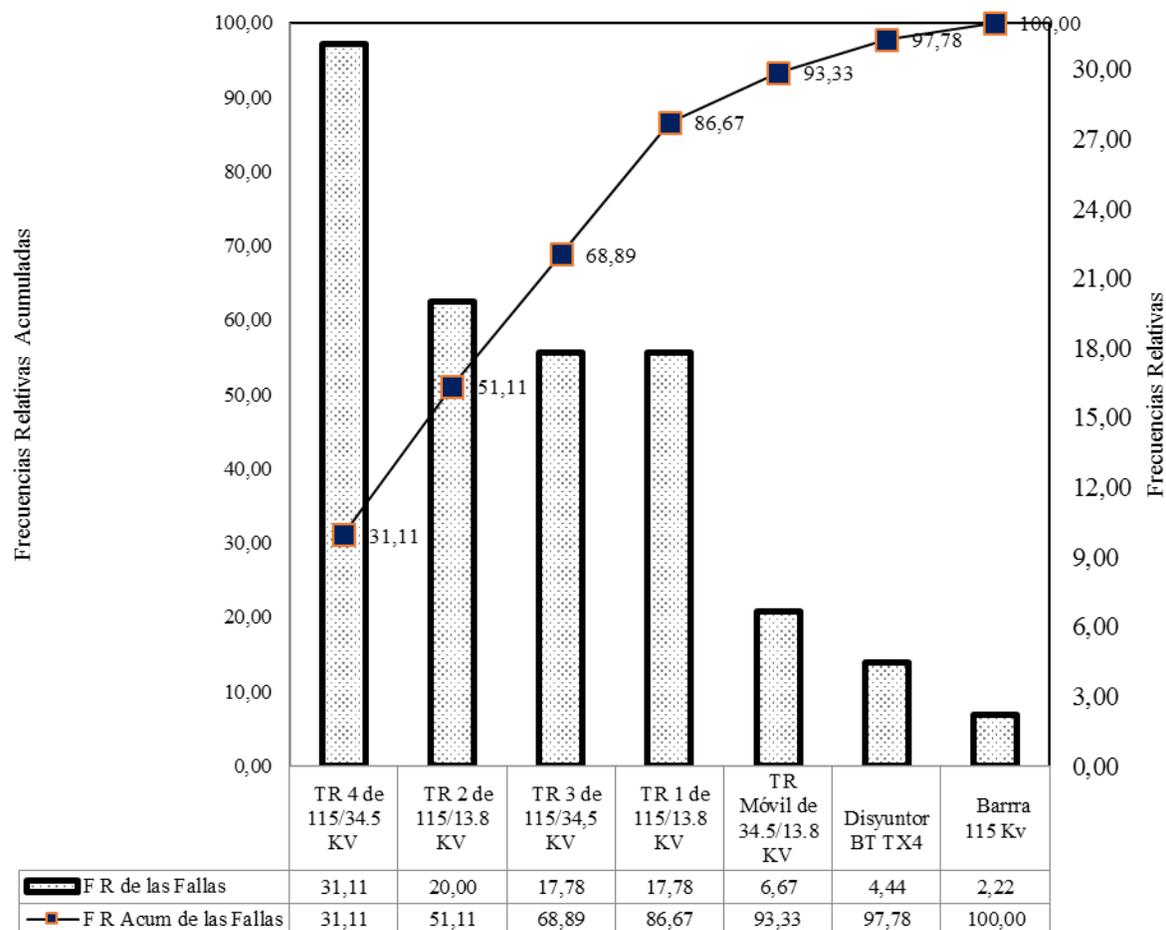
Apéndice 3

Pareto de frecuencia absolutas de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 4

Pareto de frecuencia relativas de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 5

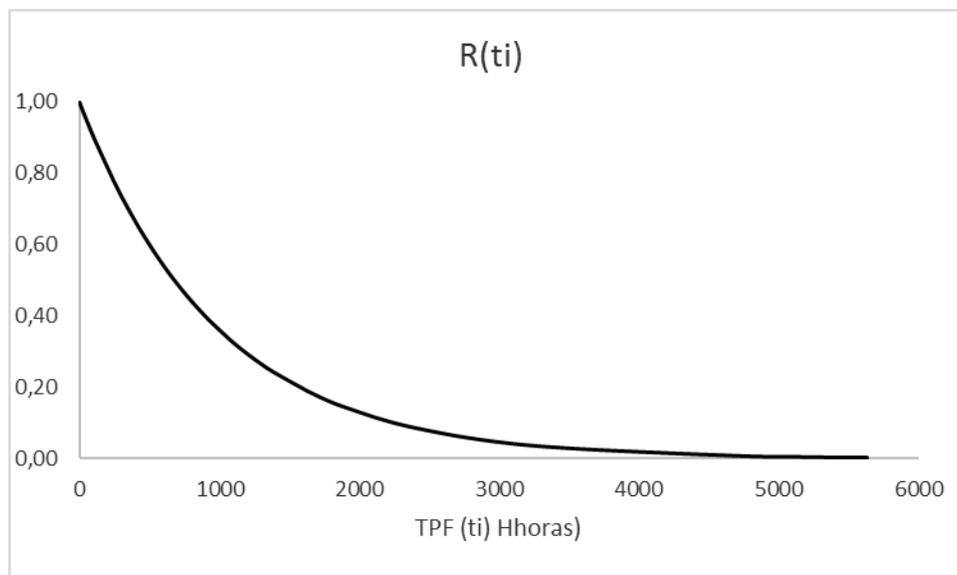
Tabla de datos de confiabilidad, infiabilidad, densidad de probabilidad y tasa de fallas de la subestación Guacara I, periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial. Fuente: la Autora, 2018.

Ítem	TPF (Horas)	TPF Ordenados (Horas) (ti)	λ	$\lambda * (ti)$	$R(t) = e^{-\lambda * ti}$	$Q(ti) = 1 - R(ti)$	$pdf = \lambda * ti * e^{-\lambda * ti}$	$r(ti) = \frac{Q(ti)}{R(ti)}$
1	59,85	0,00	0,001019	0,0000000	1,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000
2	1892,68	0,00	0,001019	0,0000000	1,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000
3	573,67	0,00	0,001019	0,0000000	1,0000000000	0,0000000000	0,0000000000	0,0000
4	843,83	2,00	0,001019	0,0020380	0,9979640753	0,0020359247	0,0020338508	0,0020
5	1388,12	6,88	0,001019	0,0070141	0,9930104248	0,0069895752	0,0069650910	0,0070
6	3243,12	21,83	0,001019	0,0222482	0,9779974986	0,0220025014	0,0217586513	0,0225
7	91,92	27,12	0,001019	0,0276319	0,9727463851	0,0272536149	0,0268788146	0,0280
8	533,88	41,23	0,001019	0,0420168	0,9588537037	0,0411462963	0,0402879323	0,0429
9	746,20	50,22	0,001019	0,0511742	0,9501131654	0,0498868346	0,0486212621	0,0525
10	1080,00	59,85	0,001019	0,0609872	0,9408353294	0,0591646706	0,0573788654	0,0629
11	934,63	91,92	0,001019	0,0936631	0,9105895033	0,0894104967	0,0852886205	0,0982
12	300,93	108,83	0,001019	0,1109012	0,8950272031	0,1049727969	0,0992595610	0,1173
13	0,00	247,33	0,001019	0,2520327	0,7772193485	0,2227806515	0,1958846650	0,2866
14	311,72	249,88	0,001019	0,2546311	0,7752024045	0,2247975955	0,1973906539	0,2900
15	1629,27	300,93	0,001019	0,3066511	0,7359073387	0,2640926613	0,2256667704	0,3589
16	492,62	311,72	0,001019	0,3176393	0,7278652942	0,2721347058	0,2311986104	0,3739
17	435,98	353,23	0,001019	0,3599448	0,6977148621	0,3022851379	0,2511388132	0,4333
18	618,98	397,98	0,001019	0,4055450	0,6666133964	0,3333866036	0,2703417410	0,5001
19	0,00	435,98	0,001019	0,4442670	0,6412941617	0,3587058383	0,2849058440	0,5593
20	397,98	454,35	0,001019	0,4629827	0,6294035526	0,3705964474	0,2914029247	0,5888
21	249,88	492,62	0,001019	0,5019764	0,6053331064	0,3946668936	0,3038629235	0,6520
22	923,37	533,88	0,001019	0,5440271	0,5804061762	0,4195938238	0,3157566986	0,7229
23	2413,13	573,67	0,001019	0,5845663	0,5573475124	0,4426524876	0,3258065917	0,7942
24	41,23	605,15	0,001019	0,6166479	0,5397507338	0,4602492662	0,3328361296	0,8527
25	655,50	618,98	0,001019	0,6307440	0,5321956912	0,4678043088	0,3356792479	0,8790
26	21,83	655,50	0,001019	0,6679545	0,5127563489	0,4872436511	0,3424979107	0,9502
27	6,88	666,93	0,001019	0,6796017	0,5068188333	0,4931811667	0,3444349255	0,9731
28	0,00	746,20	0,001019	0,7603778	0,4674897760	0,5325102240	0,3554688474	1,1391
29	454,35	843,83	0,001019	0,8598662	0,4232187193	0,5767812807	0,3639114578	1,3628
30	108,83	923,37	0,001019	0,9409106	0,3902722785	0,6097277215	0,3672113368	1,5623
31	4667,93	934,63	0,001019	0,9523914	0,3858172888	0,6141827112	0,3674490550	1,5919
32	27,12	1080,00	0,001019	1,1005200	0,3326980357	0,6673019643	0,3661408423	2,0057
33	605,15	1128,53	0,001019	1,1499755	0,3166445376	0,6833554624	0,3641334499	2,1581
34	247,33	1216,83	0,001019	1,2399532	0,2893977711	0,7106022289	0,3588396827	2,4555
35	1291,65	1291,65	0,001019	1,3161914	0,2681546668	0,7318453332	0,3529428529	2,7292
36	5636,37	1388,12	0,001019	1,4144909	0,2430493224	0,7569506776	0,3437910508	3,1144
37	1216,83	1629,27	0,001019	1,6602227	0,1900966345	0,8099033655	0,3156027542	4,2605
38	5211,77	1635,30	0,001019	1,6663707	0,1889315120	0,8110684880	0,3148299359	4,2929
39	1128,53	1892,68	0,001019	1,9286443	0,1453451069	0,8546548931	0,2803190144	5,8802
40	50,22	2413,13	0,001019	2,4589829	0,0855218939	0,9144781061	0,2102968719	10,6929
41	1635,30	3243,12	0,001019	3,3047359	0,0367089060	0,9632910940	0,1213132389	26,2413

42	2,00	4667,93	0,001019	4,7566241	0,0085945752	0,9914054248	0,0408811632	115,3525
43	666,93	5211,77	0,001019	5,3107902	0,0049380230	0,9950619770	0,0262248042	201,5102
44	353,23	5636,37	0,001019	5,7434576	0,0032036720	0,9967963280	0,0184001543	311,1418
<hr/>								
Σ TPF	43190,77							
TPPF	981,61							
λ	0,001019							

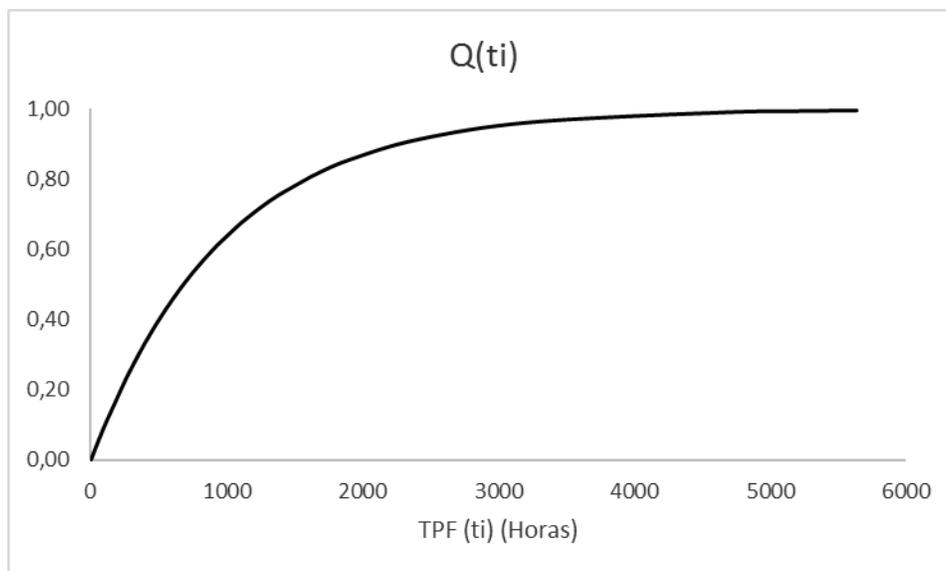
Apéndice 6

Confiabilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial. (Fuente: la Autora)



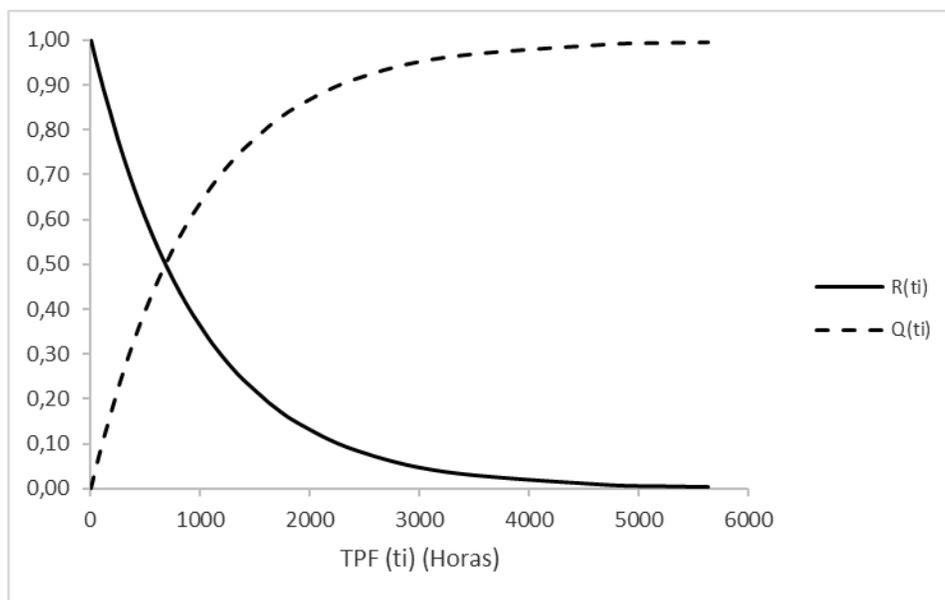
Apéndice 7

Infiabilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial. (Fuente: la Autora)



Apéndice 8

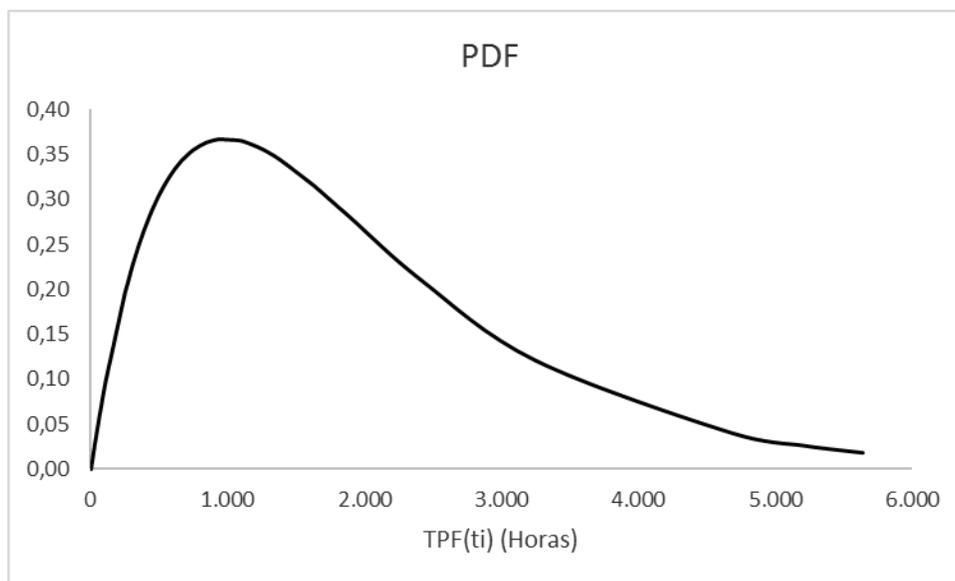
Confiabilidad e in fiabilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial. (Fuente: la Autora)



Apéndice 9

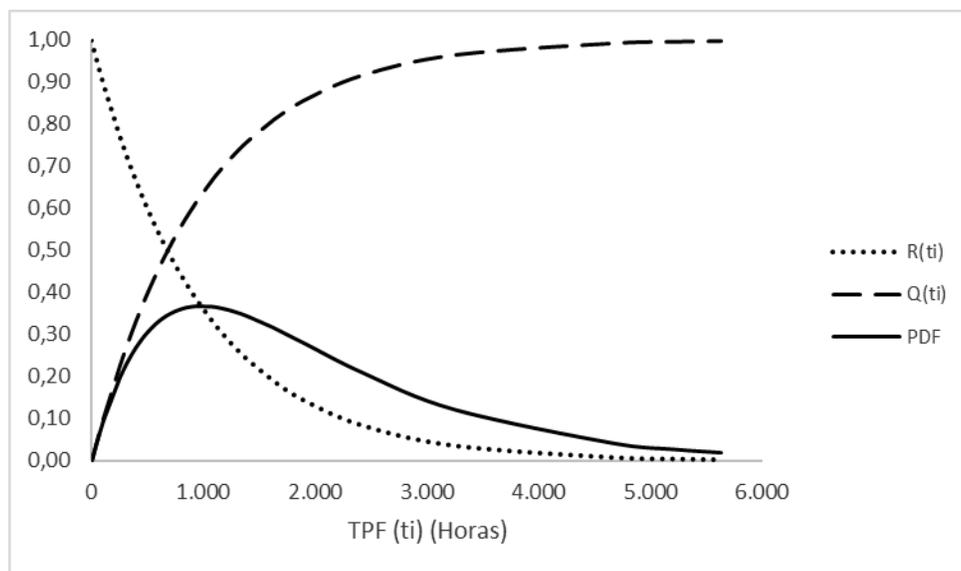
Función densidad de probabilidad (pdf) de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial.

Fuente: la Autora, 2018.



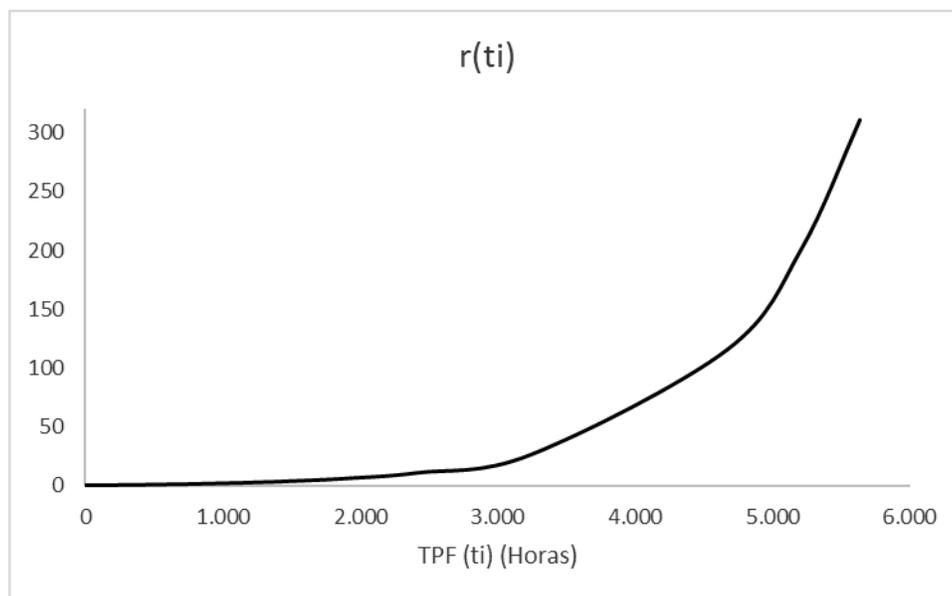
Apéndice 10

Confiabilidad, in fiabilidad y función densidad de probabilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 11

Tasa de fallas, de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 12

Tabla de datos de confiabilidad, de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β . Fuente: la Autora, 2018.

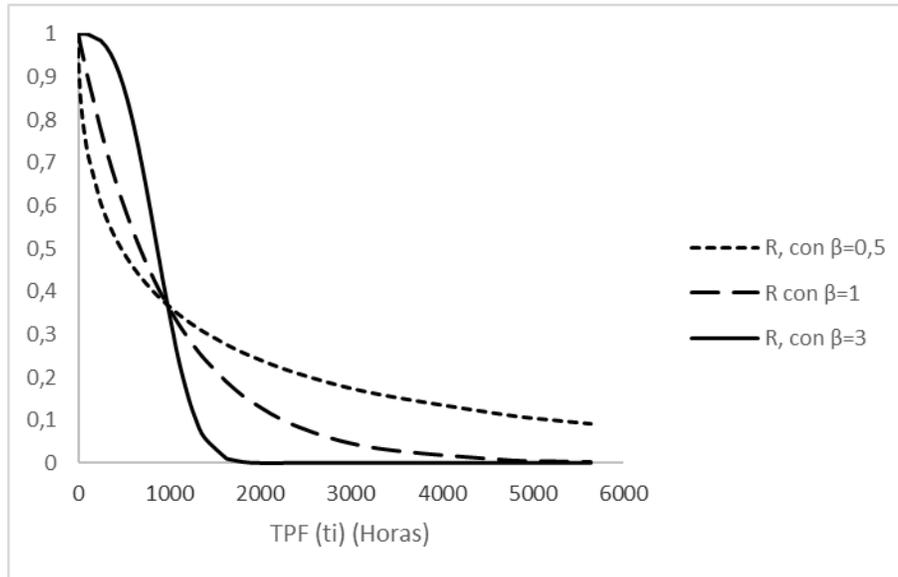
Ítem	TPF Ordenados (Horas) (ti)	β			η	ti/ η	$\left(\frac{ti}{\eta}\right)^\beta$			$R(ti) = e^{-\left(\frac{ti}{\eta}\right)^\beta}$		
		$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$			$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$	$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$
1	0,00	0,50	1,00	3,00	981,61	0,00	0	0	0	1	1	1
2	0,00	0,50	1,00	3,00	981,61	0,00	0	0	0	1	1	1
3	0,00	0,50	1,00	3,00	981,61	0,00	0	0	0	1	1	1
4	2,00	0,50	1,00	3,00	981,61	0,00	0,04513833	0,00203747	8,4581E-09	0,95586525	0,99796461	0,999999992
5	6,88	0,50	1,00	3,00	981,61	0,01	0,08373941	0,00701229	3,4481E-07	0,91967088	0,99301224	0,999999655
6	21,83	0,50	1,00	3,00	981,61	0,02	0,14913876	0,02224237	1,10038E-05	0,86144957	0,97800317	0,999988996
7	27,12	0,50	1,00	3,00	981,61	0,03	0,16620675	0,02762468	2,1081E-05	0,84687112	0,97275339	0,999978919
8	41,23	0,50	1,00	3,00	981,61	0,04	0,20495322	0,04200582	7,41188E-05	0,81468543	0,9588642	0,999925884
9	50,22	0,50	1,00	3,00	981,61	0,05	0,22618764	0,05116085	0,00013391	0,79756843	0,95012583	0,999866099
10	59,85	0,50	1,00	3,00	981,61	0,06	0,24692359	0,06097126	0,00022666	0,78120038	0,94085028	0,999773365
11	91,92	0,50	1,00	3,00	981,61	0,09	0,30600438	0,09363868	0,000821043	0,73638339	0,91061172	0,999179294
12	108,83	0,50	1,00	3,00	981,61	0,11	0,33297489	0,11087227	0,001362915	0,7167882	0,89505306	0,998638013
13	247,33	0,50	1,00	3,00	981,61	0,25	0,50196315	0,25196701	0,015996723	0,60534112	0,77727038	0,984130545
14	249,88	0,50	1,00	3,00	981,61	0,25	0,50454413	0,25456478	0,016496619	0,60378076	0,77525383	0,983638705
15	300,93	0,50	1,00	3,00	981,61	0,31	0,5536887	0,30657118	0,028813364	0,57482554	0,73596613	0,971597783
16	311,72	0,50	1,00	3,00	981,61	0,32	0,56352154	0,31755653	0,032023084	0,56920106	0,72792553	0,968484226
17	353,23	0,50	1,00	3,00	981,61	0,36	0,59987581	0,35985099	0,04659809	0,54887979	0,69778029	0,954470932
18	397,98	0,50	1,00	3,00	981,61	0,41	0,63674121	0,40543936	0,066646559	0,52901356	0,66668383	0,935525796
19	435,98	0,50	1,00	3,00	981,61	0,44	0,66644675	0,44415128	0,08761788	0,51353004	0,64136839	0,916110874
20	454,35	0,50	1,00	3,00	981,61	0,46	0,68033965	0,46286203	0,099164146	0,50644495	0,62947947	0,905594046
21	492,62	0,50	1,00	3,00	981,61	0,50	0,70841062	0,50184561	0,126389321	0,49242623	0,60541227	0,881271682
22	533,88	0,50	1,00	3,00	981,61	0,54	0,73748585	0,54388539	0,16088745	0,47831496	0,58048844	0,85138789
23	573,67	0,50	1,00	3,00	981,61	0,58	0,76446978	0,58441404	0,199600638	0,46558073	0,5574324	0,819057788
24	605,15	0,50	1,00	3,00	981,61	0,62	0,78516699	0,6164872	0,234299947	0,45604354	0,53983745	0,791124485
25	618,98	0,50	1,00	3,00	981,61	0,63	0,79409048	0,63057969	0,250737877	0,45199214	0,53228315	0,778226336
26	655,50	0,50	1,00	3,00	981,61	0,67	0,81717837	0,66778048	0,297783867	0,44167615	0,51284558	0,742461793
27	666,93	0,50	1,00	3,00	981,61	0,68	0,82427218	0,67942462	0,313634506	0,43855407	0,50690857	0,730786077

28	746,20	0,50	1,00	3,00	981,61	0,76	0,87188285	0,7601797	0,439287466	0,41816347	0,46758239	0,644495482
29	843,83	0,50	1,00	3,00	981,61	0,86	0,92716889	0,85964215	0,635262338	0,39567232	0,42331354	0,529796484
30	923,37	0,50	1,00	3,00	981,61	0,94	0,96987912	0,94066551	0,832349371	0,37912886	0,39036796	0,435026047
31	934,63	0,50	1,00	3,00	981,61	0,95	0,97577828	0,95214325	0,863190944	0,37689891	0,38591303	0,421813948
32	1080,00	0,50	1,00	3,00	981,61	1,10	1,04892006	1,10023329	1,331847023	0,35031587	0,33279344	0,263989217
33	1128,53	0,50	1,00	3,00	981,61	1,15	1,07222939	1,14967587	1,519589387	0,34224467	0,31673942	0,218801711
34	1216,83	0,50	1,00	3,00	981,61	1,24	1,11338678	1,23963013	1,904918379	0,3284447	0,28949127	0,14883479
35	1291,65	0,50	1,00	3,00	981,61	1,32	1,14710438	1,31584845	2,278335214	0,31755496	0,26824663	0,10245463
36	1388,12	0,50	1,00	3,00	981,61	1,41	1,18916878	1,41412238	2,827880049	0,30447425	0,2431389	0,059138091
37	1629,27	0,50	1,00	3,00	981,61	1,66	1,28832846	1,65979021	4,572561916	0,2757313	0,19017887	0,010331457
38	1635,30	0,50	1,00	3,00	981,61	1,67	1,29071165	1,66593657	4,623548185	0,27507496	0,18901355	0,009817898
39	1892,68	0,50	1,00	3,00	981,61	1,93	1,38857548	1,92814186	7,168312852	0,24943037	0,14541815	0,000770622
40	2413,13	0,50	1,00	3,00	981,61	2,46	1,56791015	2,45834225	14,85686011	0,20848042	0,0855767	3,52978E-07
41	3243,12	0,50	1,00	3,00	981,61	3,30	1,81765644	3,30387493	36,06374256	0,16240591	0,03674052	2,17628E-16
42	4667,93	0,50	1,00	3,00	981,61	4,76	2,18068449	4,75538486	107,5367761	0,11296418	0,00860523	1,98322E-47
43	5211,76667	0,50	1,00	3,00	981,61	5,31	2,30421498	5,30940666	149,6711066	0,09983714	0,00494486	9,96929E-66
44	5636,36667	0,50	1,00	3,00	981,61	5,74	2,396239	5,74196134	189,3131542	0,09105979	0,00320847	6,05817E-83

Apéndice 13

Confiabilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, utilizando distribución de Weibull, para diferentes valores de β .

Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 14

Tabla de datos de in fiabilidad, de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β .(Fuente: la Autora, 2018).

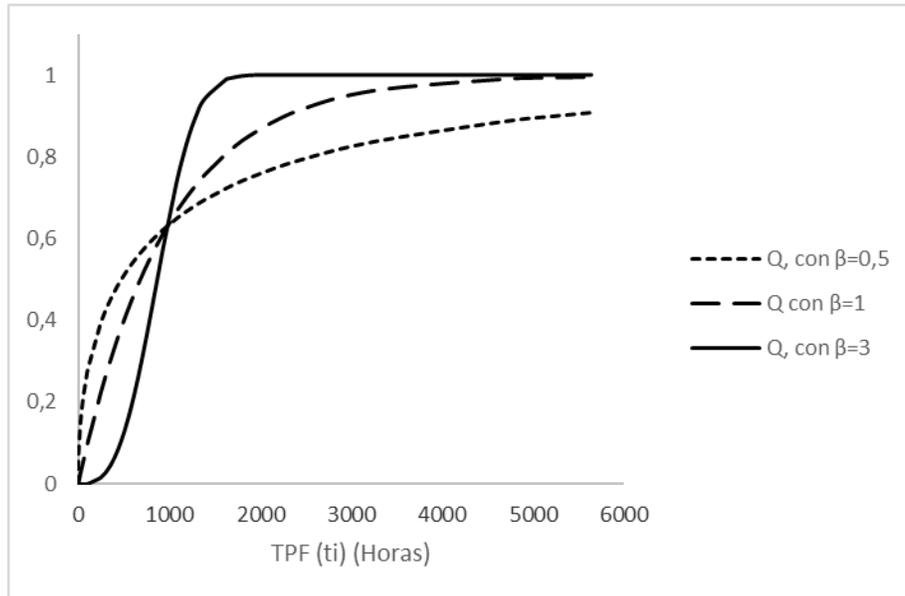
Ítem	TPF Ordenados (Horas) (ti)	β			η	ti/ η	$\left(\frac{ti}{\eta}\right)^\beta$			$Q(ti) = 1 - e^{-\left(\frac{ti}{\eta}\right)^\beta}$		
		$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$			$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$	$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$
1	0,00	0,50	1,00	3,00	981,61	0,00	0	0	0	0	0	0
2	0,00	0,50	1,00	3,00	981,61	0,00	0	0	0	0	0	0
3	0,00	0,50	1,00	3,00	981,61	0,00	0	0	0	0	0	0
4	2,00	0,50	1,00	3,00	981,61	0,00	0,04513833	0,00203747	8,4581E-09	0,04413475	0,00203539	8,4581E-09
5	6,88	0,50	1,00	3,00	981,61	0,01	0,08373941	0,00701229	3,4481E-07	0,08032912	0,00698776	3,4481E-07
6	21,83	0,50	1,00	3,00	981,61	0,02	0,14913876	0,02224237	1,10038E-05	0,13855043	0,02199683	1,10038E-05
7	27,12	0,50	1,00	3,00	981,61	0,03	0,16620675	0,02762468	2,1081E-05	0,15312888	0,02724661	2,10808E-05
8	41,23	0,50	1,00	3,00	981,61	0,04	0,20495322	0,04200582	7,41188E-05	0,18531457	0,0411358	7,41161E-05
9	50,22	0,50	1,00	3,00	981,61	0,05	0,22618764	0,05116085	0,00013391	0,20243157	0,04987417	0,000133901
10	59,85	0,50	1,00	3,00	981,61	0,06	0,24692359	0,06097126	0,00022666	0,21879962	0,05914972	0,000226635
11	91,92	0,50	1,00	3,00	981,61	0,09	0,30600438	0,09363868	0,000821043	0,26361661	0,08938828	0,000820706
12	108,83	0,50	1,00	3,00	981,61	0,11	0,33297489	0,11087227	0,001362915	0,2832118	0,10494694	0,001361987
13	247,33	0,50	1,00	3,00	981,61	0,25	0,50196315	0,25196701	0,015996723	0,39465888	0,22272962	0,015869455
14	249,88	0,50	1,00	3,00	981,61	0,25	0,50454413	0,25456478	0,016496619	0,39621924	0,22474617	0,016361295
15	300,93	0,50	1,00	3,00	981,61	0,31	0,5536887	0,30657118	0,028813364	0,42517446	0,26403387	0,028402217
16	311,72	0,50	1,00	3,00	981,61	0,32	0,56352154	0,31755653	0,032023084	0,43079894	0,27207447	0,031515774
17	353,23	0,50	1,00	3,00	981,61	0,36	0,59987581	0,35985099	0,04659809	0,45112021	0,30221971	0,045529068
18	397,98	0,50	1,00	3,00	981,61	0,41	0,63674121	0,40543936	0,066646559	0,47098644	0,33331617	0,064474204
19	435,98	0,50	1,00	3,00	981,61	0,44	0,66644675	0,44415128	0,08761788	0,48646996	0,35863161	0,083889126
20	454,35	0,50	1,00	3,00	981,61	0,46	0,68033965	0,46286203	0,099164146	0,49355505	0,37052053	0,094405954
21	492,62	0,50	1,00	3,00	981,61	0,50	0,70841062	0,50184561	0,126389321	0,50757377	0,39458773	0,118728318
22	533,88	0,50	1,00	3,00	981,61	0,54	0,73748585	0,54388539	0,16088745	0,52168504	0,41951156	0,14861211
23	573,67	0,50	1,00	3,00	981,61	0,58	0,76446978	0,58441404	0,199600638	0,53441927	0,4425676	0,180942212
24	605,15	0,50	1,00	3,00	981,61	0,62	0,78516699	0,6164872	0,234299947	0,54395646	0,46016255	0,208875515
25	618,98	0,50	1,00	3,00	981,61	0,63	0,79409048	0,63057969	0,250737877	0,54800786	0,46771685	0,221773664
26	655,50	0,50	1,00	3,00	981,61	0,67	0,81717837	0,66778048	0,297783867	0,55832385	0,48715442	0,257538207
27	666,93	0,50	1,00	3,00	981,61	0,68	0,82427218	0,67942462	0,313634506	0,56144593	0,49309143	0,269213923

28	746,20	0,50	1,00	3,00	981,61	0,76	0,87188285	0,7601797	0,439287466	0,58183653	0,53241761	0,355504518
29	843,83	0,50	1,00	3,00	981,61	0,86	0,92716889	0,85964215	0,635262338	0,60432768	0,57668646	0,470203516
30	923,37	0,50	1,00	3,00	981,61	0,94	0,96987912	0,94066551	0,832349371	0,62087114	0,60963204	0,564973953
31	934,63	0,50	1,00	3,00	981,61	0,95	0,97577828	0,95214325	0,863190944	0,62310109	0,61408697	0,578186052
32	1080,00	0,50	1,00	3,00	981,61	1,10	1,04892006	1,10023329	1,331847023	0,64968413	0,66720656	0,736010783
33	1128,53	0,50	1,00	3,00	981,61	1,15	1,07222939	1,14967587	1,519589387	0,65775533	0,68326058	0,781198289
34	1216,83	0,50	1,00	3,00	981,61	1,24	1,11338678	1,23963013	1,904918379	0,6715553	0,71050873	0,85116521
35	1291,65	0,50	1,00	3,00	981,61	1,32	1,14710438	1,31584845	2,278335214	0,68244504	0,73175337	0,89754537
36	1388,12	0,50	1,00	3,00	981,61	1,41	1,18916878	1,41412238	2,827880049	0,69552575	0,7568611	0,940861909
37	1629,27	0,50	1,00	3,00	981,61	1,66	1,28832846	1,65979021	4,572561916	0,7242687	0,80982113	0,989668543
38	1635,3	0,5	1	3	981,61	1,67	1,29071165	1,66593657	4,623548185	0,72492504	0,81098645	0,990182102
39	1892,68	0,5	1	3	981,61	1,93	1,38857548	1,92814186	7,168312852	0,75056963	0,85458185	0,999229378
40	2413,13	0,5	1	3	981,61	2,46	1,56791015	2,45834225	14,85686011	0,79151958	0,9144233	0,999999647
41	3243,12	0,5	1	3	981,61	3,3	1,81765644	3,30387493	36,06374256	0,83759409	0,96325948	1
42	4667,93	0,5	1	3	981,61	4,76	2,18068449	4,75538486	107,5367761	0,88703582	0,99139477	1
43	5211,77	0,5	1	3	981,61	5,31	2,30421498	5,30940666	149,6711066	0,90016286	0,99505514	1
44	5636,37	0,5	1	3	981,61	5,74	2,396239	5,74196134	189,3131542	0,90894021	0,99679153	1

Apéndice 15

Infiabilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, utilizando distribución de Weibull, para diferentes valores de β .

Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 16

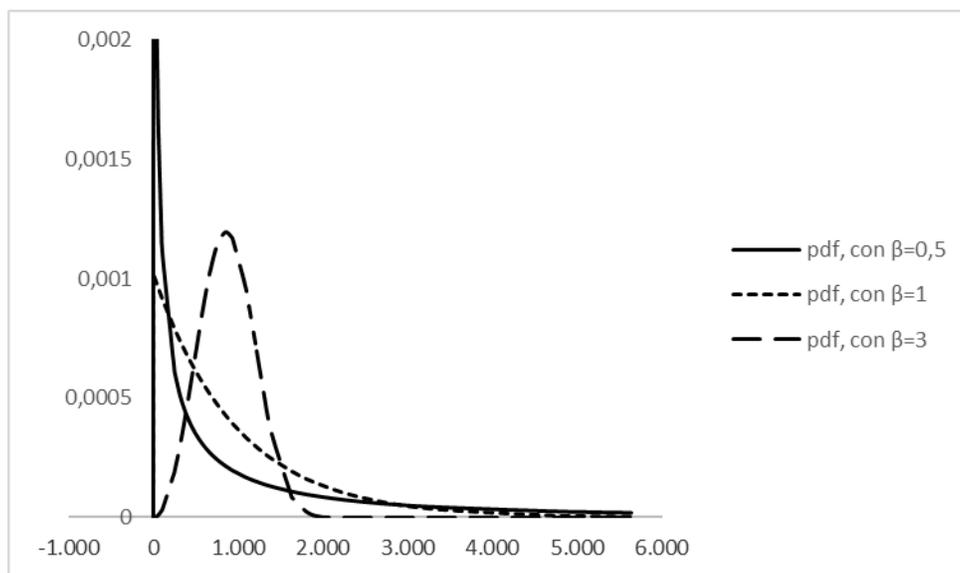
Tabla de datos de función densidad de probabilidad de las fallas (f(t) o pdf) de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β y $\gamma=0$. Fuente: la Autora, 2018.

Ítem	TPF Ordenados (Horas) (ti)	η	ti/ η	$\left(\frac{ti}{\eta}\right)^\beta$			$\left(\frac{ti}{\eta}\right)^{\beta-1}$			$e^{-\left(\frac{ti}{\eta}\right)^\beta}$			$f(ti) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{ti}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{ti}{\eta}\right)^\beta}$		
				$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$	$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$	$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$	$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$
1	0,00	981,61	0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1	1	1	0	0	0
2	0,00	981,61	0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1	1	1	0	0	0
3	0,00	981,61	0	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	1	1	1	0	0	0
4	2,00	981,61	0,002037469	0,045138	0,002037	0,000000	22,154119	1,000000	0,000004	0,955865246	0,997964605	0,999999992	0,010786541	0,001016661	1,26872E-08
5	6,88	981,61	0,007012289	0,083739	0,007012	0,000000	11,941808	1,000000	0,000049	0,919670879	0,993012239	0,999999655	0,005594143	0,001011616	1,5028E-07
6	21,83	981,61	0,022242371	0,149139	0,022242	0,000011	6,705165	1,000000	0,000495	0,86144957	0,978003167	0,999988996	0,002942188	0,000996326	1,51196E-06
7	27,12	981,61	0,027624685	0,166207	0,027625	0,000021	6,016603	1,000000	0,000763	0,846871123	0,972753388	0,999978919	0,002595372	0,000909977	2,33221E-06
8	41,23	981,61	0,04200582	0,204953	0,042006	0,000074	4,879162	1,000000	0,001764	0,814685431	0,9588642	0,999925884	0,002024726	0,000976828	5,39224E-06
9	50,22	981,61	0,051160848	0,226188	0,051161	0,000134	4,421108	1,000000	0,002617	0,797568433	0,950125832	0,999866099	0,001796098	0,000967926	7,99834E-06
10	59,85	981,61	0,060971261	0,246924	0,060971	0,000227	4,049836	1,000000	0,003717	0,781200379	0,940850278	0,999773365	0,001611502	0,000958477	1,13588E-05
11	91,92	981,61	0,093638682	0,306004	0,093639	0,000821	3,267927	1,000000	0,008768	0,736383392	0,910611723	0,999179294	0,001225765	0,000927672	2,67754E-05
12	108,83	981,61	0,110872274	0,332975	0,110872	0,001363	3,003230	1,000000	0,012293	0,716788196	0,895053063	0,998638013	0,001096504	0,000911821	3,75177E-05
13	247,33	981,61	0,251967007	0,501963	0,251967	0,015997	1,992178	1,000000	0,063487	0,605341115	0,777270382	0,984130545	0,00061427	0,000791832	0,000190951
14	249,88	981,61	0,25456478	0,504544	0,254565	0,016497	1,981987	1,000000	0,064803	0,603780758	0,775253831	0,983638705	0,000609553	0,000789778	0,000194811
15	300,93	981,61	0,306571177	0,553689	0,306571	0,028813	1,806069	1,000000	0,093986	0,574825536	0,735966132	0,971597783	0,000528812	0,000749754	0,000279082
16	311,72	981,61	0,317556531	0,563522	0,317557	0,032023	1,774555	1,000000	0,100842	0,569201063	0,727925529	0,968484226	0,000514501	0,000741563	0,000298481
17	353,23	981,61	0,359850993	0,599876	0,359851	0,046598	1,667012	1,000000	0,129493	0,548879795	0,697780292	0,954470932	0,000466065	0,000710853	0,000377738
18	397,98	981,61	0,405439363	0,636741	0,405439	0,066647	1,570497	1,000000	0,164381	0,529013564	0,66668383	0,935525796	0,000423189	0,000679174	0,000469991
19	435,98	981,61	0,444151275	0,666447	0,444151	0,087618	1,500495	1,000000	0,197270	0,513530039	0,64136839	0,916110874	0,000392493	0,000653384	0,000552322
20	454,35	981,61	0,462862033	0,680340	0,462862	0,099164	1,469854	1,000000	0,214241	0,506444952	0,629479474	0,905594046	0,000379173	0,000641272	0,000592951
21	492,62	981,61	0,501845607	0,708411	0,501846	0,126389	1,411611	1,000000	0,251849	0,492426228	0,605412275	0,881271682	0,000354068	0,000616754	0,000678316
22	533,88	981,61	0,543885386	0,737486	0,543885	0,160887	1,355958	1,000000	0,295811	0,478314958	0,580488444	0,85138789	0,000330363	0,000591364	0,000769705
23	573,67	981,61	0,584414041	0,764470	0,584414	0,199601	1,308096	1,000000	0,341540	0,465580727	0,557432399	0,819057788	0,000310217	0,000567876	0,000854945
24	605,15	981,61	0,6164872	0,785167	0,616487	0,234300	1,273614	1,000000	0,380056	0,456043541	0,539837452	0,791124485	0,000295853	0,000549951	0,000918915
25	618,98	981,61	0,630579694	0,794090	0,630580	0,250738	1,259302	1,000000	0,397631	0,451992143	0,53228315	0,778226336	0,000289929	0,000542255	0,000945732
26	655,50	981,61	0,667780483	0,817178	0,667780	0,297784	1,223723	1,000000	0,445931	0,441676146	0,512845585	0,742461793	0,000275308	0,000522454	0,001011868

27	666.93	981.61	0.679424619	0.824272	0.679425	0.313635	1.213192	1.000000	0.461618	0.438554067	0.506908574	0.730786077	0.000271009	0.000516405	0.001030992
28	746.20	981.61	0.760179705	0.871883	0.760180	0.439287	1.146943	1.000000	0.577873	0.418163468	0.467582393	0.644495482	0.000244297	0.000476342	0.001138242
29	843.83	981.61	0.859642153	0.927169	0.859642	0.635262	1.078552	1.000000	0.738985	0.395672318	0.423313537	0.529796484	0.000217374	0.000431244	0.001196539
30	923.37	981.61	0.940665505	0.969879	0.940666	0.832349	1.031056	1.000000	0.884852	0.379128865	0.390367957	0.435026047	0.000199113	0.000397681	0.001176435
31	934.63	981.61	0.952143248	0.975778	0.952143	0.863191	1.024823	1.000000	0.906577	0.376898907	0.385913029	0.421813948	0.000196745	0.000393143	0.001168713
32	1.080,00	981.61	1.10023329	1.048920	1.100233	1.331847	0.953361	1.000000	1.210513	0.350315865	0.332793437	0.263989217	0.000170117	0.000339028	0.000976648
33	1.128.53	981.61	1.149675873	1.072229	1.149676	1.519589	0.932636	1.000000	1.321755	0.342244668	0.316739417	0.218801711	0.000162585	0.000322673	0.000883861
34	1.216.83	981.61	1.239630131	1.113387	1.239630	1.904918	0.898160	1.000000	1.536683	0.328444704	0.289491272	0.14883479	0.000150261	0.000294915	0.00069899
35	1.291.65	981.61	1.315848453	1.147104	1.315848	2.278335	0.871760	1.000000	1.731457	0.317554959	0.268246632	0.10245463	0.000141009	0.000273272	0.000542158
36	1.388.12	981.61	1.414122377	1.189169	1.414122	2.827880	0.840924	1.000000	1.999742	0.304474245	0.243138904	0.059138091	0.000130418	0.000247694	0.000361429
37	1.629.27	981.61	1.659790209	1.288328	1.659790	4.572562	0.776200	1.000000	2.754904	0.275731295	0.190178874	0.010331457	0.000109016	0.000193742	8.69862E-05
38	1.635.30	981.61	1.665936574	1.290712	1.665937	4.623548	0.774766	1.000000	2.775345	0.275074955	0.18901355	0.009817898	0.000108556	0.000192555	8.32756E-05
39	1.892.68	981.61	1.928141862	1.388575	1.928142	7.168313	0.720163	1.000000	3.717731	0.24943037	0.145418155	0.000770622	9.14978E-05	0.000148142	8.75591E-06
40	2.413.13	981.61	2.458342247	1.567910	2.458342	14.856860	0.637792	1.000000	6.043447	0.20848042	0.085576698	3.52978E-07	6.77291E-05	8.71799E-05	6.5195E-09
41	3.243.12	981.61	3.303874927	1.817656	3.303875	36.063743	0.550159	1.000000	10.915590	0.162405914	0.036740524	2.17628E-16	4.55115E-05	3.74288E-05	7.26014E-18
42	4.667.93	981.61	4.755384861	2.180684	4.755385	107.536776	0.458572	1.000000	22.613685	0.112964181	0.008605232	1.98322E-47	2.63863E-05	8.76645E-06	1.37065E-48
43	5.211.77	981.61	5.309406655	2.304215	5.309407	149.671107	0.433987	1.000000	28.189799	0.099837144	0.00494486	9.96929E-66	2.20699E-05	5.0375E-06	8.58892E-67
44	5.636.37	981.61	5.741961336	2.396239	5.741961	189.313154	0.417321	1.000000	32.970120	0.091059786	0.003208469	6.05817E-83	1.93565E-05	3.26858E-06	6.10442E-84

Apéndice 17

Función densidad de probabilidad de las fallas de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β y $\gamma=0$. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 18

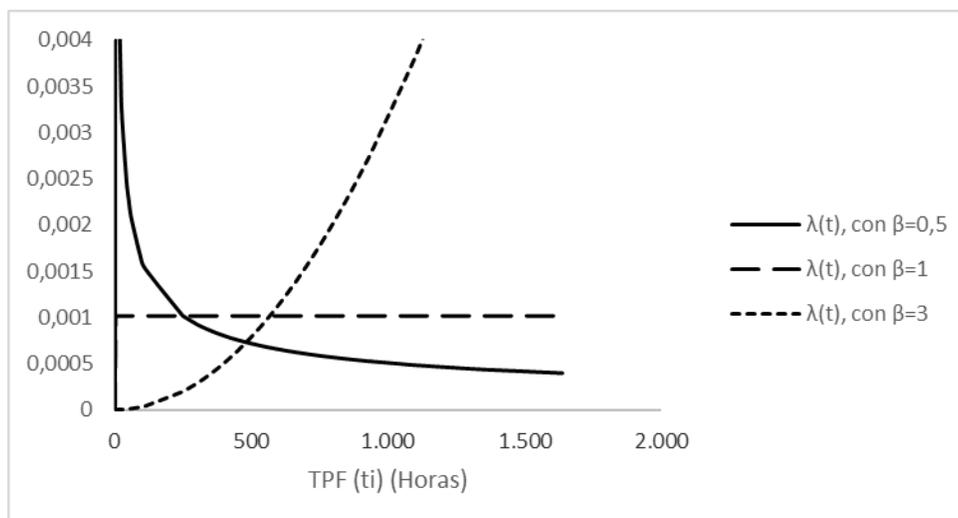
Tabla de datos de la tasa de fallas ($r(ti)$ o $\lambda(ti)$) de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β y $\gamma=0$. Fuente: la Autora, 2018.

Ítem	TPF Ordenados (Horas) (ti)	η	β/η			ti/ η	$\left(\frac{ti}{\eta}\right)^{\beta-1}$			$r(ti) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{ti-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$		
			$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$		$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$	$\beta=0,5$	$\beta=1$	$\beta=3$
1	0,00	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0	0	0	0	0	0	0
2	0,00	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0	0	0	0	0	0	0
3	0,00	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0	0	0	0	0	0	0
4	2,00	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,002037469	22,15	1	4,15128E-06	0,011284583	0,001018735	1,26872E-08
5	6,88	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,007012289	11,94	1	4,91722E-05	0,006082766	0,001018735	1,5028E-07
6	21,83	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,022242371	6,705	1	0,000494723	0,003415392	0,001018735	1,51197E-06
7	27,12	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,027624685	6,017	1	0,000763123	0,00306466	0,001018735	2,33226E-06
8	41,23	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,04200582	4,879	1	0,001764489	0,002485286	0,001018735	5,39264E-06
9	50,22	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,051160848	4,421	1	0,002617432	0,002251968	0,001018735	7,99941E-06
10	59,85	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,060971261	4,05	1	0,003717495	0,002062854	0,001018735	1,13614E-05
11	91,92	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,093638682	3,268	1	0,008768203	0,001664575	0,001018735	2,67974E-05
12	108,83	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,110872274	3,003	1	0,012292661	0,001529747	0,001018735	3,75689E-05
13	247,33	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,251967007	1,992	1	0,063487372	0,00101475	0,001018735	0,00019403
14	249,88	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,25456478	1,982	1	0,064803227	0,001009559	0,001018735	0,000198052
15	300,93	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,306571177	1,806	1	0,093985887	0,000919952	0,001018735	0,00028724
16	311,72	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,317556531	1,775	1	0,100842151	0,0009039	0,001018735	0,000308194
17	353,23	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,359850993	1,667	1	0,129492737	0,000849121	0,001018735	0,000395756
18	397,98	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,405439363	1,57	1	0,164381077	0,00079996	0,001018735	0,000502382
19	435,98	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,444151275	1,5	1	0,197270355	0,000764303	0,001018735	0,000602898
20	454,35	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,462862033	1,47	1	0,214241261	0,000748696	0,001018735	0,000654765
21	492,62	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,501845607	1,412	1	0,251849014	0,000719028	0,001018735	0,000769702
22	533,88	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,543885386	1,356	1	0,295811313	0,000690681	0,001018735	0,00090406
23	573,67	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,584414041	1,308	1	0,341539771	0,000666301	0,001018735	0,001043815
24	605,15	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,6164872	1,274	1	0,380056467	0,000648737	0,001018735	0,00116153
25	618,98	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,630579694	1,259	1	0,39763075	0,000641447	0,001018735	0,001215241
26	655,50	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,667780483	1,224	1	0,445930774	0,000623324	0,001018735	0,001362855
27	666,93	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,679424619	1,213	1	0,461617813	0,00061796	0,001018735	0,001410798

28	746,20	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,760179705	1,147	1	0,577873184	0,000584215	0,001018735	0,001766098
29	843,83	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,859642153	1,079	1	0,73898463	0,000549379	0,001018735	0,002258487
30	923,37	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,940665505	1,031	1	0,884851593	0,000525186	0,001018735	0,002704287
31	934,63	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	0,952143248	1,025	1	0,906576764	0,000522011	0,001018735	0,002770683
32	1080,00	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	1,10023329	0,953	1	1,210513293	0,000485611	0,001018735	0,003699575
33	1128,53	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	1,149675873	0,933	1	1,321754612	0,000475054	0,001018735	0,004039551
34	1216,83	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	1,239630131	0,898	1	1,536682863	0,000457494	0,001018735	0,004696416
35	1291,65	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	1,315848453	0,872	1	1,731457151	0,000444046	0,001018735	0,005291686
36	1388,12	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	1,414122377	0,841	1	1,999742098	0,000428339	0,001018735	0,006111619
37	1629,27	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	1,659790209	0,776	1	2,754903537	0,000395371	0,001018735	0,008419546
38	1635,30	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	1,665936574	0,775	1	2,775344667	0,000394641	0,001018735	0,008482018
39	1892,683333	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	1,928141862	0,72	1	3,717731041	0,000366827	0,001018735	0,011362143
40	2413,133333	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	2,458342247	0,638	1	6,043446605	0,00032487	0,001018735	0,018470003
41	3243,116667	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	3,303874927	0,55	1	10,91558953	0,000280233	0,001018735	0,033360264
42	4667,933333	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	4,755384861	0,459	1	22,61368518	0,000233581	0,001018735	0,069112026
43	5211,766667	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	5,309406655	0,434	1	28,18979903	0,000221059	0,001018735	0,086153765
44	5636,366667	981,61	0,000509367	0,001018735	0,003056204	5,741961336	0,417	1	32,97011998	0,000212569	0,001018735	0,100763399

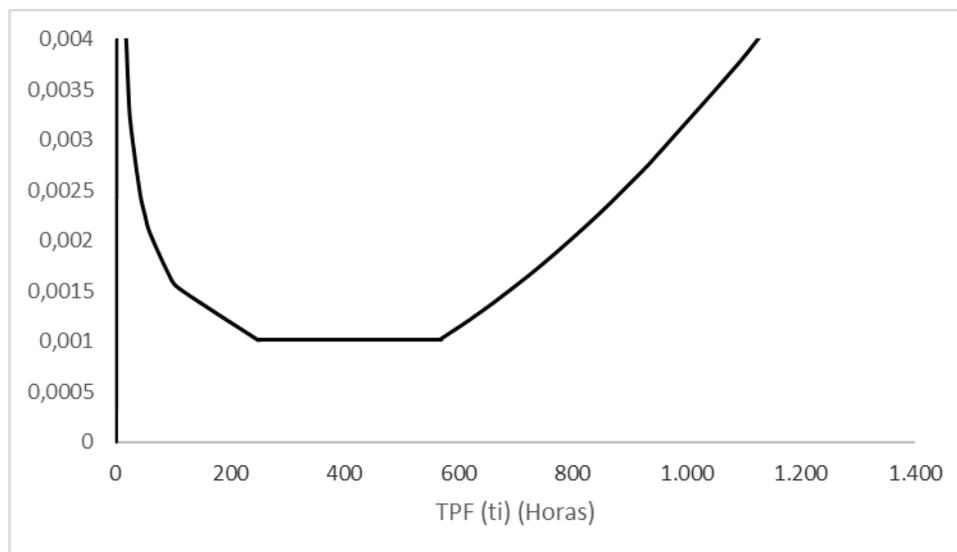
Apéndice 19

Tasa de fallas ($r(t_i)$ o $\lambda(t)$) de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución de Weibull, para diferentes valores de β . Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 20

Curva de la Bañera de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 21

Tabla de datos de disponibilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial.

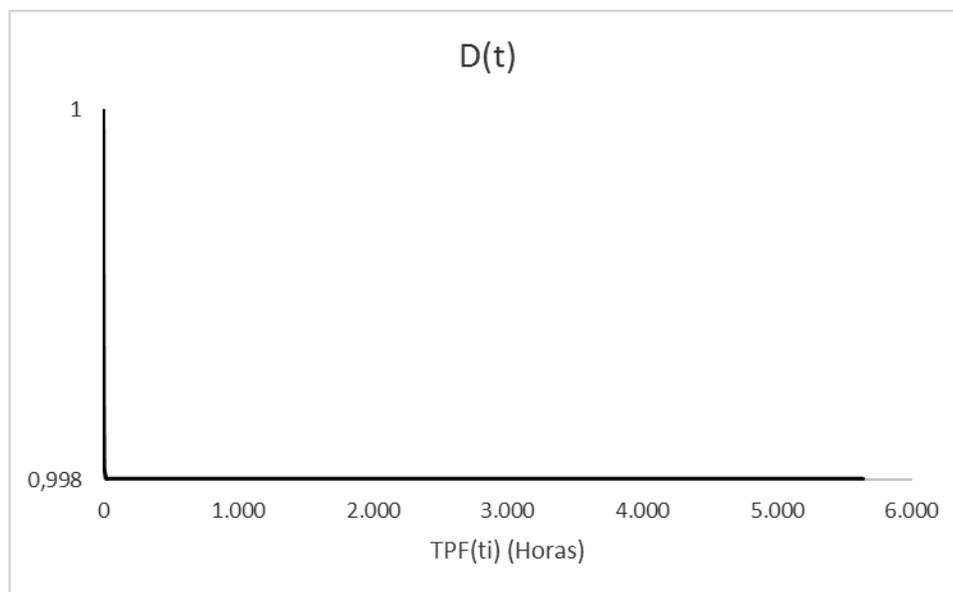
Fuente: la Autora, 2018.

Ítem	TPF (Horas)	TPF Ordenados (Horas) (ti)	μ	λ	$\frac{\mu}{\mu + \lambda}$	$\frac{\lambda}{\mu + \lambda}$	$e^{-(\lambda+\mu)*ti}$	$D(ti) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda+\mu)*\tau}$
1	59,85	0,00	0,5097	0,001019	0,9980054	0,001994623	1	1
2	1.892,68	0,00	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	1	1
3	573,67	0,00	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	1	1
4	843,83	2,00	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	0,360076777	0,998723609
5	1.388,12	6,88	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	0,029734446	0,998064708
6	3.243,12	21,83	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	1,43653E-05	0,998005429
7	91,92	27,12	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	9,67068E-07	0,998005402
8	533,88	41,23	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	7,15066E-10	0,9980054
9	746,20	50,22	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	7,26242E-12	0,9980054
10	1.080,00	59,85	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	5,31036E-14	0,9980054
11	934,63	91,92	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	4,09882E-21	0,9980054
12	300,93	108,83	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	7,25272E-25	0,9980054
13	0,00	247,33	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	1,38313E-55	0,9980054
14	311,72	249,88	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	3,76068E-56	0,9980054
15	1.629,27	300,93	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	1,78752E-67	0,9980054
16	492,62	311,72	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	7,2524E-70	0,9980054
17	435,98	353,23	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	4,48728E-79	0,9980054
18	618,98	397,98	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	5,32506E-89	0,9980054
19	0,00	435,98	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	1,98532E-97	0,9980054
20	397,98	454,35	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	1,6752E-101	0,9980054
21	249,88	492,62	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	5,4503E-110	0,9980054
22	923,37	533,88	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	3,8315E-119	0,9980054
23	2.413,13	573,67	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	5,7455E-128	0,9980054
24	41,23	605,15	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	5,9738E-135	0,9980054
25	655,50	618,98	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	5,1049E-138	0,9980054
26	21,83	655,50	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	4,0597E-146	0,9980054
27	6,88	666,93	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	1,1838E-148	0,9980054
28	0,00	746,20	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	3,0975E-166	0,9980054
29	454,35	843,83	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	6,8502E-188	0,9980054
30	108,83	923,37	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	1,5668E-205	0,9980054
31	4.667,93	934,63	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	4,9664E-208	0,9980054
32	27,12	1.080,00	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	2,8403E-240	0,9980054
33	605,15	1.128,53	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	4,8815E-251	0,9980054
34	247,33	1.216,83	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	1,2688E-270	0,9980054
35	1.291,65	1.291,65	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	3,2276E-287	0,9980054
36	5.636,37	1.388,12	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	0	0,9980054
37	1.216,83	1.629,27	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	0	0,9980054
38	5.211,77	1.635,30	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	0	0,9980054
39	1.128,53	1.892,68	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	0	0,9980054
40	50,22	2.413,13	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	0	0,9980054

41	1.635,30	3.243,12	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	0	0,9980054
42	2,00	4.667,93	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	0	0,9980054
43	666,93	5.211,77	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	0	0,9980054
44	353,23	5.636,37	0,5097	0,001019	0,9980054	0,0019946	0	0,9980054

Apéndice 22

Disponibilidad de la Subestación Guacara I, para el para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 23

Tabla de datos de mantenibilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial.

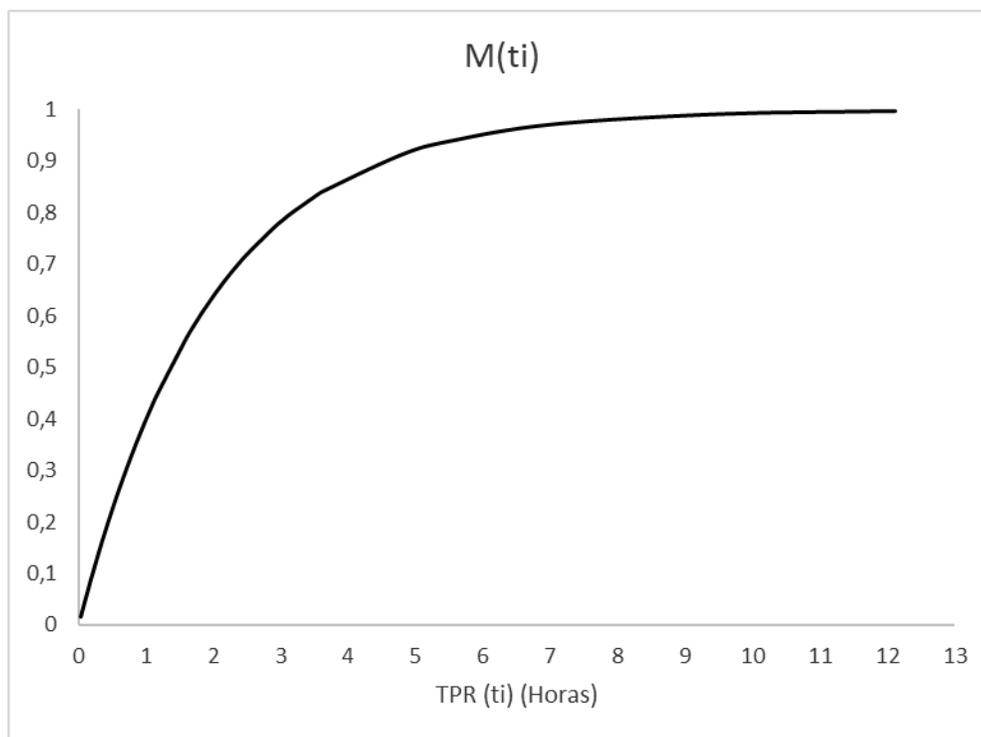
Fuente: la Autora, 2018.

No.	TPR (ti)	TPR ordenados (ti) (Horas)	μ	$\mu * ti$	$e^{-\mu * ti}$	$M(ti) = 1 - e^{-\mu * ti}$
1	0,18	0,03	0,5097	0,01699000	0,983153516	0,016846484
2	9,55	0,07	0,5097	0,03398000	0,966590836	0,033409164
3	2,88	0,17	0,5097	0,08495000	0,918558211	0,081441789
4	0,50	0,18	0,5097	0,09344500	0,910788109	0,089211891
5	1,73	0,23	0,5097	0,11893000	0,887869949	0,112130051
6	0,23	0,28	0,5097	0,14441500	0,865528479	0,134471521
7	0,47	0,30	0,5097	0,15291000	0,858206957	0,141793043
8	0,58	0,33	0,5097	0,16990000	0,843749187	0,156250813
9	0,72	0,38	0,5097	0,19538500	0,822517928	0,177482072
10	0,28	0,40	0,5097	0,20388000	0,815560233	0,184439767
11	1,17	0,43	0,5097	0,22087000	0,80182091	0,19817909
12	0,78	0,47	0,5097	0,23786000	0,788313047	0,211686953
13	0,40	0,50	0,5097	0,25485000	0,775032744	0,224967256
14	1,83	0,50	0,5097	0,25485000	0,775032744	0,224967256
15	12,12	0,58	0,5097	0,29732500	0,742802562	0,257197438
16	1,07	0,67	0,5097	0,33980000	0,711912691	0,288087309
17	3,55	0,70	0,5097	0,35679000	0,699919465	0,300080535
18	0,33	0,72	0,5097	0,36528500	0,693998833	0,306001167
19	0,03	0,78	0,5097	0,39926500	0,670812912	0,329187088
20	2,15	0,85	0,5097	0,43324500	0,648401614	0,351598386
21	4,77	0,88	0,5097	0,45023500	0,637478327	0,362521673
22	3,17	0,92	0,5097	0,46722500	0,626739058	0,373260942
23	0,17	0,97	0,5097	0,49271000	0,610968424	0,389031576
24	2,37	1,00	0,5097	0,50970000	0,600675755	0,399324245
25	1,60	1,07	0,5097	0,54368000	0,58060768	0,41939232
26	2,50	1,17	0,5097	0,59465000	0,551755647	0,448244353
27	2,27	1,60	0,5097	0,81552000	0,442409215	0,557590785
28	0,38	1,73	0,5097	0,88348000	0,413341976	0,586658024
29	2,00	1,83	0,5097	0,93445000	0,392801847	0,607198153
30	2,00	2,00	0,5097	1,01940000	0,360811362	0,639188638
31	0,85	2,00	0,5097	1,01940000	0,360811362	0,639188638
32	0,30	2,15	0,5097	1,09585500	0,334253698	0,665746302
33	0,92	2,27	0,5097	1,15532000	0,314956735	0,685043265
34	0,70	2,37	0,5097	1,20629000	0,299305646	0,700694354
35	7,03	2,50	0,5097	1,27425000	0,27964062	0,72035938
36	0,43	2,88	0,5097	1,46963500	0,230009423	0,769990577
37	0,88	3,05	0,5097	1,55458500	0,211277044	0,788722956
38	0,67	3,17	0,5097	1,61405000	0,199079706	0,800920294
39	0,50	3,55	0,5097	1,80943500	0,163746628	0,836253372
40	3,62	3,62	0,5097	1,84341500	0,15827599	0,84172401
41	1,00	4,77	0,5097	2,42957000	0,088074697	0,911925303

42	0,07	5,52	0,5097	2,81184500	0,060094017	0,939905983
43	0,97	7,03	0,5097	3,58489000	0,027739719	0,972260281
44	5,52	9,55	0,5097	4,86763500	0,007691534	0,992308466
45	3,05	12,12	0,5097	6,17586500	0,002079007	0,997920993

Apéndice 24

Mantenibilidad de la subestación Guacara I, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 25

Análisis de modos y efectos de fallas del transformador de potencia. Fuente: la Autora, 2018.

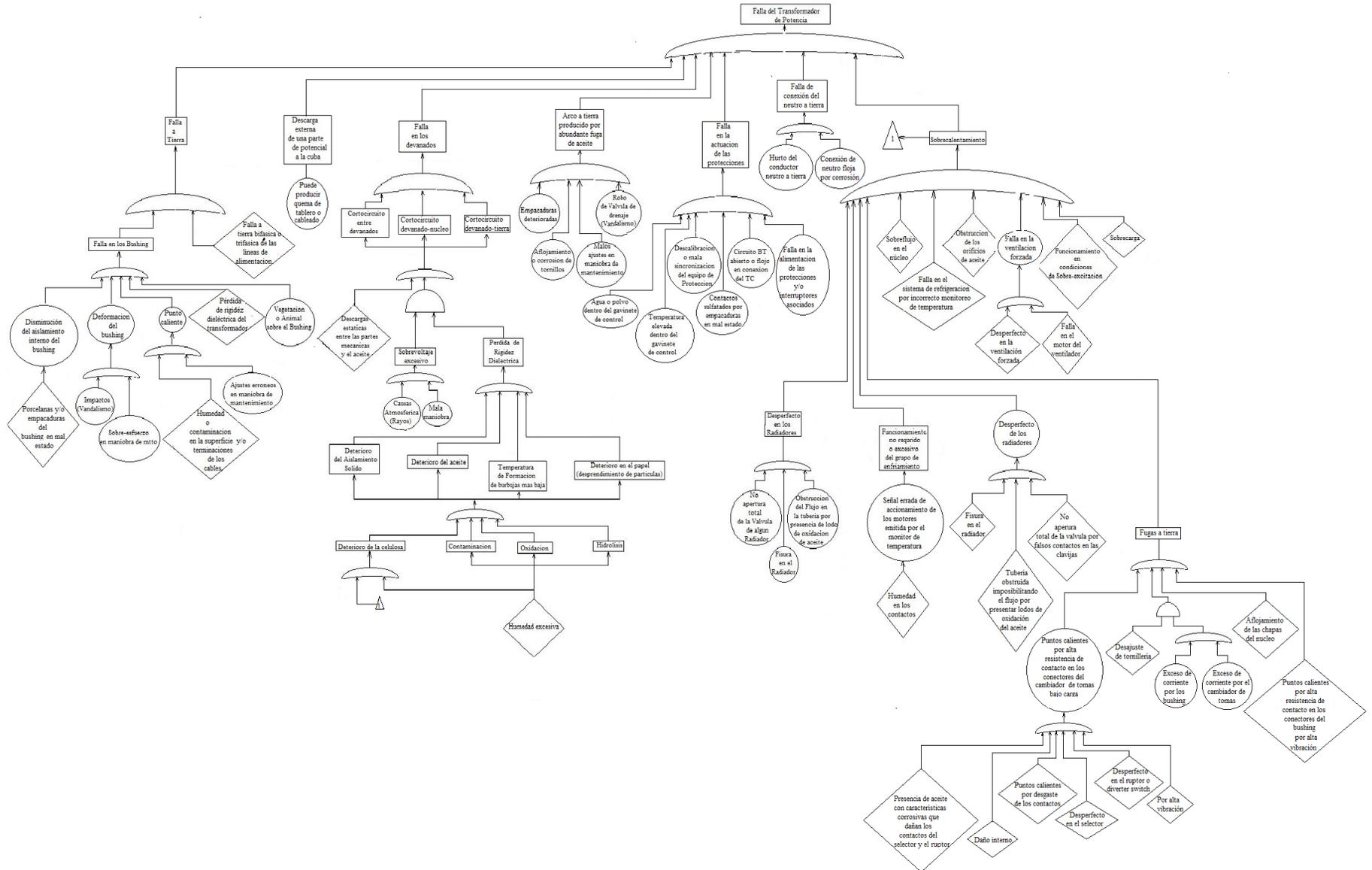
Hoja de AMEF	FECHA:	11/ 2018	Subestación eléctrica	Elaborado por: Ing. María Angélica Terán T.
No.	Modos de fallas	Efecto de las fallas	Posible causa	
T1A	Falla a Tierra	Se activan las protecciones produciendo disparo de los disyuntores asociados, dejando fuera de servicio el transformador.	a.- Porcelanas y/o empaadura del bushing en mal estado que originan disminución del aislamiento interno del bushing	
T1B			b.-Punto caliente en el bushing originado por humedad o contaminación en la superficie y/o terminaciones de los cables o malos ajustes en maniobra de mantenimiento	
T1C			c.- Deformación del bushing por sobre esfuerzo en maniobra de mantenimiento y/o vandalismo	
T1D			d.- Corto circuito por vegetación o animal sobre los bushing u otro elemento	
T1E			e.- Pérdida de rigidez dieléctrica del transformador	
T1F			f.- Falla a tierra bifásicas o trifásicas de los circuitos o líneas de alimentación	
T2	Descarga externa de una parte de potencial a la cuba	Puede producir quema de tablero y/o cableado, generando la descarga, y si el cableado de la corriente continua que alimenta a los transformadores de corriente se quema, la falla no es despejada originando daño al transformador	Incendio por maleza o explosión de un equipo vecino	
T3A	Falla en los devanados	Puede producir CC devanado-núcleo, CC entre devanados, CC devanado-tierra y/o CC entre espiras. Producen arcos eléctricos Operan las protecciones y disparan los disyuntores asociados al transformador, dejando el transformador fuera de servicio.	a.- Sobrevoltaje: Operación bajo voltajes de falla por maniobra o por causas atmosféricas (rayos) simultáneo con la presencia de pérdida de rigidez dieléctrica producida por: a.1.- Exceso de humedad y/o sobrecalentamiento, que origina degradación de la celulosa a.2.- Humedad que produce oxidación, hidrólisis y contaminación del aceite.	
T3B			b.- Existencia de humedad en el aceite o papel.	
T3C			c.-Descargas estáticas entre las partes metálicas y el aceite.	
T4A	Arco a tierra producido por abundante fuga del aceite a través de la cuba, tanque de expansión, radiadores o instrumentos	Una fuga de aceite puede exponer partes energizadas a espacios sin aceite y propiciar un arco; produciendo la actuación de las protecciones de bajo nivel, buchholz y las protecciones externas si se desata un arco interno (como la protección diferencial).	a.- Corrosión de tornillos.	
T4B			b.- Aflojamiento de tornillería, puede darse por movimiento brusco en el traslado.	
T4C			c.-Robo de válvula de drenaje, vandalismo.	
T4D			d.-Empaadura deteriorada	
T4E			e.- Malos ajustes en maniobras de mantenimiento	
T5A	Falla en la actuación de las protecciones internas y externas	No actuación o disparo erróneo de un dispositivo de protección mecánica o eléctrica	a.- Falla en la alimentación de corriente continua de las protecciones, no actuando las protecciones ante una falla, dejando desprotegido al transformador	
T5B			b.- Temperatura elevada dentro del gabinete de control	
T5C			c.- Contactos sulfatados por empaadura dañada, ingresando agua oxidando los contactos.	

T5D			d.- Mal ajuste, descalibración o mala coordinación de las protecciones y/o daños en sus distintos módulos
T5E			e.- Circuito de Baja Tensión abierto o flojo en los transformadores de corriente
T5F			f.- Agua o polvo dentro del gabinete de control
T6A	Falla en la ventilación forzada	Sobrecalentamiento. Incremento de la temperatura por mal funcionamiento del Sistema de enfriamiento. Se activan las alarmas por sobrecalentamiento en el aceite y en los devanados. Al no reparar la falla, operan las protecciones aperturando el disyuntor, desenergizando el transformador. De no actuar las protecciones la alta temperatura daña los devanados, el papel aislante, no permitiendo alcanzar la potencia nominal y en caso extremo desconectando el transformador, disminuyendo la vida útil del equipo.	a.-Desperfecto en las señales del monitoreo de temperatura
T6B			b.- Falla en el motor del ventilador.
T6C			c.- Falla mecánica en los ventiladores
T7A	Desperfecto de los radiadores	Produce pérdidas excesivas en el hierro y sobrecalentamiento del núcleo. El relé del sobreflujo magnético detecta la anomalía y se dispara	a.-Fisura en el radiador.
T7B			b.-No apertura total de la válvula de algún radiador por posibles falsos contactos en las clavijas.
T7C			c.-Tubería obstruida no permitiendo el flujo por presentar lodos de oxidación del aceite
T8A	Sobreflujo Magnético en el núcleo	Produce pérdidas excesivas en el hierro y sobrecalentamiento del núcleo. El relé del sobreflujo magnético detecta la anomalía y se dispara	a.- Funcionamiento del Transformador a un nivel anormalmente elevado de voltaje que genera pérdidas excesivas en el hierro
T8B			b.- Operación por debajo de su frecuencia normal
T9A	Falla de conexión del neutro a tierra.	Presencia de un neutro flotante con alta impedancia, exponiendo al sistema a desbalances y sobre tensiones, dejando inoperantes las protecciones de falla a tierra, desmejorando la calidad de servicio, la seguridad humana y dañando el sistema de aislamiento. Puede ocasionar Sobre flujo magnético	a.- Hurto del conductor neutro a tierra
T9B			b.-Existencia de pequeños arcos o cortos circuitos en los distintos pasos del cambiador de tomas bajo carga o sin carga.
T9C			c.- Conexión de neutro floja por corrosión.

T10		<p>Sobrecalentamiento por accionamiento no requerido o excesivo del grupo de enfriamiento (ventilación). Bajo rendimiento del Transformador, pérdida de la vida útil de los motores de ventilación y de los terminales por arcos de baja intensidad provocando aumento de temperatura en el aceite. En caso extremo se desconectan los contactos de alguna de las fases y opera el relé diferencial indisponiendo el equipo.</p>	<p>Señal errada de accionamiento de los motores emitida por el monitor de temperatura, posiblemente por humedad en los contactos.</p>
T11A	Sobrecalentamiento.	<p>Sobrecalentamiento por Fugas a tierra. Bajo rendimiento del Transformado. En caso extremo se desconectan los contactos de alguna de las fases y opera el relé diferencial indisponiendo el equipo.</p>	a.- Desajustes de tornillería y exceso de corriente por los bushing y/o cambiador de tomas (bajo carga).
T11B			b.- Aflojamiento de las chapas del núcleo.
T11C			<p>c.-Puntos calientes por alta resistencia de contactos en los conectores del TAP del cambiador de tomas bajo carga, por:</p> <p>c.1.- Alta vibración. c.2.-Desperfecto en el selector c.3.- Desperfecto en el ruptor o diverter switch c.4.- Desgaste en los contactos c.5.- Presencia de aceite con características corrosivas que dañan la superficie de los contactos en el selector y en el ruptor provocando sendos arcos y falla del transformador</p>
T11D			d.-Puntos calientes por alta resistencia de contactos en los conectores del bushing
T12A			a.- Falla en el sistema de refrigeración por incorrecto monitoreo de temperatura.
T12B			b.- Funcionamiento del transformador por encima de su capacidad nominal durante mucho tiempo (sobrecarga).
T12C			c.-Desperfecto en los radiadores.
T12D	d.- Conductores de aceite obstruidos.		
T12E	e.-Transformador operando en condiciones de sobreexcitación (sobre voltaje o baja frecuencia) originando un sobrecalentamiento por aislamiento del flujo magnético en el núcleo o estructuras cercanas.		
T13	Diversas	Diversas	Mala maniobra

Apéndice 26

Árbol de fallas del transformador de potencia. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 27

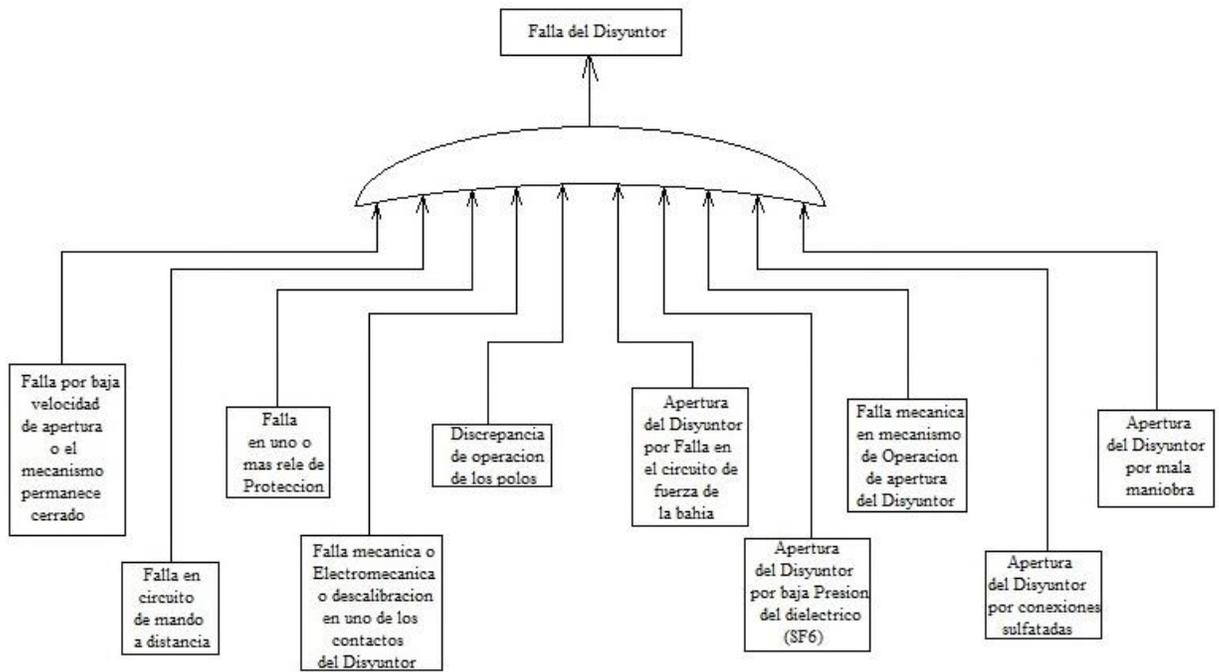
Análisis de modos y efectos de fallas del disyuntor de potencia. Fuente: la Autora, 2018.

Hoja de AMEF	FECHA: 11/ 2018	Subestación Eléctrica	Elaborado por: Ing. María Angélica Terán
		Equipo: Disyuntor	Aprobado por: MSc. Ing. César A. Salazar V.
No.	Modos de fallas	Efecto de las fallas	Posible Causa
I1A	Falla por baja velocidad para apertura o el mecanismo permanece cerrado	No accionamiento de apertura	a.- Resortes débiles o rotos.
I1B			b.- Baja presión en el sistema aislante y extinción del arco o en el sistema neumático o hidráulico de control
I1C			c.- Operación inadecuada de los bloqueos mecánicos
I1D			d.- Exceso de fricción en las juntas móviles
I2A	Falla en el circuito de mando a distancia.	No operación de apertura/cierre del disyuntor desde el sitio de control, siendo necesario operar manual y mecánicamente o transferir la bahía hasta habilitar el disyuntor. Afecta las operaciones.	a.- Desperfecto de elementos del circuito de control
I2B			b.- Hurto por robo del tablero de control, vandalismo
I2C			c.- Desenergización del tablero de control o cable de control flojo
I3A	Falla en uno o más relés de protección	La protección primaria-secundaria del circuito no acciona, disparando el relé instantáneo en fase, ocasionando una reacción en cadena, habilitando el relé de la bahía, disparando y bloqueando todos los disyuntores que están conectados a la barra en la que está el disyuntor que tiene fallado el relé de protección	a.- Falla en la coordinación de protecciones.
I3B			b.- Falta de protecciones en los circuitos asociados.
I4A	Falla mecánica, electromecánica o descalibración en uno o más contactos auxiliares del disyuntor	Descalibración del equipo o presencia de alta resistencia, impidiendo el paso de corriente. Afecta las operaciones.	a.- Desperfecto de los bloqueos mecánicos
I4B			b.- Desperfecto de las bobinas de cierre
I4C			c.- Existencia de corrosión en contactos mecánicos por sulfatación.
I4D			d.- Descalibración o no sincronización del equipo electromecánico.
I5A	Discrepancia de operación de los polos.	Uno o más polos no operan al mando del disyuntor. Actúa la protección interna a través de los relés respectivos, los mismos que dan una nueva orden de disparo al disyuntor. Si esto no sucede operan los relés de barra enviando el mando de apertura a todos los interruptores de la barra principal. Afecta a operaciones y al SEN	a.- Mecanismo de accionamiento irregular
I5B			b.- Descalibración del equipo

I6	Apertura del disyuntor por falla en el circuito de fuerza de la bahía.	Actúa la protección del relé diferencial o de sobre-corriente del transformador y dispara el disyuntor (disparo del disyuntor por falla en la línea). Afectando las operaciones.	Falla en circuito de Fuerza de la bahía
I7	Apertura del disyuntor por baja presión del dieléctrico (SF6).	Actúa las protecciones internas por baja presión, se abre e disyuntor. Afecta a operaciones, el servicio y el SEN.	Fugas de dieléctrico (SF6)
I8A	Falla mecánica en mecanismo de apertura del disyuntor (compresor, barra tractora o resorte de recarga)	Se activan las protecciones internas por baja presión de aire comprimido, se abre el interruptor a través del relé (disyuntores de aire-resorte). El resorte de recarga está bloqueado e su posición de activación. Incorrecto funcionamiento del motor	a.- Desperfectos de los bloqueos mecánicos
I8B			b.- Desperfecto de las bobinas de cierre
I8C			c.- Desperfecto en el funcionamiento del sistema mando neumático del disyuntor.
I8D			d.- Fuga de aire comprimido
I8E			e.- Falta de lubricación en la caja de engranaje, ejes y bloqueadores.
I9	Apertura del disyuntor por conexiones sulfatadas	Se desenergiza el transformador	Conexiones de control sulfatadas
I10	Apertura de disyuntor por mala maniobra	Desenergización del circuito	El operador abre el disyuntor por error, por falta de conocimiento

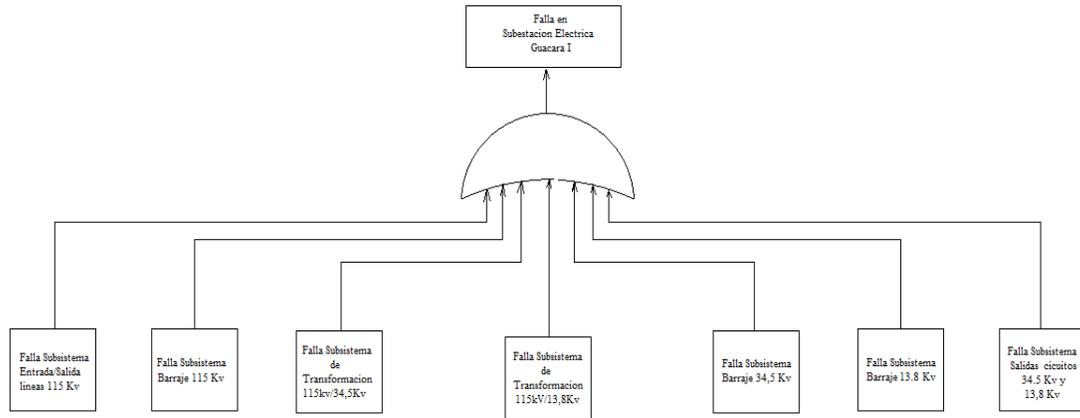
Apéndice 28

Árbol de fallas del disyuntor de potencia. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 29

Árbol de fallas de la subestación Guacara I. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 30

Tabla de datos de confiabilidad e infiabilidad del transformador 1, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial.

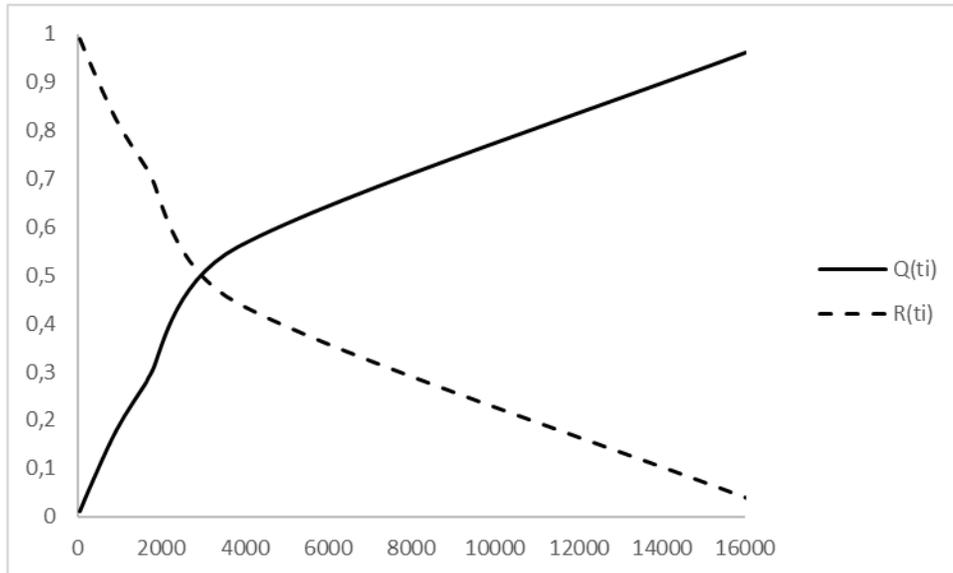
Fuente: la Autora, 2018.

Ítem	TPF (Horas)	TPF Ordenados (ti) (Horas)	λ	$\lambda * (ti)$	$R(t) = e^{-\lambda * ti}$	$Q(ti) = 1 - R(ti)$
1	246,40	50,22	0,00027478	0,013798536	0,986296228	0,013703772
2	1.742,30	246,40	0,00027478	0,067705792	0,934535381	0,065464619
3	3.835,97	923,37	0,00027478	0,253722693	0,775906937	0,224093063
4	923,37	1637,37	0,00027478	0,449915613	0,637681962	0,362318038
5	17.039,47	1742,30	0,00027478	0,478749194	0,619557854	0,380442146
6	50,22	3835,97	0,00027478	1,054046921	0,348524441	0,651475559
7	1.637,37	17039,47	0,00027478	4,682104651	0,009259505	0,990740495
Σ TPF	25.475,08					
TPPF	3.639,30					
λ	0,00027478					

Apéndice 31

Confiabilidad e in fiabilidad del transformador de potencia 1, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial.

Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 32

Tabla de datos de confiabilidad e in fiabilidad del transformador 2, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial.

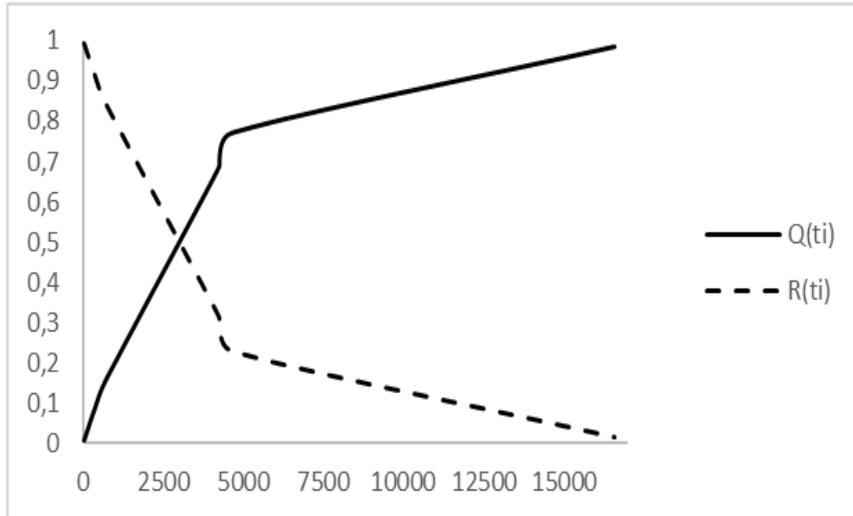
Fuente: la Autora, 2018.

Ítem	TPF (Horas)	TPF Ordenados (ti) (Horas)	λ	$\lambda * (ti)$	$R(t) = e^{-\lambda * ti}$	$Q(ti) = 1 - R(ti)$
1	4635,20	21,83	0,00026335	0,005749808	0,99426669	0,00573331
2	91,92	91,92	0,00026335	0,024206254	0,976084368	0,023915632
3	3713,17	377,23	0,00026335	0,099344398	0,905430825	0,094569175
4	21,83	693,90	0,00026335	0,182738565	0,832985899	0,167014101
5	4244,33	3713,17	0,00026335	0,977862442	0,376114206	0,623885794
6	16600,13	4244,33	0,00026335	1,117745183	0,327016326	0,672983674
7	693,90	4635,20	0,00026335	1,22067992	0,295029502	0,704970498
8	377,23	16600,13	0,00026335	4,371645113	0,012630445	0,987369555
Σ TPF	30.377,72					
TPPF	3.797,21					
λ	0,00026335					

Apéndice 33

Confiabilidad e in fiabilidad del transformador de potencia 2, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial.

Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 34

Tabla de datos de confiabilidad e in fiabilidad del transformador 3, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial.

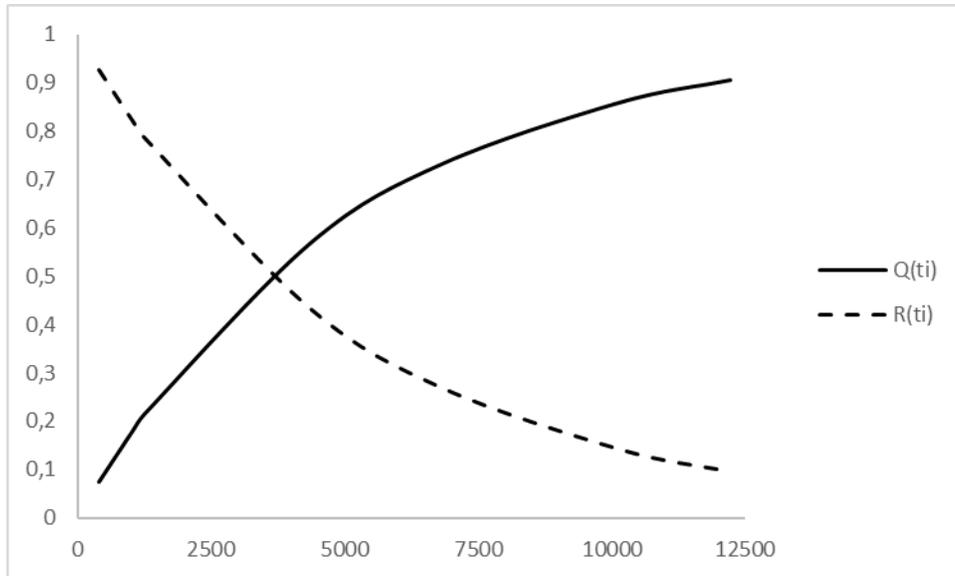
Fuente: la Autora, 2018.

Ítem	TPF (Horas)	TPF Ordenados (ti) (Horas)	λ	$\lambda * (ti)$	$R(t) = e^{-\lambda * ti}$	$Q(ti) = 1 - R(ti)$
1	10129,62	397,98	0,00020075	0,079895154	0,923213136	0,076786864
2	1054,68	1054,68	0,00020075	0,211727679	0,809185026	0,190814974
3	397,98	1256,17	0,00020075	0,252175458	0,777108376	0,222891624
4	2913,32	2913,32	0,00020075	0,584848321	0,55719037	0,44280963
5	1256,17	6848,13	0,00020075	1,374762767	0,252899585	0,747100415
6	6848,13	10129,62	0,00020075	2,033520546	0,130873961	0,869126039
7	17250,52	17250,52	0,00020075	3,463041221	0,031334322	0,968665678
Σ TPF	39.850,42					
TPPF	4.981,30					
μ	0,00020075					

Apéndice 35

Confiabilidad e in fiabilidad del transformador de potencia 3, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial.

Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 36

Tabla de datos de confiabilidad e in fiabilidad del transformador 4, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial.

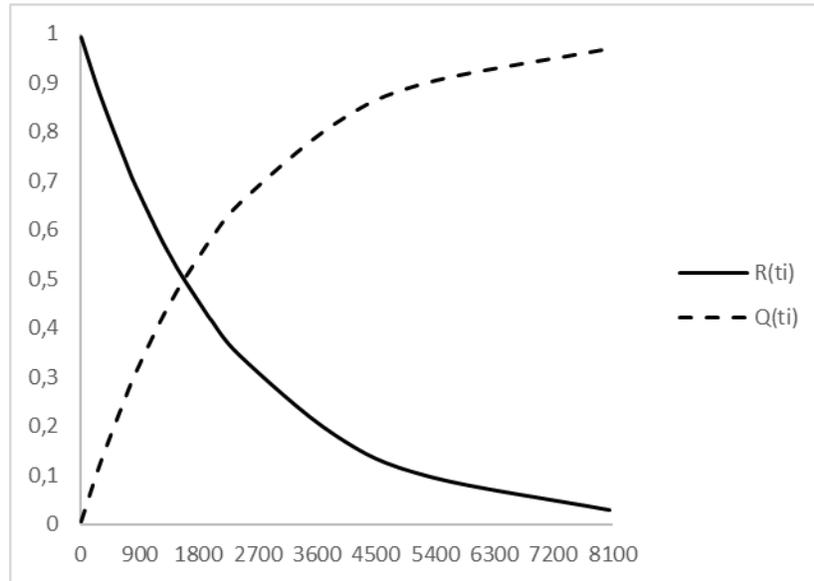
Fuente: la Autora, 2018.

Ítem	TPF (Horas)	TPF Ordenados (ti) (Horas)	λ	$\lambda * (ti)$	$R(t) = e^{-\lambda * ti}$	$Q(ti) = 1 - R(ti)$
1	1388,12	13,43	0,00043935	0,005901935	0,994115447	0,005884553
2	2429,97	300,93	0,00043935	0,13221506	0,876152549	0,123847451
3	746,20	746,20	0,00043935	0,32784297	0,720476147	0,279523853
4	1991,80	853,18	0,00043935	0,374846098	0,687395062	0,312604938
5	300,93	1192,83	0,00043935	0,524071325	0,592104982	0,407895018
6	1929,10	1388,12	0,00043935	0,609869058	0,543422021	0,456577979
7	1551,47	1551,47	0,00043935	0,68163688	0,505788399	0,494211601
8	3873,97	1929,10	0,00043935	0,847550085	0,428463346	0,571536654
9	13,43	1991,80	0,00043935	0,87509733	0,416821448	0,583178552
10	5261,38	2429,97	0,00043935	1,067605855	0,343830713	0,656169287
11	853,18	3873,97	0,00043935	1,702027255	0,182313553	0,817686447
12	8056,45	5261,38	0,00043935	2,311588768	0,099103674	0,900896326
13	1192,83	8056,45	0,00043935	3,539601308	0,029024897	0,970975103
Σ TPF	29.588,83					
TPPF	2.276,06					
λ	0,00043935					

Apéndice 37

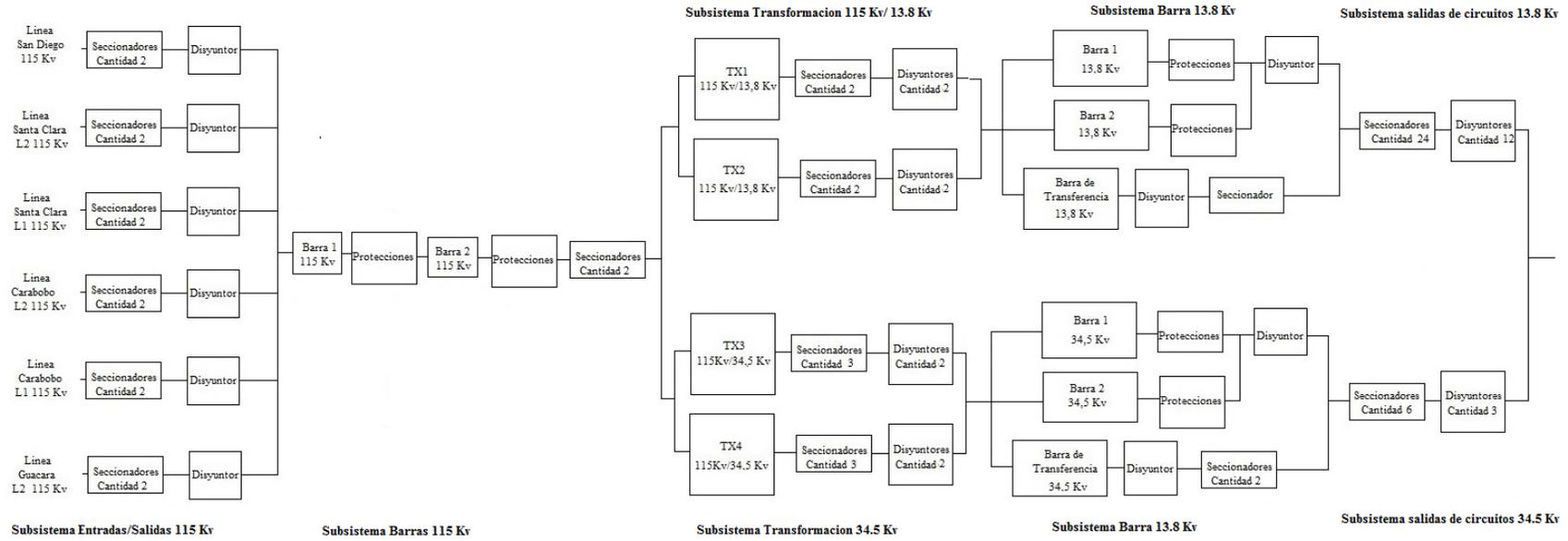
Confiabilidad e in fiabilidad del transformador de potencia 4, para el periodo comprendido entre noviembre de 2012 y octubre de 2018, usando distribución Exponencial.

Fuente: la Autora, 2018.



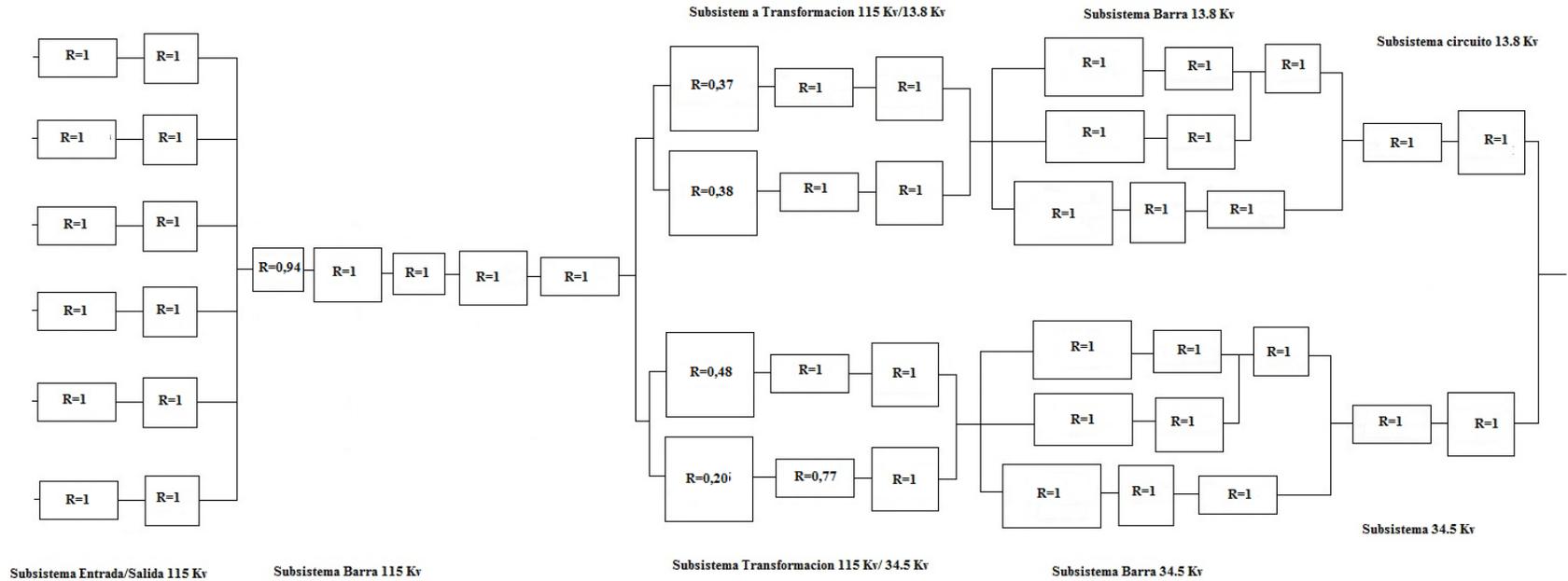
Apéndice 38

Diagrama de bloques de confiabilidad de la subestación Guacara I. Fuente: la Autora, 2018.



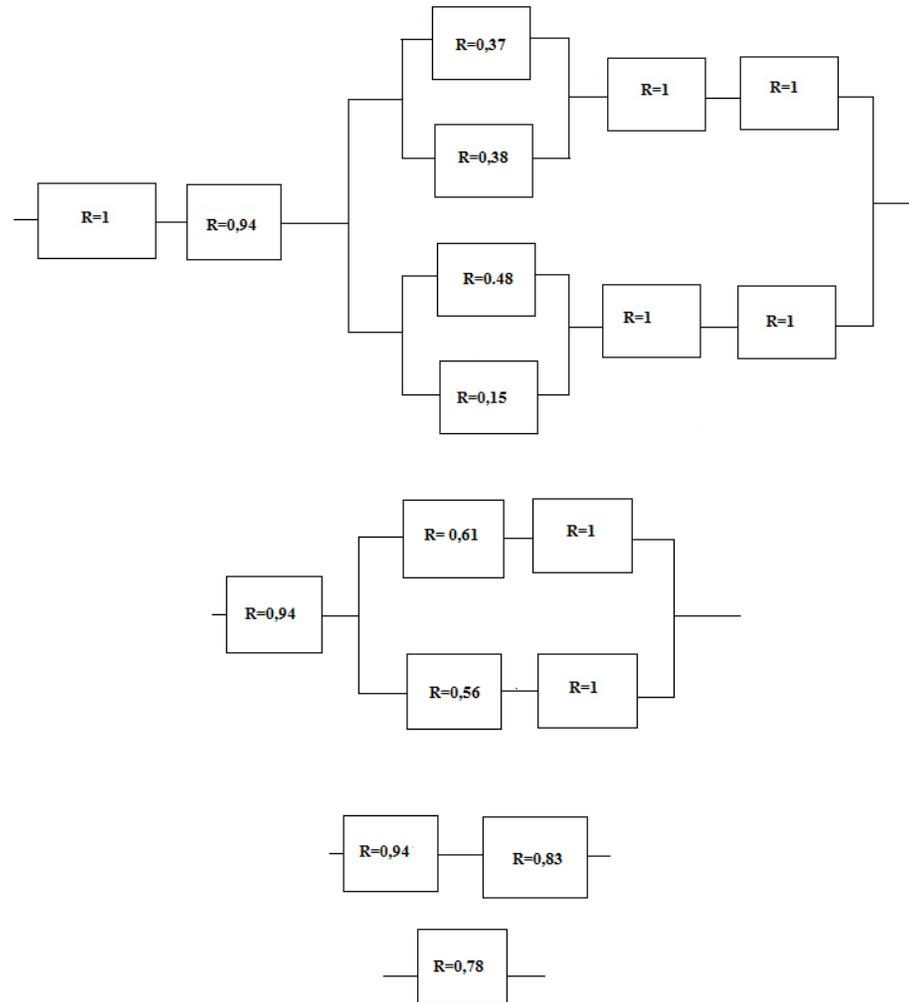
Apéndice 39

Calculo de confiabilidad a partir del diagrama de bloques de la subestación Guacara 1 para $t_i=3639,30$ Horas. Fuente: la Autora, 2018.



Apéndice 40

Reducción del diagrama de bloques. Fuente: la Autora, 2018.



Anexos

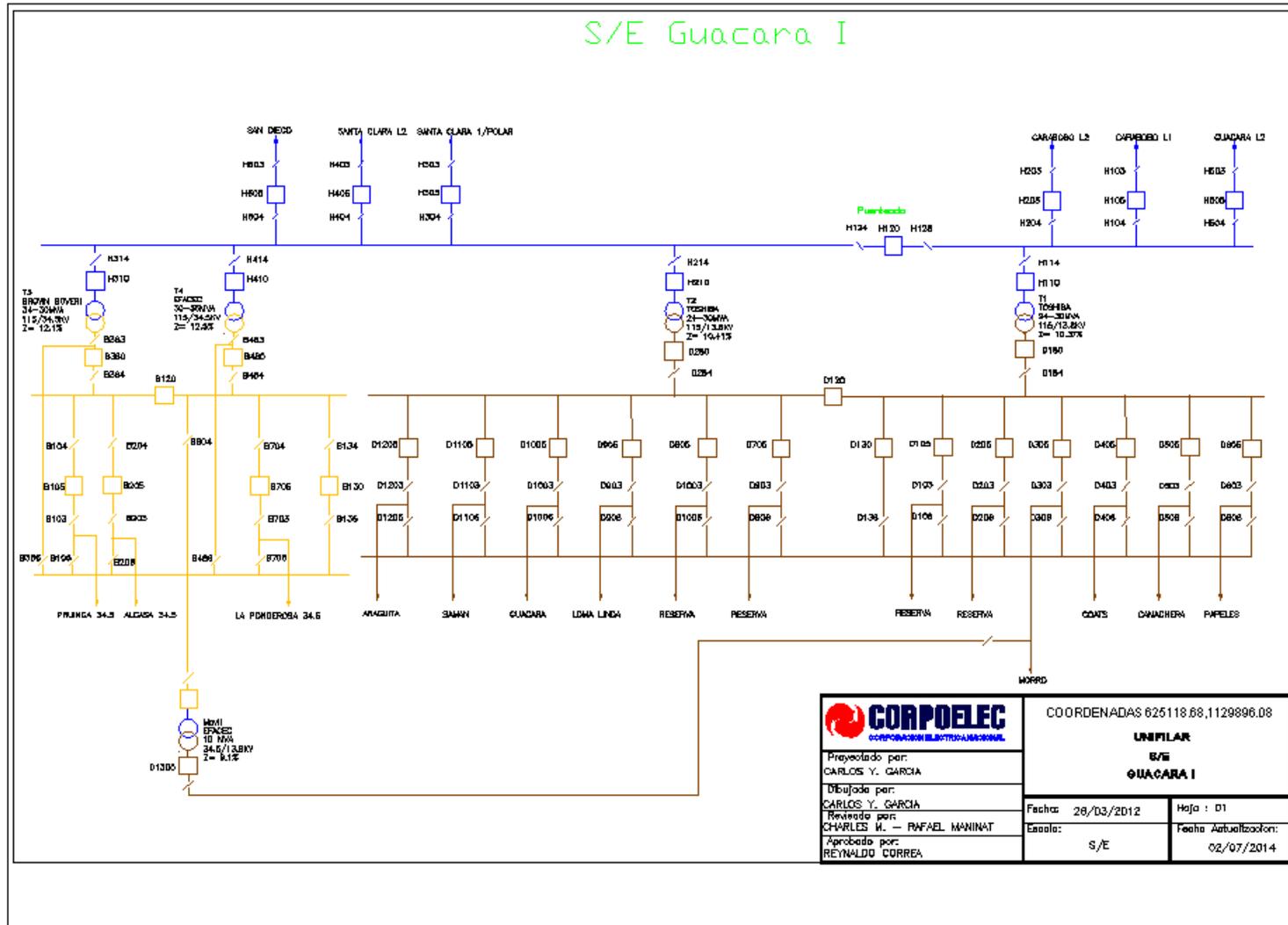
Anexo 1.

Subestación Guacara I. Fuente: CORPOELEC.



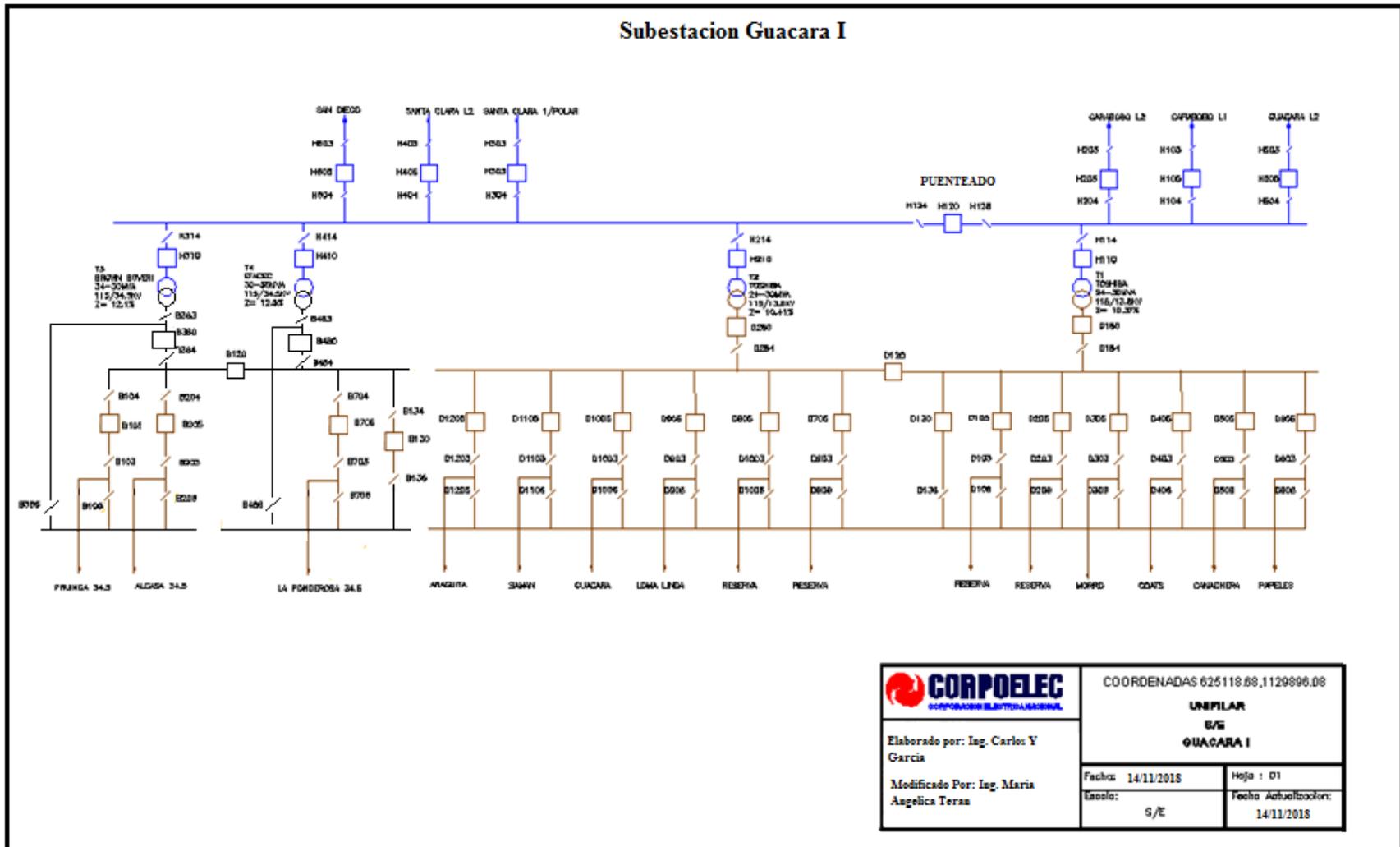
Anexo 2

Plano de la subestación Guacara I, vigente hasta febrero 2018. Fuente: CORPOELEC.



Anexo 3

Plano actual subestación Guacara I. Fuente: la Autora, 2018.



Anexo 4

Datos de placa transformador 1. Fuente: CORPOELEC.



TRANSFORMADOR

SEGUN NORMAS ANSI C57.12.00-1980

POTENCIA NOMINAL CONTINUA: 24000/30000 kVA

TENSION NOMINAL AT: 115000V/SS400 V

BT: 138000V/7970 V

FABRICANTE NUMERO: 55 °C ELEVACION

CLASE: 3

FASES: 3

FRECUENCIA: 60 Hz

IMPEDANCIA: %

DA/FA: 3

60 Hz

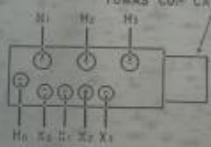
115000 V 30000 kVA

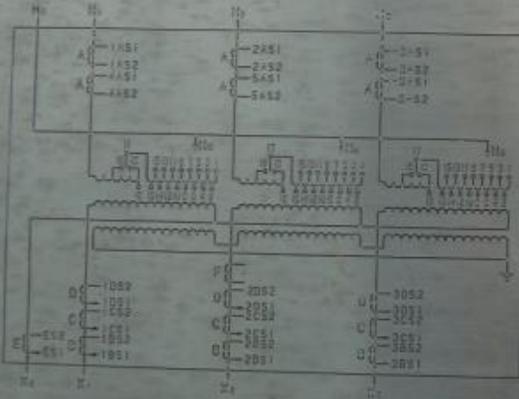
NIVELES DE AISLAMIENTO		NIVELES DE IMPULSO ONDA COMPLETA kV	
EN	EN	H ₁ H ₂ H ₃	H ₄
		5.50	
		1.10	
		1.10	

CONEXIONES DEL ARROLLADO BT		CONEXIONES DEL ARROLLADO AT	
VOLTIOS	AWP EN 30000 kVA	TOMAS POS.	CONEXIONES
120750	143.4	6R	H ₀ -1
120000	144.3	7R	H ₀ -2
119315	145.2	5R	H ₀ -3
118630	146.0	5R	H ₀ -4
117945	146.8	4R	H ₀ -5
117260	147.6	3R	H ₀ -6
116575	148.0	2R	H ₀ -7
115890	148.7	1R	H ₀ -8
115205	150.5	N	H ₀ -9
114520	151.5	1L	H ₀ -10
113835	152.5	2L	H ₀ -11
113150	153.5	3L	H ₀ -12
112465	154.5	4L	H ₀ -13
111780	155.5	5L	H ₀ -14
111095	156.5	6L	H ₀ -15
110410	157.5	7L	H ₀ -16
109725	158.5	8L	H ₀ -10
109040	159.5	8L	H ₀ -1
108355	159.7	10L	H ₀ -2
107670	161.7	L	H ₀ -3
106985	162.8	12L	H ₀ -4
106300	163.9	13L	H ₀ -5
105615	165.1	14L	H ₀ -6
104930	166.2	15L	H ₀ -7
104245	167.3	15L	H ₀ -8
103560	168.5	17L	H ₀ -9
102875	169.7	18L	H ₀ -10
102190	170.8	19L	H ₀ -11
101505	172.1	20L	H ₀ -12
100820	173.4	21L	H ₀ -13
100135	174.6	22L	H ₀ -14
99450	175.9	23L	H ₀ -15
98765	177.2	24L	H ₀ -16

TC	RELACION V/A	CLASE	CONEXIONES	NOTAS
A	200:5	10	SP2U S1-S2	
B	100:5	15	SP2U S1-S2	IEC-105
C	100:5	10	SP2U S1-S2	-1966
D	500:5	4.0	SP2U S1-S2	
E	500:5	15	SP2U S1-S2	
F	1300:15			PARA USO CON INDICADOR DE TEMP DEL ARROLLADO

CAMBIADOR DE TOMAS CON CARGA





EL TANQUE ESTA DISEÑADO PARA LLENADO DEL ACEITE EN VACIO COMPLETO ANTES DE INSTALAR U OPERAR LEER INSTRUCCIONES

FABRICADO EN

PESOS APROXS EN KGS

NUCLEO Y ARROLLADOS

TANQUE Y ACCESORIOS

ACEITE DEL TANQUE PRINCIPAL

ACEITE DEL COMPARTIMIENTO DEL C.TOMAS

PESO TOTAL CON ACEITE

Anexo 5

Datos de placa transformador 2. Fuente: CORPOELEC



TRANSFORMADOR

SEGUN NORMAS ANSI C57.12.00-1980

POTENCIA NOMINAL CONTINUA: 24000/30000 kVA

TENSION NOMINAL: 55 °C ELEVACION

AT: 115000GrdY/6S400 V

BT: 13000GrdY/7970 V

FABRICANTE NUMERO: []

CLASE: []

FASES: []

FRECUENCIA: []

IMPEDANCIA: []

NIVELES DE AISLAMIENTO	
EM	NIVELES DE IMPULSO ONDA COMPLETA kV
110	550
110	110
110	110

CONEXIONES DEL ARROLLADO BT	
VOLTIOS	AMP EN 30000 kVA
13000	1255

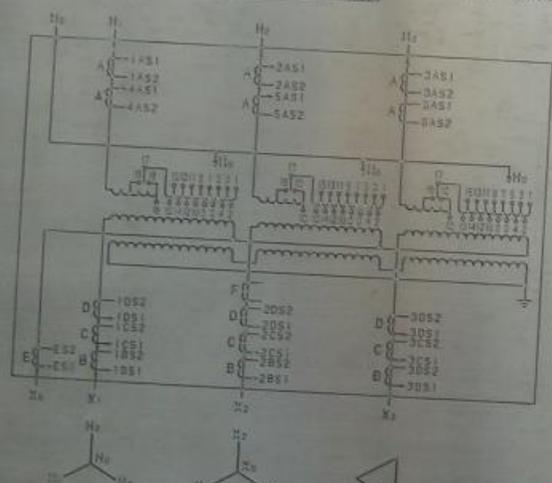
CONEXIONES DEL ARROLLADO AT	
VOLTIOS	AMP EN 30000kVA
115000	30000

RELACION	V A	CLASE	CONEXIONES	NORMAS
A	200:5-5	1.0	5P20 S1-S2	IEC-105 -1985
B	150:5	1.5	5P20 S1-S2	
C	100:5	1.0	5P20 S1-S2	
D	150:5	4.0	11F35 S1-S2	
E	100:5	1.5	15P20 S1-S2	
F	100:1.5		PARA USO CON INDICADOR DE TEMP DEL ARROLLADO	

CAMBIADOR DE TOMAS CON CARGA



CONEXIONES DEL ARROLLADO AT		CAMBIADOR DE TOMAS CON CARGA	
VOLTIOS	AMP EN 30000kVA	TOMAS POS.	CONEXIONES
120750	143.4	8R	Ho-1
120030	144.3	7R	Ho-2
119315	145.2	6R	Ho-3
118595	146.0	5R	Ho-4
117875	146.9	4R	Ho-5
117155	147.8	3R	Ho-6
116440	148.8	2R	Ho-7
115720	149.7	1R	Ho-8
115000	150.6	N	Ho-9
114280	151.6	1L	Ho-10
113565	152.5	2L	Ho-11
112845	153.5	3L	Ho-12
112125	154.5	4L	Ho-13
111405	155.5	5L	Ho-14
110690	156.5	6L	Ho-15
109970	157.5	7L	Ho-16
109250	158.5	8L	Ho-18
108530	159.6	9L	Ho-1
107815	160.7	10L	Ho-2
107095	161.7	11L	Ho-3
106375	162.8	12L	Ho-4
105655	163.9	13L	Ho-5
104940	165.1	14L	Ho-6
104220	166.2	15L	Ho-7
103500	167.3	16L	Ho-8
102780	168.5	17L	Ho-9
102065	169.7	18L	Ho-10
101345	170.9	19L	Ho-11
100625	172.1	20L	Ho-12
99905	173.4	21L	Ho-13
99190	174.6	22L	Ho-14
98470	175.9	23L	Ho-15
97750	177.2	24L	Ho-16



EL TANQUE ESTA DISEÑADO PARA LLENADO DEL ACEITE EN VACIO COMPLETO

ANTES DE INSTALAR U OPERAR LEER INSTRUCCIONES

FABRICADO EN []

PESOS APROXS EN KGS

NUCLEO Y ARROLLADOS []

TANQUE Y ACCESORIOS []

ACEITE DEL TANQUE PRINCIPAL [] l

ACEITE DEL COMPARTIMIENTO DEL C.TOMAS [] l

PESO TOTAL CON ACEITE []

TOSHIBA CORPORATION

Anexo 6

Datos de placa transformador 3. Fuente: CORPOELEC

BBC Brown Boveri Industrial Cenepe Tabari S.A

TRANSFORMADOR TRIFASICO CON COMUTADOR BAJO CARGA Y ARROLAMIENTO TERCIARIO DE COMPENSACION

N. Arrolamiento BT 210/350 Fases Freq (50/60)

MVA Arrolamiento AT 50/110 Tipo T03LF

Arrolamiento BT 70/120 Norma IEC/CEC/CADEFE

Volt Arrolamiento BT 50/110 Año de Fab

Enfriamiento ONAN/ONAF

Angara Colocamiento 33/35 C

Aislamiento Clase A

T.c.c. Arrolamiento AT 50/110

Arrolamiento BT 70/120

TERCIARIO Arrolamiento BT 50/110

MVA Peso Arrol. 13 900 Kg

Volt Fuente Arrol. 26 500 Kg

Ampere Peso Total 50 000 Kg

Arrolamiento BT 210/350

Arrolamiento AT 50/110

Arrolamiento BT 70/120

Arrolamiento BT 50/110

Enfriamiento ONAN/ONAF

Colocamiento 33/35 C

Aislamiento Clase A

Arrolamiento AT 50/110

Arrolamiento BT 70/120

Arrolamiento BT 50/110

Peso Arrol. 13 900 Kg

Fuente Arrol. 26 500 Kg

Peso Total 50 000 Kg

Diagramas: V, W, VV, WW

TRANSFORMADORES DE CORRIENTE				RELACION DE TRANSFORMACION EN VACIO				
Grupos	Resistencia	CA	Clase	Resistencia	ALTA TENSION OO UU,VV,WW			BT 0,1/0,1
WV	WV	WV	WV	WV	Commutador bajo carga			(V)
					Res	Coeficiente		
WV	WV	WV	WV	WV	120 500	1	1,1	1,2
WV	WV	WV	WV	WV	125 000	2	1,1	1,2
WV	WV	WV	WV	WV	130 000	3	1,1	1,2
WV	WV	WV	WV	WV	135 000	4	1,1	1,2
WV	WV	WV	WV	WV	140 000	5	1,1	1,2
WV	WV	WV	WV	WV	145 000	6	1,1	1,2
WV	WV	WV	WV	WV	150 000	7	1,1	1,2
WV	WV	WV	WV	WV	155 000	8	1,1	1,2
WV	WV	WV	WV	WV	160 000	9	1,1	1,2
WV	WV	WV	WV	WV	165 000	10	1,1	1,2

