

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA**



**ESTUDIO DE CONFIABILIDAD EN ALIMENTADORES DE LA  
SUBESTACIÓN CHICLAYO OESTE UTILIZANDO EL MÉTODO  
PROBABILÍSTICO DE SIMULACIÓN MONTECARLO PARA  
DETERMINAR ÍNDICES DE CONFIABILIDAD**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE**

**INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICO**

**AUTOR**

**JHAIR ARTURO TRIGOSO YARLAQUE**

**ASESOR**

**Ing. LUIS ALBERTO GONZÁLES BAZÁN**

**Chiclayo, 2018**

Esta tesis está dedicada mis padres Arturo y Lidia porque ellos han dado razón a mi vida, por sus consejos, su apoyo incondicional y su paciencia, todo lo que hoy soy es gracias a ellos.

Y a mis hermanos Gerson, Percy, Frank, Nilton y Emanuel que son mis verdaderos amigos.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar agradezco a mi tutor Ing. Luis Alberto Gonzáles Bazán, que sin su orientación y conocimientos no hubiese sido posible realizar este logro.

A la empresa Electronorte S.A por brindarme la data necesaria para el desarrollo de la tesis; y a todos mis formadores, personas de gran sabiduría quienes me transmitieron sus conocimientos y experticia para llegar a dar termino a mi tesis con éxito y obtener el más ansiado título profesional.

# ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
I. INTRODUCCIÓN .....	19
1.1. Objetivos .....	21
1.1.1. Objetivo General .....	21
1.1.2. Objetivos Específicos .....	21
1.2. Justificación.....	22
1.3. Problemática.....	23
1.3.1. Planteamiento del problema .....	23
II. MARCO TEÓRICO .....	24
2.1. Conceptos generales de un sistema de distribución .....	24
2.1.1. Sistema eléctrico de distribución.....	24
2.1.1.1. Especificación técnica de un sistema de distribución .....	24
2.1.1.2. Clasificación de los sistemas de distribución.....	24
2.1.1.2.1. Sistemas de distribución industrial .....	24
2.1.1.2.2. Sistemas de distribución comercial. ....	25
2.1.1.2.3. Sistemas de distribución urbana. ....	25
2.1.1.2.4. Sistemas de distribución rural.....	26
2.1.1.3. Clasificación de las redes .....	26
2.1.1.3.1. Sistemas radiales.....	27
2.1.1.3.2. Sistemas anillados.....	27

2.1.1.4.	Elementos que componen el sistema de distribución.....	28
2.1.1.4.1.	Sistema de subtransmisión.....	28
2.1.1.4.2.	Subestación de distribución .....	28
2.1.1.4.3.	Sistema de distribución primario .....	28
2.1.1.4.4.	Redes de distribución secundarias .....	29
2.1.1.4.5.	Acometidas .....	29
2.1.1.4.6.	Red de alumbrado público .....	29
2.1.1.4.7.	Contadores de energía (Medidores).....	29
2.1.1.5.	Fallas en sistemas de potencia .....	29
2.1.1.5.1.	Tipos de fallas.....	29
2.1.1.5.2.	Modelado de fallas.....	30
2.1.1.5.3.	Resistencia de falla .....	31
2.1.1.5.4.	Localización de fallas en sistemas de potencia.....	32
2.2.	Introducción al modelado de sistemas.....	32
2.2.1.	Sistemas y modelos .....	32
2.2.2.	Tipos de modelos .....	34
2.2.3.	Modelos matemáticos.....	36
2.2.3.1.	Determinista vs Estocástico .....	36
2.2.3.2.	Estático vs Dinámico .....	38
2.2.3.3.	De tiempo continuo vs De tiempo discreto vs Híbrido .....	38
2.3.	Confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución .....	40

2.3.1.	Confiabilidad.....	40
2.3.1.1.	Método Montecarlo.....	42
2.3.1.2.	Método de Markov.....	42
2.3.2.	Índices de adecuación.....	42
2.3.2.1.	Tiempo medio antes de que la primera falla ocurra (Mean Time To Failure).....	43
2.3.2.2.	Tiempo medio para reparar una falla (Mean Time To Repair).....	43
2.3.2.3.	Tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures) .....	43
2.3.3.	Interrupciones.....	44
2.3.3.1.	Clasificación de interrupciones.....	44
2.3.4.	Técnicas de evaluación.....	44
2.3.4.1.	Bloques de Frecuencia y Duración .....	45
2.3.5.	Clasificación de estados .....	45
2.3.6.	Confiabilidad en sistemas serie y paralelo .....	46
2.3.6.1.	Sistema serie .....	46
2.3.6.2.	Sistema paralelo .....	47
2.4.	Metodología del estudio .....	48
2.4.1.	Modelamiento de la red.....	48
2.4.2.	Modelamiento de los componentes de la red .....	48
2.4.3.	Inicios del Método de Montecarlo.....	49
2.4.4.	Simulación Método de Montecarlo .....	52

2.4.4.1.	Modelo de simulación.....	52
2.4.4.2.	Proceso de simulación.....	52
2.4.4.3.	Etapas del proceso de simulación .....	52
2.4.4.4.	Diagrama de flujo del modelo de simulación .....	53
2.4.5.	Algoritmo de Simulación de Montecarlo .....	53
2.4.6.	Simulación de Montecarlo de eventos discretas.....	54
2.4.7.	Generación de números aleatorios .....	55
2.4.7.1.	Métodos mecánicos.....	56
2.4.7.2.	Métodos de generación aritméticos.....	56
2.4.7.2.1.	Método de los cuadrados medios.....	57
2.4.7.2.2.	Método congruencia lineal .....	57
2.4.8.	Generación de Variables Aleatorias .....	58
2.4.8.1.	Simulación de variables aleatorias discretas.....	59
2.4.8.2.	Simulación de variables aleatorias continuas.....	59
III.	RESULTADOS .....	61
3.1.	Condiciones técnicas actuales de los alimentadores de la subestación SECHO .....	61
3.1.1.	Historial de interrupciones del alimentador C-212 de SECHO (2014-2015).....	61
3.1.2.	Historial de interrupciones del alimentador C-214 de SECHO (2014-2015).....	63

3.1.3. Historial de interrupciones del alimentador C-215 de SECHO (2014-2015).....	65
3.1.4. Historial de interrupciones del alimentador C-217 de SECHO (2014-2015).....	66
3.1.5. Historial de interrupciones del alimentador C-219 de SECHO (2014-2015).....	67
3.1.6. Historial de interrupciones del alimentador C-221 de SECHO (2014-2015).....	68
3.1.7. Historial de interrupciones del alimentador C-234 de SECHO (2014-2015).....	69
3.1.8. Historial de interrupciones del alimentador C-236 de SECHO (2014-2015).....	69
3.1.9. Historial de interrupciones del alimentador C-244 de SECHO (2014-2015).....	70
3.1.10. Historial de interrupciones del alimentador C-251 de SECHO (2014-2015).....	71
3.2. Seleccionar dos alimentadores específicos a partir de sus características técnicas.....	72
3.2.1. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-212 de SECHO (2014-2015).....	72
3.2.2. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-214 de SECHO (2014-2015).....	73

3.2.3. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-215 de SECHO (2014-2015).....	74
3.2.4. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-217 de SECHO (2014-2015).....	74
3.2.5. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-219 de SECHO (2014-2015).....	75
3.2.6. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-221 de SECHO (2014-2015).....	76
3.2.7. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-234 de SECHO (2014-2015).....	76
3.2.8. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-236 de SECHO (2014-2015).....	77
3.2.9. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-244 de SECHO (2014-2015).....	78
3.2.10. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-251 de SECHO (2014-2015).....	79
3.2.11. Porcentaje de fallas en los alimentadores de SECHO (2011 – 2014) .....	79
3.3. Determinar los métodos para la confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución.....	80
3.3.1. Método Montecarlo .....	81
3.3.2. Método de Markov .....	81

3.4.	Diseño de la aplicación de Excel en la simulación de Montecarlo, que permita evaluar, diagnosticar y predecir la confiabilidad en los alimentadores en base a un historial de eventos.....	83
3.4.1.	Alimentador C-212.....	83
3.4.1.1.	Historial de fallas .....	83
3.4.1.2.	Horas para la falla .....	84
3.4.1.3.	Cálculo de los parámetros de Weibull .....	85
3.4.1.3.1.	Rango de la mediana.....	85
3.4.1.3.2.	Recta de regresión.....	85
3.4.1.3.3.	Cálculos de los parámetros $\beta$ y $\eta$ .....	87
3.4.1.4.	Simulación de Montecarlo .....	88
3.4.1.4.1.	Generando una edad de falla.....	88
3.4.1.4.2.	Generando dos edades de falla .....	88
3.4.1.4.3.	Generando tres edades de falla .....	88
3.4.1.4.4.	Generando cuatro edades de falla .....	89
3.4.1.4.5.	Generando cinco edades de falla .....	89
3.4.1.4.6.	Generando seis edades de falla.....	89
3.4.1.5.	Confiabilidad del alimentador.....	90
3.4.1.6.	Índices de confiabilidad .....	91
3.4.2.	Alimentador C-214.....	92
3.4.2.1.	Historial de fallas .....	92

3.4.2.2.	Horas para la falla .....	93
3.4.2.3.	Cálculo de los parámetros de Weibull .....	94
3.4.2.3.1.	Rango de la mediana.....	94
3.4.2.3.2.	Recta de regresión.....	94
3.4.2.3.3.	Cálculos de los parámetros $\beta$ y $\eta$ .....	96
3.4.2.4.	Simulación de Montecarlo .....	97
3.4.2.4.1.	Generando una edad de falla.....	97
3.4.2.4.2.	Generando dos edades de falla .....	97
3.4.2.4.3.	Generando tres edades de falla .....	97
3.4.2.4.4.	Generando cuatro edades de falla.....	98
3.4.2.4.5.	Generando cinco edades de falla .....	98
3.4.2.4.6.	Generando seis edades de falla.....	98
3.4.2.5.	Confiabilidad del alimentador.....	99
3.4.2.6.	Índices de confiabilidad .....	100
IV.	CONCLUSIONES .....	101
V.	RECOMENDACIONES .....	103
VI.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105
VII.	ANEXOS.....	107

## LISTA DE ILUSTRACIONES

	<b>Pág.</b>
Ilustración 1. Sistema de distribución radial. ....	27
Ilustración 2. Sistema de distribución anillado. ....	28
Ilustración 3. Conexión de las redes de secuencia para fallas a) monofásica, b) fase- fase- tierra, c) fase-fase, d) trifásica. ....	31
Ilustración 4. Formas de estudiar un sistema. ....	34
Ilustración 5. Los componentes de la garantía de funcionamiento. ....	40
Ilustración 6. Diagrama de red simplificado de una fuente de alimentación confiable. ....	41
Ilustración 7. Tipos de interrupciones en un sistema de distribución. ....	44
Ilustración 8. Modelo de dos estados para los componentes de la red.....	48
Ilustración 9. Diagrama de flujo del modelo de simulación.....	53
Ilustración 10. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-212 (SECHO 2014– 2015).....	72
Ilustración 11. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-214 (SECHO 2014– 2015).....	74
Ilustración 12. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-215 (SECHO 2014– 2015).....	74
Ilustración 13. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-217 (SECHO 2014– 2015).....	75
Ilustración 14. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-219 (SECHO 2014– 2015).....	75

Ilustración 15. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-221 (SECHO 2014– 2015).....	76
Ilustración 16. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-234 (SECHO 2014– 2015).....	77
Ilustración 17. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-236 (SECHO 2014– 2015).....	77
Ilustración 18. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-244 (SECHO 2014– 2015).....	78
Ilustración 19. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-251 (SECHO 2014– 2015).....	79
Ilustración 20. Gráfico porcentual de fallas en los alimentadores de SECHO (2014 – 2015). .....	80
Ilustración 21. Número de fallas por año en el alimentador C-212. ....	84
Ilustración 22. Recta de regresión – (C-212). ....	87
Ilustración 23. Confiabilidad vs N° de horas – (C-212).....	90
Ilustración 24. Número de fallas por año en el alimentador C-214. ....	93
Ilustración 25. Recta de regresión – (C-214). ....	96
Ilustración 26. Confiabilidad vs N° de horas – (C-214).....	99

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Historial de interrupciones del alimentador C-212 (SECHO 2014-2015). .....	62
Tabla 2. Historial de interrupciones del alimentador C-214 (SECHO 2014-2015). .....	65
Tabla 3. Historial de interrupciones del alimentador C-215 (SECHO 2014-2015). .....	65
Tabla 4. Historial de interrupciones del alimentador C-217 (SECHO 2014-2015). .....	66
Tabla 5. Historial de interrupciones del alimentador C-219 (SECHO 2014-2015). .....	67
Tabla 6. Historial de interrupciones del alimentador C-221 (SECHO 2014-2015). .....	68
Tabla 7. Historial de interrupciones del alimentador C-234 (SECHO 2014-2015). .....	69
Tabla 8. Historia de interrupciones del alimentador C-236 (SECHO 2014-2015). .....	69
Tabla 9. Historial de interrupciones del alimentador C-244 (SECHO 2014-2015). .....	71
Tabla 10. Historial de interrupciones del alimentador C-251 (SECHO 2014-2015). .....	71
Tabla 11. Tipos de interrupciones en el alimentador C-212 (SECHO 2014– 2015). .....	72
Tabla 12. Tipos de interrupciones en el alimentador C-214 (SECHO 2014– 2015). .....	73
Tabla 13. Tipos de interrupciones en el alimentador C-215 (SECHO 2014– 2015). .....	74
Tabla 14. Tipos de interrupciones en el alimentador C-217 (SECHO 2014– 2015). .....	74
Tabla 15. Tipos de interrupciones en el alimentador C-219 (SECHO 2014– 2015). .....	75
Tabla 16. Tipos de interrupciones en el alimentador C-221 (SECHO 2014– 2015). .....	76
Tabla 17. Tipos de interrupciones en el alimentador C-234 (SECHO 2014– 2015). .....	76
Tabla 18. Tipos de interrupciones en el alimentador C-236 (SECHO 2014– 2015). .....	77
Tabla 19. Tipos de interrupciones en el alimentador C-244 (SECHO 2014– 2015). .....	78
Tabla 20. Tipos de interrupciones en el alimentador C-251 (SECHO 2014– 2015). .....	79
Tabla 21. Cuadro resumen de tipo de interrupciones en los alimentadores (SECHO 2014– 2015). .....	79

Tabla 22. Cuadro comparativo entre el Método de Montecarlo y Markov.....	82
Tabla 23. Historial de fallas en el alimentador C-212.....	83
Tabla 24. Horas para la falla en el alimentador C-212.....	85
Tabla 25. Cuadro resumen sobre la recta de regresión y el rango de la mediana - (C-212). .....	86
Tabla 26. Cuadro Resumen sobre la recta de regresión y el rango de la mediana - (C-212). .....	87
Tabla 27. Resultados para una edad de falla – (C-212). .....	88
Tabla 28. Resultados para dos edades de falla – (C-212). .....	88
Tabla 29. Resultados para tres edades de falla – (C-212). .....	88
Tabla 30. Resultados para cinco edades de falla – (C-212). .....	89
Tabla 31. Resultados para seis edades de falla – (C-212). .....	89
Tabla 32. Confiabilidad del alimentador C-212.....	90
Tabla 33. Índices de Confiabilidad del alimentador C-212. ....	91
Tabla 34. Disponibilidad, fallas por hora y día del alimentador C-212. ....	91
Tabla 35. Historial de fallas en el alimentador C-212.....	92
Tabla 36. Horas para la falla en el alimentador C-214.....	94
Tabla 37. Cuadro resumen sobre la recta de regresión y el rango de la mediana – (C-214). .....	95
Tabla 3938. Cuadro Resumen sobre la recta de regresión y el rango de la mediana - (C- 214).....	96
Tabla 392. Resultados para tres edades de falla – (C-214). .....	97
Tabla 40. Resultados para cuatro edades de falla – (C-214). .....	98
Tabla 414. Resultados para cinco edades de falla – (C-214). .....	98
Tabla 425. Resultados para seis edades de falla – (C-214). .....	98

Tabla 436. Confiabilidad del alimentador C-214.....	99
Tabla 447. Índices de Confiabilidad del alimentador C-214.....	100
Tabla 458. Disponibilidad, fallas por hora y día del alimentador C-214. ....	100

## **RESUMEN**

La finalidad de esta investigación es la aplicación del Método probabilístico de Simulación Montecarlo en los alimentadores de la Subestación Chiclayo Oeste (SECHO), en el periodo comprendido entre 2015 – 2016. Este nuevo enfoque permite demostrar los índices de confiabilidad lo que justifica la realización de esta investigación como la que se presenta; cuya finalidad ha sido analizar y valorar la calidad de los servicios del sistema eléctrico en la región Lambayeque tomando como muestra dos alimentadores de SECHO, aplicando este nuevo método.

En el desarrollo del marco teórico se ha propuesto la realización de un estudio comparativo con el Método de Markov, que ha permitido analizar el índice de confiabilidad propuesto por el método aplicado en esta investigación; para ello se ha realizado análisis en las ventajas que ofrece cada método con respecto a la limitada base de datos con la que se trabajó.

En el último capítulo o anexos se adjuntan o incluyen los cuadros comparativos de los resultados obtenidos que se relacionan con una aproximación mínima demostrando la efectividad de Método aplicado, que orienta a nuevos enfoques contribuyendo a la mejora de un buen servicio del sistema eléctrico.

**PALABRAS CLAVE:** Montecarlo, simulación, falla, confiabilidad.

## **ABSTRACT**

The purpose of this investigation is the application of the Montecarlo Simulation Probabilistic Method in the feeders of the Substation Chiclayo West (SSCW), in the period between 2015 - 2016. This new approach allows the reliability indices to be demonstrated, which justifies the realization of this investigation like the one presented; whose purpose has been to analyze and assess the quality of the electricity system services in the Lambayeque region, taking as sample two SSCW feeders, applying this new method.

In the development of the theoretical framework, it has been proposed to carry out a comparative study with the Markov Method, which has allowed to analyze the reliability index proposed by the method applied in this investigation; For this purpose, analysis has been carried out on the advantages offered by each method with respect to the limited database with which we worked.

In the last chapter or annexes, the comparative tables of the results obtained that are related to a minimum approximation are shown, showing the effectiveness of the applied method, which guides new approaches contributing to the improvement of a good service of the electrical system.

**KEYWORDS:** Monte Carlo, simulation, failure, reliability.

## **I. INTRODUCCIÓN**

En el Perú, se ha generado un creciente desarrollo de la energía eléctrica; siendo de utilidad en su infraestructura a través de industrias, centros comerciales, edificaciones y programas de vivienda, la cuales tienen un alto índice de demanda y siendo el tema a investigar la calidad del servicio en el sistema de energía eléctrica preponderante en estas industrias, el mismo nos permite plantear muchas interrogantes.

Actualmente, el tema de la calidad de servicio en el sistema eléctrico de distribución, ha recobrado gran importancia debido al acelerado desarrollo de los sistemas de energía a nivel de consumo y a la existencia de un incremento de la cantidad de cargas que se encuentran conectadas a la red y en la mayoría de éstos suelen ser sumamente sensibles a cualquier variación de voltaje y a los cortes de suministro que se dan en la misma que afectan de manera sustancial la labor cotidiana del consumidor, ya sea en el ámbito de grandes industrias o solamente en el ámbito residencial, dando paso a las investigaciones en el campo de la confiabilidad, del servicio eléctrico, o sea la necesidad de estudiar más la probabilidad de que un sistema se mantenga sin fallar durante determinado tiempo y bajo ciertas condiciones.

Por ello con base a sus estudios en el campo, los grandes expertos han mencionado que la calidad de servicio de un sistema eléctrico, puede cuantificarse a través de varios parámetros, que se relacionan con la continuidad del servicio, las fluctuaciones de voltaje y corriente, y las variaciones de frecuencia.

Pese a que la confiabilidad del suministro de energía siempre fue enfocada en el ámbito de la generación, se observó que la mayoría de los casos, la falta de suministro y las variaciones de voltaje se daban en el ámbito del sistema de distribución, los cuales tienen repercusiones económicas y sociales, pues afectan a gran cantidad de usuarios, produciendo graves distorsiones, por ende ésta es otra importante razón, para dar paso al estudio de la calidad de servicio.

Para cuantificar la pérdida económica que provoca un corte de servicio, se toman en cuenta la frecuencia de aparición de la falla en la red y el tiempo requerido para reestablecer el suministro.

Si se requiere hablar de calidad de servicio en el ámbito de cortes de suministro en cuanto al sistema eléctrico de distribución, se debe hacer referencia antes a la confiabilidad del sistema del servicio eléctrico, o sea que se den menos cortes de suministro y se restablezca el servicio en un menor tiempo, como se menciona en el párrafo anterior. Por esta circunstancia la confiabilidad es uno de los parámetros más importantes durante la etapa de planeamiento y operación en un sistema de potencia eléctrica, debido a ello, las empresas de este sector le dan mucha importancia, ya que un buen planeamiento, disminuiría las pérdidas económicas imputables a fallos de la red, a mediano y a largo plazo. [1]

En vista de la importancia, de lo mencionado anteriormente, del estudio de la confiabilidad en la actualidad, Con el presente trabajo se pretende hacer referencia a los conceptos básicos del estudio de la confiabilidad, a algunos de los métodos de cálculo más usados y al desarrollo y aplicación de los mismos.

En esta tesis se realiza el estudio de confiabilidad de dos alimentadores de la subestación Chiclayo Oeste (SECHO), a cargo de la empresa Electronorte S.A. (ENSA); así como presenta la aplicación del método de simulación Montecarlo en estudios de confiabilidad de sistemas de distribución de energía eléctrica.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo General**

Realizar un estudio de confiabilidad en alimentadores de Subestación Chiclayo Oeste (SECHO) utilizando el método probabilístico de Simulación Montecarlo para determinar índices de confiabilidad.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Evaluar condiciones técnicas actuales de los alimentadores de la subestación SECHO.
- Seleccionar dos alimentadores específicos a partir de sus características técnicas.
- Determinar los métodos para la confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución.
- Diseño de la aplicación de Excel en la simulación de Montecarlo, que permita evaluar, diagnosticar y predecir la confiabilidad en los alimentadores en base a un historial de eventos.

## **1.2. Justificación**

En este trabajo se presenta un estudio de confiabilidad utilizando el método probabilístico de simulación Montecarlo para determinar índices de confiabilidad en sistemas de distribución, con el fin de reducir las fallas en los alimentadores o circuitos de una red eléctrica.

La confiabilidad en los sistemas de distribución de energía eléctrica es un área de intensa investigación a nivel nacional e internacional debido a lo sensible que es la sociedad ante las interrupciones en el servicio de suministro de energía eléctrica tomando en cuenta la alta dependencia que se tiene de éste servicio para todas las actividades de la vida diaria. [2]

Las fallas aleatorias en los componentes del sistema no pueden evitarse. La mayor parte de las fallas de los sistemas de potencia ocurren en el sistema de distribución.

En el caso de la región Lambayeque, no se han realizado estudios de este tipo. En la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo los estudios realizados en esta temática han sido pocos, por lo cual se planteó este proyecto que pretende mejorar la confiabilidad del servicio eléctrico actual en el país; y a la vez establecer una relación entre las universidades y el sector eléctrico peruano.

### **1.3. Problemática**

El sector eléctrico en el Perú ha experimentado sorprendentes mejoras en los últimos 15 años. El acceso a la electricidad ha crecido del 45% en 1990 al 88,8% en junio de 2011, a la vez que mejoró la calidad y la eficacia de la prestación del servicio. Estas mejoras fueron posibles gracias a las privatizaciones posteriores a las reformas iniciadas en 1992. Al mismo tiempo, las tarifas de electricidad han permanecido en consonancia con el promedio de América Latina [3]. Sin embargo, aún quedan muchos retos. La principal son las pérdidas en distribución y transmisión debido a las interrupciones que sufre el sistema.

Con respecto a la calidad del servicio, en el año 2005 la cantidad media de interrupciones por cliente fue de 14,5, mientras que la duración de las interrupciones por cliente fue de 18,3 horas. Ambas cifras se aproximan mucho a los promedios ponderados de 13 interrupciones y 14 horas para la región de América Latina.

Las pérdidas en 2006 alcanzaron el 11% de la producción total. Las pérdidas en distribución fueron del 6,3%, más bajas que el 22 % de la década anterior y menor al 13,5% del promedio de América Latina, y las pérdidas en transmisión para el mismo año llegaron al 4,7%. [3]

Por lo cual se plantea realizar estudio de confiabilidad en alimentadores de SECHO utilizando el método probabilístico de simulación Montecarlo para determinar índices de confiabilidad, para poder mejorar la calidad del servicio que brinda la empresa Electronorte S.A.

#### **1.3.1. Planteamiento del problema**

¿Será viable realizar un estudio de confiabilidad en alimentadores de SECHO utilizando el método probabilístico de Simulación Montecarlo para determinar índices de confiabilidad?

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Conceptos generales de un sistema de distribución**

#### **2.1.1. Sistema eléctrico de distribución**

Un sistema de distribución de energía eléctrica es un conjunto de equipos que permiten energizar en forma segura y confiable un número determinado de cargas, en distintos niveles de tensión, ubicados generalmente en diferentes lugares. [4]

##### **2.1.1.1. Especificación técnica de un sistema de distribución**

Los principales datos de sistema eléctricos son la tensión nominal, la frecuencia nominal y su comportamiento en caso de cortocircuito. Los sistemas de distribución de energía eléctrica comprenden niveles de alta, baja y media tensión.

##### **2.1.1.2. Clasificación de los sistemas de distribución**

Dependiendo de las características de las cargas, los volúmenes de energía involucrados, y las condiciones de confiabilidad y seguridad con que deban operar, los sistemas de distribución se clasifican en:

###### **2.1.1.2.1. Sistemas de distribución industrial**

Comprende a los grandes consumidores de energía eléctrica, tales como las industrias del acero, químicas, petróleo, papel, etc. Que generalmente reciben el suministro eléctrico en alta tensión. Es frecuente que la industria genere parte de su demanda de energía eléctrica mediante procesos a vapor, gas o diésel.

## **Características de operación**

Para comprobar las características de operación, confiabilidad y seguridad de un sistema de distribución industrial, es necesario efectuar una serie de estudios analíticos; los cuales entregan índices de funcionamiento, cuya exactitud dependerá del modelo empleado en la representación del sistema. Los estudios típicos que se efectúan en un SDI son los siguientes:

- Flujos de potencia.
- Cálculo de corrientes de cortocircuito.
- Regulación de tensión y compensación de reactivos.
- Partida de motores.

### **2.1.1.2.2. Sistemas de distribución comercial.**

Es un término colectivo para sistemas de energía existentes dentro de grandes complejos comerciales y municipales, tales como edificios de gran altura, bancos, supermercados, escuelas, aeropuertos, hospitales, puertos, etc. Este tipo de sistemas tiene sus propias características, como consecuencia de las exigencias especiales en cuanto a seguridad de las personas y de los bienes, por lo que generalmente requieren de importantes fuentes de respaldo en casos de emergencia.

### **2.1.1.2.3. Sistemas de distribución urbana.**

Alimenta la distribución de energía eléctrica a poblaciones y centros urbanos de gran consumo, pero con una densidad de cargas pequeña. Son sistemas en los cuales es muy importante la adecuada selección en los equipos y el dimensionamiento.

#### **2.1.1.2.4. Sistemas de distribución rural.**

Estos sistemas de distribución se encargan del suministro eléctrico a zonas de menor densidad de cargas, por lo cual requiere de soluciones especiales en cuanto a equipos y a tipos de red. Debido a las distancias largas y las cargas pequeñas, es elevado el costo del kW/h consumido.

#### **2.1.1.3. Clasificación de las redes**

Las redes de las empresas eléctricas concesionarias tienen como punto de partida las denominadas subestaciones de distribución primaria, cuyo objetivo es el de reducir el voltaje desde el nivel de transporte al de alta tensión de distribución. Las redes de alta tensión de distribución de las empresas eléctricas son llamadas comúnmente en esta parte de los sistemas como: “alimentadores”, las que pueden ser tanto aéreas como subterráneas, y que a la vez, pueden alimentar directamente a clientes de grandes potencias que cuentan con transformadores propios (llamados clientes de AT), o bien, a sub-redes por medio de transformadores de baja tensión de distribución, a las que se conectan clientes que poseen niveles de potencia bajos y medianos.

En el Perú existen estos niveles de voltajes:

- MUY ALTA TENSION (kV) : 500
- ALTA TENSION (kV) : 60 - 138 – 220
- MEDIA TENSION (kV) : 20.9 - 22.9 - 33 - 22.9/13.2 - 33/19
- BAJA TENSION (V) : 380/220 - 440/220. [5]

Las empresas concesionarias, presentan principalmente dos esquemas de alimentación: los sistemas radiales y los anillados.

### 2.1.1.3.1. Sistemas radiales

Consisten en poseer un conjunto de alimentadores de alta tensión, que suministran potencia en forma individual, a un grupo de transformadores. Cuando una red radial alimenta a transformadores, se obtienen las redes de distribución de baja tensión, normalmente trifásicas de cuatro hilos, y siempre del tipo sólidamente aterrizadas.

Una desventaja de los sistemas radiales es que al fallar un transformador, su alimentador en alta o en media tensión, ocasiona en todos los clientes de baja tensión asociados a ese transformador la ausencia de suministro de energía. Además, no son redes que aseguren una buena continuidad del servicio, pero son económicas.

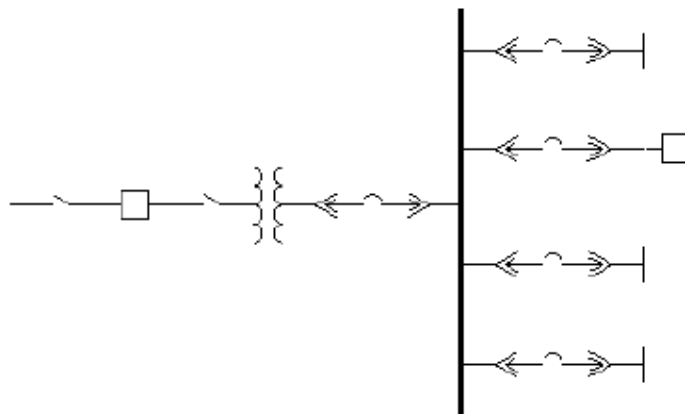


Ilustración 1. Sistema de distribución radial.

### 2.1.1.3.2. Sistemas anillados

Los de alta tensión, se caracterizan por tener el lado primario del transformador conectado a una barra donde le llegan dos puntos de alimentación, proporcionando así una continuidad del servicio en caso de que ocurra una falla en alguno de los extremos de alimentación. Pudiéndose suministrar la energía por el punto de alimentación que está en operación sin falla.

Como se había mencionado anteriormente una gran ventaja que presenta esta topología es la continuidad del servicio no así en un circuito radial, no

obstante cabe mencionar que el sistema se hace más complejo en las operaciones.

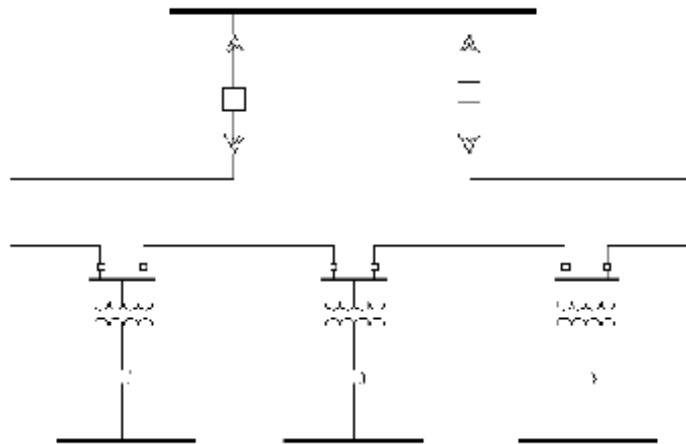


Ilustración 2. Sistema de distribución anillado.

#### **2.1.1.4. Elementos que componen el sistema de distribución**

##### **2.1.1.4.1. Sistema de subtransmisión**

Transfieren la energía de los respectivos centros de producción o generación las líneas de Subtransmisión de 60 kV, las que entregan la energía a las subestaciones de distribución.

##### **2.1.1.4.2. Subestación de distribución**

Transforman la energía a un nivel de tensión más baja, adecuada para la distribución local, compuesta por la recepción de las líneas de transmisión o subtransmisión, transformador de reducción, salida de las líneas primarias, equipos de protección. Sus instalaciones están implementadas con su respectivo centro de control y mantenimiento.

##### **2.1.1.4.3. Sistema de distribución primario**

Conjunto de líneas y seccionamientos que alimentan un área bien definida, compuesta por troncales trifásicos, laterales de dos fases y monofásicos, que enlazan a los transformadores de distribución.

#### **2.1.1.4.4. Redes de distribución secundarias**

Conjunto de líneas que transportan la energía a lo largo de las calles a un nivel de voltaje de utilización que enlazan al transformador de distribución con las acometidas.

#### **2.1.1.4.5. Acometidas**

Transportan la energía de las redes de distribución secundaria a los empalmes del contador de energía de cada abonado.

#### **2.1.1.4.6. Red de alumbrado público**

Incluye las exigencias relativas al alumbrado y a su instalación en vías expresas, arterias principales, vías colectoras, calles, locales, cruces, plazas, parques, etc., formado por luminarias, lámparas, y los accesorios para el montaje.

#### **2.1.1.4.7. Contadores de energía (Medidores)**

Censa el consumo de energía en kilovatios hora para su respectiva facturación.

### **2.1.1.5. Fallas en sistemas de potencia**

#### **2.1.1.5.1. Tipos de fallas**

Los tipos de fallas que experimentan los sistemas de potencia se caracterizan en dos grandes grupos: serie y paralelo. Las fallas en serie están asociadas generalmente a la ruptura de conductores, pero éstos no involucran contacto con tierra u otra fase. Las fallas en paralelo están asociadas a cortocircuitos a tierra o con otras fases y este grupo se subdivide en cinco tipos: a) Monofásicas, b) Bifásicas, c) Bifásicas a tierra, d) Trifásicas y e) Trifásicas a tierra.

Estudios han determinado que aproximadamente el 80% del total de fallas en el sistema de potencia, corresponden a fallas en el sistema de distribución. Del total de fallas en sistemas de distribución, aproximadamente el 70% corresponde a fallas monofásicas a tierra.

#### **2.1.1.5.2. Modelado de fallas**

El modelado clásico de las fallas en los sistemas de potencia utiliza la teoría de las componentes simétricas. Los diferentes tipos de fallas para sistemas equilibrados se modelan como se presenta en la ilustración 3 y se resume a continuación. Para obtener el modelo, se consideran las condiciones de falla, se obtienen las componentes de secuencia de las corrientes y las tensiones, y se determina la conexión de las redes de secuencia. A partir del modelo de la falla, cuando ésta ocurra, es necesario calcular las tensiones y corrientes de secuencia y finalmente obtener los valores de fase.

El modelo general de una falla monofásica a tierra de la fase A, a través de una resistencia de falla  $R_g$ , se representa como la interconexión en serie de las redes de secuencia, positiva, negativa y cero, y tres veces el valor de la resistencia de falla.

Las fallas bifásicas entre las fases B y C, a través de una resistencia  $R_f$ , donde simultáneamente existe una falla a tierra entre las mismas fases a través de una resistencia  $R_g$ , está modelada como la interconexión paralela de las redes de secuencia positiva, negativa y cero. Las redes de secuencia positiva y negativa incluyen la resistencia  $R_f$ , mientras que la red de secuencia cero incluye la resistencia de  $R_f$  y tres veces la resistencia de falla a tierra  $R_g$ .

Para el caso de las fallas bifásicas entre las fases B y C, a través de una resistencia  $R_f$  sin conexión a tierra, el modelo se obtiene de la interconexión

paralela de las redes de secuencia positiva y negativa. La red de secuencia cero permanece aislada.

Finalmente, para el caso de fallas trifásicas que no involucran tierra, las redes de secuencia permanecen independientes. Si se considera que el sistema es equilibrado y operaba antes de la falla bajo condiciones balanceadas, las redes de secuencia negativa y cero no tienen fuentes.

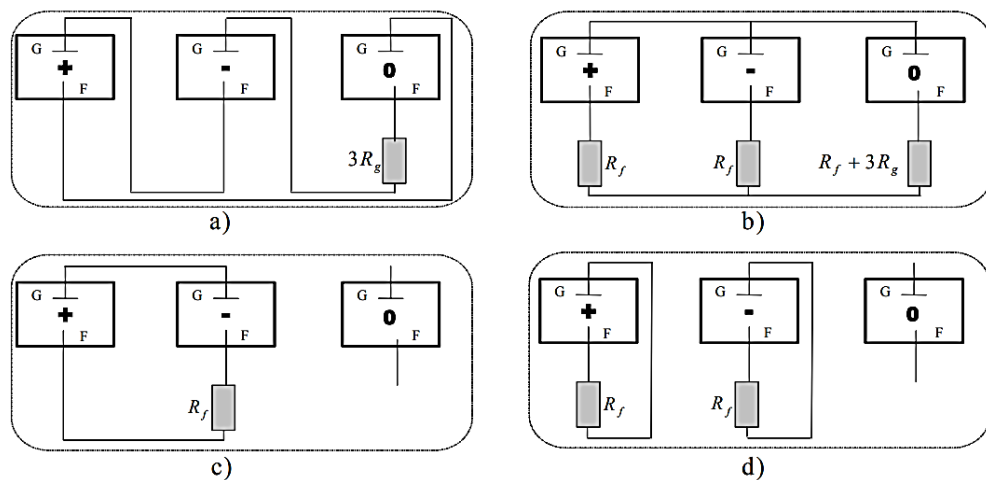


Ilustración 3. Conexión de las redes de secuencia para fallas a) monofásica, b) fase- fase-tierra, c) fase-fase, d) trifásica.

Para las fallas en las fases mencionadas, la referencia de las componentes simétricas es la fase A. Las fallas en fases diferentes a las mencionadas, se analizan a partir del cambio en la referencia de las componentes simétricas.

### 2.1.1.5.3. Resistencia de falla

Otro aspecto de fundamental importancia en este análisis es el relacionado con la resistencia de falla. La mayoría de las fallas es del tipo resistivo y pueden tener resistencia de arco y de tierra. Esta resistencia puede ser constante para toda la duración de la falla o puede variar con la elongación y extinción del arco. En fallas fase-fase, la resistencia de falla se debe completamente al arco. Para fallas que involucran la tierra, la resistencia de falla incluye ambos tipos de resistencia.

#### **2.1.1.5.4. Localización de fallas en sistemas de potencia**

Los métodos de localización de fallas más rudimentarios consistían en la inspección visual, el seccionamiento, la reparación y la posterior energización de los circuitos en falla reportados por los clientes. Estos métodos consumen mucho tiempo debido a la extensión de las redes, y además pueden ser peligrosos para las personas o causar daños en los equipos, cuando por cualquier circunstancia se energiza el circuito cuando todavía está en falla. Normalmente estos métodos se complementan con el uso de detectores de paso de corrientes de falla, ubicados estratégicamente en las estructuras de soporte a lo largo de los alimentadores del sistema. Estas alternativas hacen que el método sea económicamente más costoso y normalmente, bajo condiciones adversas de clima o por falta de mantenimiento, estos indicadores pueden deteriorarse y salir de servicio. [6]

## **2.2. Introducción al modelado de sistemas**

### **2.2.1. Sistemas y modelos**

En el sentido amplio del término, un modelo es una representación de un sistema desarrollada para un propósito específico. Puesto que la finalidad de un modelo es ayudarnos a responder preguntas sobre un determinado sistema, el primer paso en la construcción de un modelo es definir cuál es el sistema y cuáles son las preguntas. En este contexto, se entiende por sistema cualquier objeto o conjunto de objetos cuyas propiedades se desean estudiar.

Con una definición tan amplia, cualquier fuente potencial de datos puede considerarse un sistema. Algunos ejemplos de sistema son:

- Una planta de fabricación con máquinas, personal, dispositivos de transporte y almacén.
- El servicio de emergencias de un hospital, incluyendo al personal, las salas, el equipamiento y el transporte de los pacientes.

- Una red de ordenadores con servidores, clientes, dispositivos de disco y de cinta, impresoras, etc.
- Un supermercado con control de inventario, cajeros y atención al cliente.
- Un parque temático con atracciones, tiendas, restaurantes, trabajadores, clientes y aparcamientos.

Un procedimiento para conocer el comportamiento de los sistemas es la experimentación. De hecho, éste ha sido el método empleado durante siglos para avanzar en el conocimiento: plantear las preguntas adecuadas acerca del comportamiento de los sistemas y responderlas mediante experimentación. Un experimento es el proceso de extraer datos de un sistema sobre el cual se ha ejercido una acción externa. [7]

Cuando es posible trabajar directamente con el sistema real, el método experimental presenta indudables ventajas. Sin embargo, para que los resultados del experimento sean válidos, debe garantizarse que no existen variables ocultas “confundidas” con las variables experimentales. Por ejemplo, continuando con el modelo del supermercado, si la afluencia de público durante el periodo en que se experimenta una estrategia de servicio es significativamente mayor que durante el periodo en que se experimenta la otra, no podrá extraerse ninguna conclusión válida sobre el tiempo medio de espera de los clientes en la cola de las cajas.

El método experimental está basado en sólidos fundamentos científicos, sin embargo tiene sus limitaciones, ya que en ocasiones es imposible o desaconsejable experimentar con el sistema real. En estos casos, el modelado y la simulación son las técnicas adecuadas para el análisis de sistema, puesto que, a excepción de la experimentación con el sistema real, la simulación es la única técnica disponible que permite analizar sistemas arbitrarios de forma precisa, bajo diferentes condiciones experimentales.

Existen múltiples razones por las cuales la experimentación con el sistema real puede resultar inviable:

- Quizá la más evidente de ellas es que el sistema aun no exista físicamente. Esta situación se plantea frecuentemente en la fase de diseño de nuevos sistemas, cuando el ingeniero necesita predecir el comportamiento de los mismos antes de que sean construidos.
- Otra posible razón es el elevado coste económico del experimento.
- El experimento puede producir perjuicio o incomodidad.
- En ocasiones el tiempo requerido para la realización del experimento lo hace irrealizable.
- Algunos experimentos son peligrosos, y por tanto es desaconsejable realizarlos.
- En ocasiones el experimento requiere modificar variables que en el sistema real o bien no están accesibles o no pueden ser modificadas en el rango requerido. Con un modelo matemático adecuado, se pueden ensayar condiciones de operación extremas que son impracticables en el sistema real.

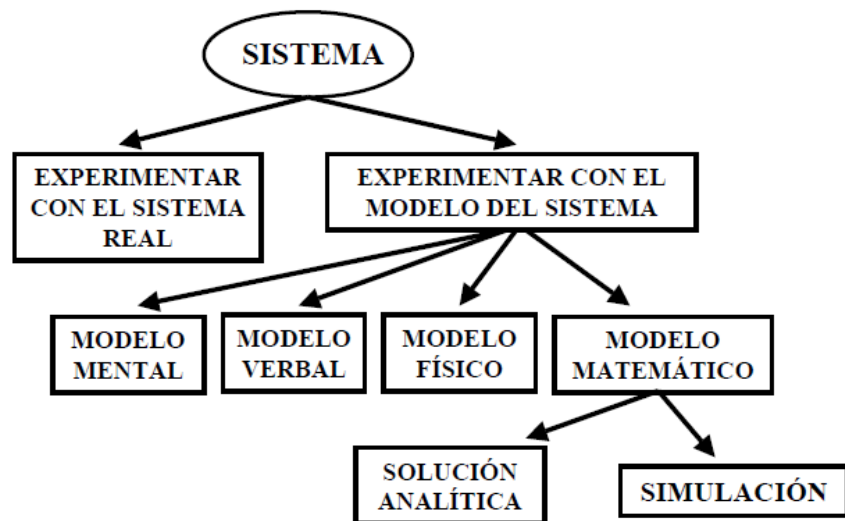


Ilustración 4. Formas de estudiar un sistema.

### 2.2.2. Tipos de modelos

Los seres humanos, en nuestra vida cotidiana, empleamos continuamente modelos para comprender y predecir el comportamiento de sistemas. Por ejemplo, considerar que alguien es “amable” constituye un modelo del comportamiento de esta persona. Este modelo nos ayuda a responder, por ejemplo, a la pregunta: “¿cómo reaccionará si le pedimos un favor?”. También disponemos de modelos de los sistemas técnicos

que están basados en la intuición y en la experiencia. Todos estos se llaman modelos mentales.

Por ejemplo, aprender a conducir un coche consiste parcialmente en desarrollar un modelo mental de las propiedades de la conducción del coche. Asimismo, un operario trabajando en determinado proceso industrial sabe cómo el proceso reacciona ante diferentes acciones: el operario, mediante el entrenamiento y la experiencia, ha desarrollado un modelo mental del proceso.

Otro tipo de modelos son los modelos verbales, en los cuales el comportamiento del sistema es descrito mediante palabras: si se aprieta el freno, entonces la velocidad del coche se reduce. Los sistemas expertos son ejemplos de modelos verbales formalizados. Es importante diferenciar entre los modelos mentales y los verbales. Por ejemplo, nosotros usamos un modelo mental de la dinámica de la bicicleta cuando la conducimos, sin embargo no es sencillo convertirlo a un modelo verbal.

Además de los modelos mentales y verbales, existe otro tipo de modelos que tratan de imitar al sistema real. Son los modelos físicos, como las maquetas a escala que construyen los arquitectos, diseñadores de barcos o aeronaves para comprobar las propiedades estéticas, aerodinámicas, etc.

Finalmente, existe un cuarto tipo de modelos, los modelos matemáticos. En ellos, las relaciones entre las cantidades que pueden ser observadas del sistema (distancias, velocidades, flujos, etc.) están descritas mediante relaciones matemáticas. En este sentido, la mayoría de las leyes de la naturaleza son modelos matemáticos.

Por ejemplo, para el sistema “masa puntual”, la Ley de Newton del movimiento describe la relación entre la fuerza y la aceleración. Asimismo, para el sistema “resistencia eléctrica”, la Ley de Ohm describe la relación entre la caída de tensión y el flujo de corriente.

En algunos casos, las relaciones matemáticas que constituyen los modelos son sencillas y pueden resolverse analíticamente. Sin embargo, en la mayoría de los

casos, los modelos no pueden resolverse analíticamente y deben estudiarse, con ayuda del ordenador, aplicando métodos numéricos.

Este experimento numérico realizado sobre el modelo matemático, recibe el nombre de simulación.

### **2.2.3. Modelos matemáticos**

La finalidad de un estudio de simulación (es decir, las preguntas que debe responder) condiciona las hipótesis empleadas en la construcción del modelo, y éstas a su vez determinan qué tipo de modelo resulta más adecuado al estudio. De hecho, un mismo sistema puede ser modelado de múltiples formas, empleando diferentes tipos de modelos, dependiendo de la finalidad perseguida en cada caso.

Existen diferentes clasificaciones de los modelos matemáticos, atendiendo a diferentes criterios. A continuación se describen algunas de las clasificaciones más comúnmente usadas.

#### **2.2.3.1. Determinista vs Estocástico**

Un modelo matemático es determinista cuando todas sus variables de entrada son deterministas, es decir, el valor de cada una de ellas es conocido en cada instante.

Un ejemplo de modelo determinista es un servicio al cual los clientes acceden ordenadamente, cada uno a una hora preestablecida (de acuerdo, por ejemplo, con un libro de citas), y en el cual el tiempo de servicio a cada cliente está igualmente preestablecido de antemano. No existe incertidumbre en la hora de inicio o de finalización de cada servicio.

Por el contrario, un modelo es estocástico cuando alguna de sus variables de entrada es aleatoria. Las variables del modelo calculadas a partir de variables aleatorias son también aleatorias. Por ello, la evolución de este tipo de sistemas debe estudiarse en términos probabilísticos.

Por ejemplo, considérese el modelo de parking, en el cual las entradas y salidas de coches se producen en instantes de tiempo aleatorios. La aleatoriedad de estas variables se propaga a través de la lógica del modelo, de modo que las variables dependientes de ellas también son aleatorias. Este sería el caso, por ejemplo, del tiempo que transcurre entre que un cliente deja aparcado su vehículo y lo recoge (tiempo de aparcamiento), el número de vehículos que hay aparcados en un determinado instante, etc.

Es importante tener en cuenta que realizar una única réplica de una simulación estocástica es equivalente a realizar un experimento físico aleatorio una única vez.

Por ejemplo, si se realiza una simulación del comportamiento del parking durante 24 horas, es equivalente a observar el funcionamiento del parking real durante 24 horas. Si se repite la observación al día siguiente, seguramente los resultados obtenidos serán diferentes, y lo mismo sucede con la simulación: si se realiza una segunda réplica independiente de la primera, seguramente los resultados serán diferentes.

La consecuencia que debe extraerse de ello es que el diseño y el análisis de los experimentos de simulación estocásticos debe hacerse teniendo en cuenta esta incertidumbre en los resultados, es decir, debe hacerse empleando técnicas estadísticas.

Las dificultades asociadas a la simulación de modelos estocásticos pueden invitarnos en ocasiones a realizar hipótesis adicionales, con el fin de eliminar la incertidumbre en el valor de las variables de entrada. Un ejemplo típico consiste en sustituir cada variable de entrada aleatoria por otra determinista, cuyo valor sea la media de la distribución de probabilidad de aquella. Este modelo determinista, obtenido de eliminar la incertidumbre en el valor de las variables de entrada, proporcionará resultados no aleatorios. Sin embargo, esta simplificación hará que probablemente el modelo ya no sea una representación del sistema válida para el objetivo del estudio.

### **2.2.3.2. Estático vs Dinámico**

Un modelo de simulación estático es una representación de un sistema en un instante de tiempo particular, o bien un modelo que sirve para representar un sistema en el cual el tiempo no juega ningún papel. Ejemplo de simulaciones estáticas son las simulaciones de Montecarlo.

Por otra parte, un modelo de simulación dinámico representa un sistema que evoluciona con el tiempo.

### **2.2.3.3. De tiempo continuo vs De tiempo discreto vs Híbrido**

Un modelo de tiempo continuo está caracterizado por el hecho de que el valor de sus variables de estado puede cambiar infinitas veces (es decir, de manera continua) en un intervalo finito de tiempo. Un ejemplo es el nivel de agua en un depósito.

Por el contrario, en un modelo de tiempo discreto los cambios pueden ocurrir únicamente en instantes separados en el tiempo. Sus variables de estado pueden cambiar de valor sólo un número finito de veces por unidad de tiempo.

Pueden definirse modelos con algunas de sus variables de estado de tiempo continuo y las restantes de tiempo discreto. Este tipo de modelos, con parte de tiempo continuo y parte de tiempo discreto, se llama modelos híbridos.

Tal como se ha indicado al comienzo de la sección, la decisión de realizar un modelo continuo o discreto depende del objetivo específico del estudio y no del sistema en sí. Un ejemplo de ello lo constituyen los modelos del flujo de tráfico de vehículos. Cuando las características y el movimiento de los vehículos individuales son relevantes puede realizarse un modelo discreto. En caso contrario, puede resultar más sencillo realizar un modelo continuo.

En este punto es conveniente realizar una consideración acerca de los modelos de tiempo continuo y discreto. Al igual que las variables continuas (aquellas que pueden tomar cualquier valor intermedio en su rango de variación) son una

idealización, también lo son los modelos de tiempo continuo. Cualquiera que sea el procedimiento de medida que se emplee para medir el valor de una variable, tendrá un límite de precisión. Este límite marca la imposibilidad de dar una medida continua y supone que, en la práctica, todas las medidas son discretas. Igualmente, los ordenadores trabajan con un número finito de cifras decimales. Sin embargo, para los razonamientos teóricos, conviene considerar ciertas variables como continuas.

Al simular mediante un computador digital un modelo de tiempo continuo, debe discretizarse el eje temporal a fin de evitar el problema de los infinitos cambios en el valor de los estados. Esta discretización constituye una aproximación (con su error asociado) que transforma el modelo de tiempo continuo en un modelo de tiempo discreto. Por ejemplo, si se discretiza el eje temporal del modelo de tiempo continuo.

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t)$$

Con un intervalo de discretización  $\Delta t$ , se obtiene (empleando el método de Euler explícito) el siguiente modelo de tiempo discreto:

$$\frac{x_{K+1} - x_K}{\Delta t} = f(x_K, u_K, t_K) \rightarrow x_{K+1} = x_K + \Delta t * f(x_K, u_K, t_K)$$

## 2.3. Confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución

### 2.3.1. Confiabilidad

La confiabilidad de los sistemas eléctricos, puede afectar positiva o negativamente la productividad y la seguridad de los procesos y de personas en una empresa. Por esta razón, la disponibilidad del fluido eléctrico se ha vuelto un tema de vital importancia para las compañías.

La confiabilidad, es la probabilidad de que un equipo o un sistema cumplan con su misión específica bajo condiciones de uso determinadas en un periodo determinado.

El nivel de confiabilidad requerido por un sistema debe ser establecido de acuerdo con la criticidad de las cargas del mismo y debe basarse en estudios que contemplen las necesidades o características del proceso en términos de disponibilidad, seguridad, mantenimiento y fiabilidad.

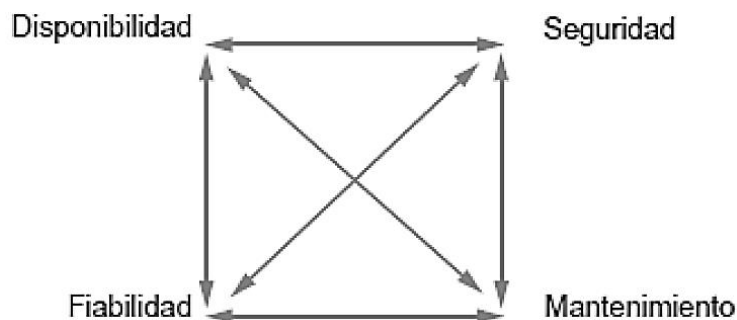


Ilustración 5. Los componentes de la garantía de funcionamiento.

Las cargas de un sistema se deben clasificar de acuerdo con su sensibilidad a la pérdida de continuidad de servicio:

- Cargas que aceptan paradas prolongadas 1 o más horas (No prioritarias).
- Cargas que aceptan paradas por varios minutos (Prioritarias).
- Cargas que deben alimentarse de nuevo en cuestión de segundos (Esenciales).
- Cargas que no aceptan ninguna interrupción (Vitales). [8]

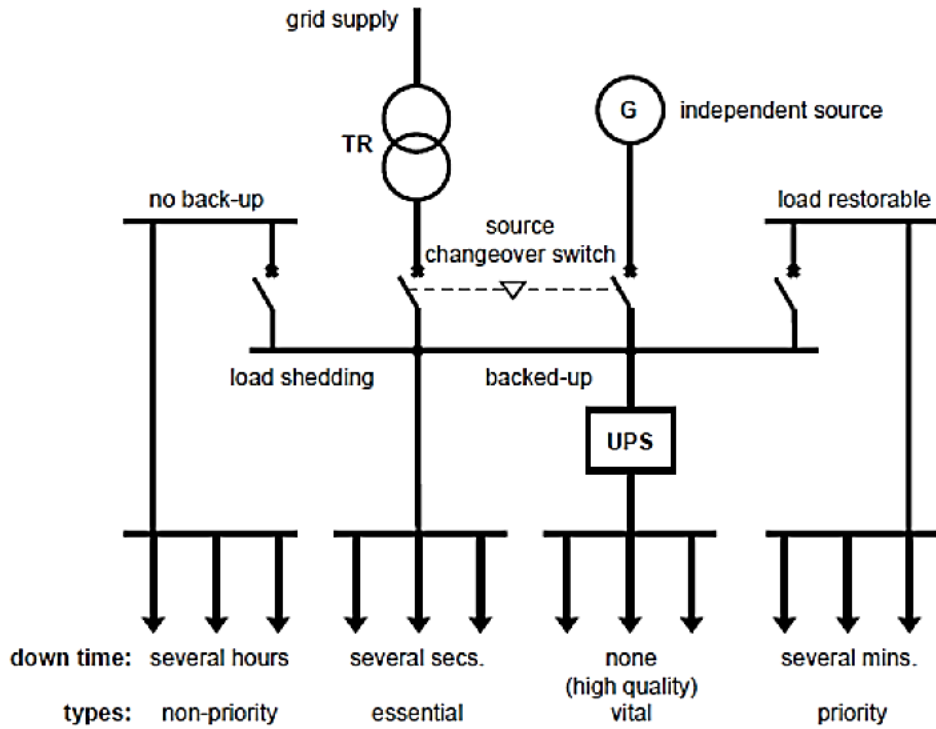


Ilustración 6. Diagrama de red simplificado de una fuente de alimentación confiable.

Por diversos motivos, los componentes de un sistema eléctrico se van sometidos a fallas, o salidas de servicio, lo que en algunos casos puede significar la desconexión de uno o más consumidores del sistema eléctrico. El objetivo de la evaluación de confiabilidad de una red eléctrica, es decir, sistemas de distribución o transmisión es determinar índices que reflejan la calidad de servicio que presenta un sistema para el consumidor o usuario final.

Se describen a continuación algunas técnicas de modelación y evaluación de confiabilidad, orientadas a predecir índices de comportamiento futuro. Existen dos clases de métodos para evaluar la confiabilidad: los métodos de simulación estocástica, el más conocido es el de Montecarlo y, entre los métodos de análisis, se tienen los procesos continuos de Markov, los de redes y sus aproximaciones. [9]

### **2.3.1.1. Método Montecarlo**

Consiste en la simulación de una gran cantidad de situaciones, generadas en forma aleatoria, donde los valores de los índices de confiabilidad corresponden a los momentos de las distribuciones de probabilidad. Sin embargo, hay preferencia por los métodos de análisis, dado que es mucho más fácil su manejo.

### **2.3.1.2. Método de Markov**

La mayoría de los métodos analíticos están basados en los procesos continuos de Markov, por lo tanto se presenta a continuación un breve resumen de los conceptos más importantes con esta técnica.

Una red eléctrica, es decir un sistema de distribución o de transmisión, se considera como un sistema reparable, esto significa que al fallar un elemento, éste es reemplazado o reparado, dependiendo de la naturaleza del elemento en cuestión. De esta manera se restablece la condición de operación normal del sistema, o parte de la red afectada. Así entonces, el sistema es continuo en el tiempo, con estados discretos finitos, ajustándose muy bien a una reparación por medio de procesos continuos de Markov. [9]

### **2.3.2. Índices de adecuación**

La confiabilidad de un sistema de distribución de energía eléctrica se valora por medio de índices de adecuación en los puntos de carga.

Los índices de adecuación en los puntos de carga se pueden acumular para obtener los índices a nivel de alimentador primario, subestación de distribución o sistema total. [10] A nivel internacional existen índices ampliamente difundidos. En el presente proyecto se utilizan los siguientes:

### 2.3.2.1. Tiempo medio antes de que la primera falla ocurra (Mean Time To Failure)

Es el tiempo promedio que funcionará un elemento antes de fallar. Es la media de vida útil del elemento. [11]

$$MTTF = \frac{\text{Número de horas de operación}}{\text{Número de unidades bajo prueba}}$$

### 2.3.2.2. Tiempo medio para reparar una falla (Mean Time To Repair)

Es el tiempo promedio que un equipo, máquina, línea o planta cumple su función sin interrupción debido a una falla. Se obtiene dividiendo el tiempo total de operación entre el número de paros por fallas.

$$MTTR = \frac{\text{Tiempo total de reparaciones correctivas}}{\text{Número de reparaciones correctivas}}$$

### 2.3.2.3. Tiempo medio entre fallas (Mean Time Between Failures)

Es el tiempo promedio que un equipo, máquina, línea o planta cumple su función sin interrupción debido a una falla. Se obtiene dividiendo el tiempo total de operación entre el número de paros por fallas. [12]

$$MTBF = \frac{\text{Número de horas de operación}}{\text{Número de paradas correctivas}}$$

Para evaluar una sección de “N” equipos, se puede expandir la fórmula anterior a:

$$MTBF \text{ de sección } A = \frac{\sum_{i=1}^n (\text{horas de operación})}{\sum_{i=1}^n (N^{\circ} \text{ paradas correctivas})}$$

### 2.3.3. Interrupciones

Una interrupción es una suspensión temporal de la ejecución de un proceso. Las interrupciones deben de clasificarse tomando en cuenta ciertos criterios para de esta manera facilitar el análisis de los distintos tipos de interrupciones en el sistema.

#### 2.3.3.1. Clasificación de interrupciones

A continuación se muestra una clasificación general de las interrupciones que se presentan:

CLASIFICACIÓN	TIPO	DENOMINACIÓN
DURACIÓN	MOMENTÁNEA	Son menores o iguales a 3 minutos: atribuidas a conexión y reconexión de equipos.
	SOSTENIDA	Son mayores a 3 minutos.
ORIGEN	INTERNA	Falla dentro del sistema de distribución.
	EXTERNA	Falla que se presenta fuera del sistema
CAUSAS	FORZADA	Por: reparación mantenimiento mejoramiento ampliación maniobra
	PROGRAMADA	Por: racionamiento mejoramiento ampliación maniobra

Ilustración 7. Tipos de interrupciones en un sistema de distribución.

#### 2.3.4. Técnicas de evaluación

Los índices de confiabilidad del sistema de distribución tal como están definidos sirven para valorar la adecuación del sistema de acuerdo a su comportamiento pasado. Sin embargo, en el planeamiento de sistemas de distribución es de interés predecir los índices futuros del sistema. Para la predicción, las técnicas de evaluación más utilizadas son:

#### 2.3.4.1. Bloques de Frecuencia y Duración

El modelamiento en bloques de frecuencia cada componente se representa como un bloque reparable descrito por una frecuencia de fallas constante y un tiempo medio para reparación constante. El sistema se representa por una red donde los bloques que representan a cada componente están conectados en serie y paralelo. El utilizar una tasa de fallas y reparación constante implica asumir que las distribuciones de probabilidad de los tiempos para falla y reparación sean exponencial. Este método solo se puede utilizar si las indisponibilidades individuales de los componentes son pequeñas (< 10% anual) y solo los valores esperados de  $\lambda$ ,  $r$ ,  $U$  en los puntos de carga. [13]

#### 2.3.5. Clasificación de estados

En función de la protección asociada, así como de sus alternativas de alimentación, cada tramo del sistema tendrá un comportamiento que puede definirse de la siguiente manera, ante la existencia de una falla en otro tramo de alimentador.

- **Normal:** El estado del tramo de alimentador se define como normal, cuando su operación no se ve afectada por falla en el elemento.
  - **Restablecible:** El estado del tramo de alimentador se define como restablecible, cuando su servicio puede volver a la normalidad, antes de reparar el elemento fallado, aislado mediante algún elemento de maniobra.
  - **Transferible:** El tramo de alimentador será transferible, cuando exista alguna maniobra para re-energizado, antes de reparar el bloque en falla.
  - **Irrestablecible:** Son tramos irrestablecibles aquellos que sufren la falla y todos los que no pueden ser transferidos de otra fuente de alimentación mediante maniobras.
  - **Irrestablecible con espera:** El tramo, en falla, se define como Irrestablecible con espera, cuando previo a su reparación debe realizarse alguna maniobra.
- [9]

## 2.3.6. Confiabilidad en sistemas serie y paralelo

### 2.3.6.1. Sistema serie

Dos componentes de un sistema se consideran conectados en serie, en términos de confiabilidad, cuando la falla de uno ocasiona la falla del sistema completo. La probabilidad de que el sistema falle antes de (t) años es la probabilidad conjunta de que sólo el elemento uno falle antes de (t), que sólo el elemento dos falle antes de (t) y que ambos elementos fallen antes de (t):

$$P(T \leq t) = P1(T \leq t)P2(T > t) + P1(T > t)P2(T \leq t) + P1(T \leq t)P2(T \leq t)$$

Si la confiabilidad de cada elemento puede ser descrita mediante una distribución exponencial:

$$Pk(t) = 1 - e^{-\lambda_k t}$$

Entonces:

$$P(T \leq t) = 1 - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

La confiabilidad se define como la probabilidad de que el sistema trabaje sin fallas durante un tiempo t:

$$Rk(t) = P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

El valor esperado que operara el sistema sin falla se puede demostrar que es:

$$E(T) = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

### 2.3.6.2. Sistema paralelo

Dos componentes de un sistema se consideran conectados en paralelo, en términos de confiabilidad, cuando la falla de uno no ocasiona la falla del sistema, muy por el contrario continúa funcionando normalmente. Este esquema puede ser descrito como redundante por construcción. La probabilidad de que el sistema falle antes de (t) años es la probabilidad conjunta de que el elemento uno falle antes de (t) y el elemento dos también falle antes de (t):

$$P(T \leq t) = P_1(T \leq t)P_2(T > t)$$

Si la confiabilidad de cada elemento puede ser descrita mediante una distribución exponencial:

$$Pk(t) = 1 - e^{-\lambda_k t}$$

Entonces:

$$P(T \leq t) = (1 - e^{-\lambda_1 t})(1 - e^{-\lambda_2 t})$$

La confiabilidad se define como probabilidad de que el sistema trabaje sin fallas durante un tiempo (t):

$$Rk(t) = P(T > t) = 1 - P(T \leq t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t}$$

El valor esperado que operara el sistema sin que falle se puede demostrar que es:  
[14]

$$E(T) = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

## 2.4. Metodología del estudio

El sistema de distribución se estudia analizando cada uno de los alimentadores primarios.

### 2.4.1. Modelamiento de la red

En los Anexos se muestra los diagramas unifilares utilizados para el modelamiento de los alimentadores del sistema de distribución.

El análisis se realiza considerando que la red es balanceada lo que permite utilizar modelamiento monofásico. Además, se valora la confiabilidad asumiendo que el circuito primario cumple los criterios de calidad y seguridad.

Obtener los planos de los alimentadores del sistema fue muy complicado ya que la empresa de energía no posee actualizados la mayoría de los planos de los 16 alimentadores. Actualmente la empresa está en un proceso de mejoramiento, por lo cual algunos alimentadores han sido modificados y se han reubicado estructuras y equipos.

### 2.4.2. Modelamiento de los componentes de la red

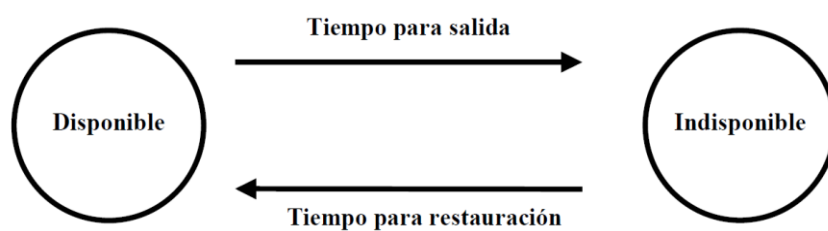


Ilustración 8. Modelo de dos estados para los componentes de la red

Para todos los componentes de la red se utiliza el modelo de dos estados mostrado en la Ilustración 8. Este modelo está descrito por:

1. La función de densidad de probabilidad de los tiempos para falla.
2. La función de densidad de probabilidad de los tiempos para reparación.

La construcción del modelo se hace ajustando los datos históricos operativos de tiempos para salida y tiempos para restauración del componente a una función de probabilidad dada (Gaussiana, Weibull, etc.). [15]

Según su naturaleza, las salidas que ocurren en un componente pueden ser no planeadas (fallas, accidentes, fenómenos ambientales, etc.) o planeadas (mantenimiento preventivo, expansión, mejoramiento, etc.).

Aunque las salidas planeadas son determinísticas, deben tenerse en cuenta para los análisis de largo plazo, pues este tipo de evento siempre existirá y contribuye a la indisponibilidad del componente. [2]

### **2.4.3. Inicios del Método de Montecarlo**

Bajo el nombre de Método Montecarlo o Simulación Montecarlo se agrupan una serie de procedimientos que analizan distribuciones de variables aleatorias usando simulación de números aleatorios.

El Método de Montecarlo da solución a una gran variedad de problemas matemáticos haciendo experimentos con muestreos estadísticos en una computadora. El método es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinístico.

Generalmente en estadística los modelos aleatorios se usan para simular fenómenos que poseen algún componente aleatorio. Pero en el método Montecarlo, por otro lado, el objeto de la investigación es el objeto en sí mismo, un suceso aleatorio o pseudo-aleatorio se usa para estudiar el modelo.

A veces la aplicación del método Montecarlo se usa para analizar problemas que no tienen un componente aleatorio explícito; en estos casos un parámetro determinista del problema se expresa como una distribución aleatoria y se simula dicha distribución.

La simulación de Montecarlo también fue creada para resolver integrales que no se pueden resolver por métodos analíticos, para solucionar estas integrales se usaron números aleatorios. Posteriormente se utilizó para cualquier esquema que emplee números aleatorios, usando variables aleatorias con distribuciones de probabilidad conocidas, el cual es usado para resolver ciertos problemas estocásticos y determinísticos, donde el tiempo no juega un papel importante.

La simulación de Montecarlo es una técnica que combina conceptos estadísticos (muestreo aleatorio) con la capacidad que tienen los ordenadores para generar números pseudo-aleatorios y automatizar cálculos.

El método fue llamado así por el principado de Mónaco por ser “la capital del juego de azar”, al tomar una ruleta como un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Montecarlo datan aproximadamente de 1944 con el desarrollo de la computadora. Sin embargo hay varias instancias (aisladas y no desarrolladas) en muchas ocasiones anteriores a 1944.

El uso real de los métodos de Montecarlo como una herramienta de investigación, proviene del trabajo de la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial. Este trabajo involucraba la simulación directa de problemas probabilísticos de hidrodinámica concernientes a la difusión de neutrones aleatorios en material de fusión.

Aún en la primera etapa de estas investigaciones, John von Neumann y Stanislaw Ulam refinaron esta curiosa “Ruleta rusa” y los métodos “de división”. Sin embargo, el desarrollo sistemático de estas ideas tuvo que esperar el trabajo de Harris y Herman Kahn en 1948. Aproximadamente en el mismo año, Fermi, Metropolis y Ulam obtuvieron estimadores para los valores característicos de la ecuación de Schrödinger para la captura de neutrones a nivel nuclear.

Alrededor de 1970, los desarrollos teóricos en complejidad computacional comienzan a proveer mayor precisión y relación para el empleo del método Montecarlo. La cuestión a ser resuelta era si Montecarlo pudiese o no estimar la

solución al problema de tipo intratable con una adecuación estadística acotada a una complejidad temporal polinomial en M. Karp (1985) muestra esta propiedad para estimar en una red plana multiterminal con arcos fallidos aleatorios. Dyer (1989) utiliza Montecarlo para estimar el volumen de un convex body en el espacio Euclidiano M-dimensional. Broder (1986), Jerrum y Sinclair (1988) establecen la propiedad para estimar la persistencia de una matriz o en forma equivalente, el número de matching perfectos en un grafo bipartito.

Los orígenes de esta técnica están ligados al trabajo desarrollado por Stan Ulam y John Von Neumann a finales de los 40 en el laboratorio de Los Álamos, cuando investigaban el movimiento aleatorio de los neutrones. En años posteriores, la simulación de Montecarlo se ha venido aplicando a una infinidad de ámbitos como alternativa a los modelos matemáticos exactos o incluso como único medio de estimar soluciones para problemas complejos.

Así, en la actualidad es posible encontrar modelos que hacen uso de simulación Montecarlo en las áreas informática, empresarial, económica, industrial e incluso social. En otras palabras, está presente en todos aquellos ámbitos en los que el comportamiento aleatorio o probabilístico desempeña un papel fundamental, precisamente, el nombre de Montecarlo proviene de la famosa ciudad de Mónaco, donde abundan los casinos de juego y donde el azar, la probabilidad y el comportamiento aleatorio conforman todo un estilo de vida.

Son muchos los autores que han apostado por utilizar hojas de cálculo para realizar simulación Montecarlo. La potencia de las hojas de cálculo reside en su universalidad, en su facilidad de uso, en su capacidad para recalcular valores y, sobre todo, en las posibilidades que ofrece con respecto al análisis de escenarios (“what-if analysis”). Las últimas versiones de Excel incorporan, además, un lenguaje de programación propio, el Visual Basic for Applications, con el cual es posible crear auténticas aplicaciones de simulación destinadas al usuario final. En el mercado existen de hecho varios complementos de Excel (Add-Ins) específicamente diseñados para realizar simulación MC, siendo los más conocidos: @Risk, Crystall Ball, Insight.xla, SimTools.xla, etc.

#### **2.4.4. Simulación Método de Montecarlo**

La simulación es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o evaluar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.

##### **2.4.4.1. Modelo de simulación**

Conjunto de hipótesis acerca del funcionamiento del sistema expresado como relaciones matemáticas y/o lógicas entre los elementos del sistema.

##### **2.4.4.2. Proceso de simulación**

Ejecución del modelo a través del tiempo en un ordenador para generar muestras representativas del comportamiento.

##### **2.4.4.3. Etapas del proceso de simulación**

- Definición, descripción del problema. Plan.
- Formulación del modelo.
- Programación.
- Verificación y Validación del modelo.
- Diseño de experimentos y plan de corridas.
- Análisis de resultados.

#### 2.4.4.4. Diagrama de flujo del modelo de simulación

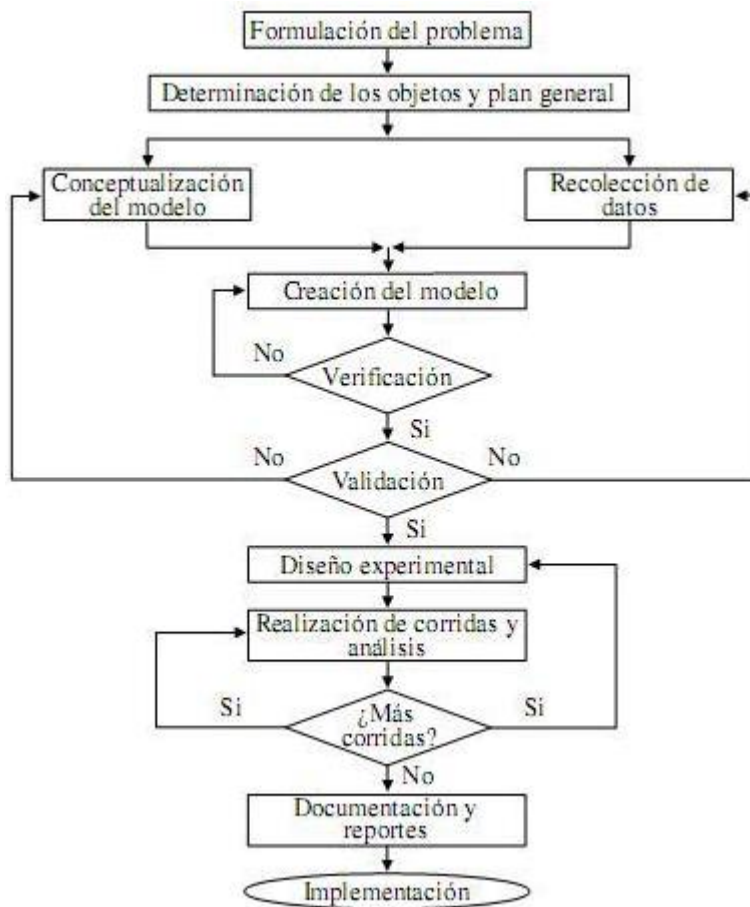


Ilustración 9. Diagrama de flujo del modelo de simulación.

#### 2.4.5. Algoritmo de Simulación de Montecarlo

No existe un algoritmo único para implementar la simulación de Montecarlo. El algoritmo de Simulación Montecarlo Crudo o Puro está fundamentado en la generación de números aleatorios por el método de Transformación Inversa, el cual se basa en las distribuciones acumuladas de frecuencias:

- Determinar la/s variable aleatoria y sus distribuciones acumuladas.
- Iterar tantas veces como muestras necesitamos.
- Calcular media, desviación estándar error y realizar el histograma.
- Analizar resultados para distintos tamaños de muestra.

Otra opción para trabajar con Montecarlo, cuando la variable aleatoria no es directamente el resultado de la simulación o tenemos relaciones entre variables es la siguiente:

- Diseñar el modelo lógico de decisión.
- Especificar distribuciones de probabilidad para las variables aleatorias relevantes.
- Incluir posibles dependencias entre variables.
- Muestrear valores de las variables aleatorias.
- Calcular el resultado del modelo según los valores del muestreo y registrar el resultado.
- Repetir el proceso hasta tener una muestra estadísticamente representativa.
- Obtener la distribución de frecuencias del resultado de las iteraciones.
- Calcular media, desvío.
- Analizar los resultados. [16]

#### **2.4.6. Simulación de Montecarlo de eventos discretas**

Los objetos o componentes de un modelo de simulación de eventos discretos se conocen como entidades (entities). Estas entidades son objetos discretos, cada uno separado del otro, y que poseen unos atributos, que pueden ser cualidades, características o propiedades que afectan a la conducta de las entidades dentro del modelo. Las entidades pueden tener dos tipos de estado: unas están ocupadas (busy) en alguna actividad, o están desocupadas (idle), sin hacer nada pero esperando en la cola. Una cola indica un estado consistente en el número de entidades que se encuentra después de acabar una actividad y antes de realizar la siguiente. Cuando una entidad se mueve desde una actividad hacia la cola, o viceversa, el estado del sistema cambia. Este instante de cambio se denomina evento.

El movimiento de entidades a través de los diferentes puntos de un modelo constituye la conducta dinámica del modelo. La conducta dinámica dentro del modelo depende del movimiento de las entidades de diferente tipo. Estas entidades entran en el entorno del sistema, posiblemente en puntos diferentes, y salen del sistema, de nuevo

en puntos diferentes. Esas llegadas al modelo son las que permiten al modelo funcionar.

Los sucesos son instantes en los que el estado del modelo cambia a través de los desplazamientos de las entidades entre puntos a través del entorno del modelo. El estado del sistema permanece constante en cualquier otro instante de tiempo. La dinámica del modelo, pues, estará determinada por la forma de incorporarse las identidades. Normalmente esta llegada es una variable aleatoria con una determinada distribución.

Los tipos de modelos más importantes de simulación de eventos discretos se pueden clasificar en:

- Manufactura
- Servicios
- Manipulación de materiales
- Redes
- Negocios

#### **2.4.7. Generación de números aleatorios**

La simulación de cualquier sistema en el que se tengan en cuenta efectos no determinísticos necesita disponer de una gran cantidad de números aleatorios, y en general, de sucesiones de realizaciones de variables aleatorias.

Existen muchos métodos para generar una variable aleatoria con una determinada función de distribución a partir de una sucesión de números aleatorios. Es conveniente, por tanto, encontrar métodos eficientes para generarlos. En primer lugar tenemos que tener en cuenta que se entiende por sucesión de números aleatorios. En teoría, es una sucesión de variables aleatorias independientes distribuidas uniformemente dentro del intervalo  $[0;1)$ .

Para que una sucesión se considere aleatoria tienen que cumplirse una serie de requisitos como que una persona que no conozca el método de generación no pueda determinar el siguiente término, o que la sucesión supere una serie de contrastes estadísticos adecuados al uso que se va a hacer de ella.

#### **2.4.7.1. Métodos mecánicos**

La generación de números aleatorios de forma totalmente aleatoria, es muy sencilla con alguno de los siguientes métodos:

- Mediante una ruleta. Si estamos interesados en obtener números aleatorios discretos de una cifra (0;1;2;...;9), se hace girar una ruleta numerando los sectores del 0 al 9 y posteriormente se tiene anotándose el número de sector. La probabilidad de obtener cualquier número de la secuencia anterior es 1/10.
- Mediante una moneda o un dado: Se lanza una moneda o un dado y se anota el resultado.
- Uso de guías telefónicas: Coger la guía telefónica de una provincia, abrir una página al azar y anotar de cada número de teléfono las cuatro últimas cifras.
- Recurrir a tablas de números aleatorios. La utilización de tablas de números aleatorios tiene lugar cuando se resuelven problemas de forma manual.

Obviamente, después de obtener una sucesión de números aleatorios resulta conveniente ver si se comportan como tales, para ello se recurre a pruebas estadísticas.

#### **2.4.7.2. Métodos de generación aritméticos**

Los procedimientos de generación de números aleatorios más utilizados son de tipo aritmético y suelen ser de tipo recursivo. Cada número aleatorio se obtiene en función del último número obtenido, o de un número relativamente pequeño

de los números obtenidos previamente. Si se considera el caso en el que cada número depende exclusivamente del anterior, la fórmula de generación será

$$x_{n+1} = f(x_n)$$

Donde inicialmente se ha indicado el valor de  $x_0$ , que se denomina semilla.

Pero la generación de números aleatorios mediante la ecuación anteriormente mencionada no son aleatorios, ya que estamos generando dichos números de forma determinista, mediante una regla aritmética. Este tipo de sucesiones se denomina pseudo-aleatoria. Se puede demostrar que la sucesión de números generados de esta manera son necesariamente cíclicos.

#### **2.4.7.2.1. Método de los cuadrados medios**

El primer método aritmético para generar números aleatorios fue propuesto por Von Neumann en 1946 y se conoce como método de los cuadrados medios. Consiste en tomar un número  $x_0$  de  $2n$  dígitos y elevarlo al cuadrado. El resultado tendrá  $4n$  dígitos (si no es así se completa con ceros a la izquierda). Los  $2n$  dígitos centrales de este producto se toman como el número aleatorio siguiente. Esto es, se eliminan los  $n$  dígitos menos significativos y los  $n$  más significativos (incluyendo ceros). El procedimiento se vuelve a repetir para este nuevo número, y así sucesivamente.

#### **2.4.7.2.2. Método congruencia lineal**

Para un número natural positivo  $m$ , al que llamaremos módulo, se generan sucesiones de números utilizando la fórmula de recurrencia:

$$x_{n+1} = (ax_n + b) \text{ mod } m \quad n \geq 0$$

Donde  $a$  (multiplicador),  $b$  (incremento),  $x_0$  (valor inicial o semilla) son números naturales menores que  $m$ , se dice en este caso que  $x_{n+1}$  es congruente con

$(ax_n + b) \bmod m$ . La fórmula indica que  $x_{n+1}$  y  $(ax_n + b)$  dan el mismo resto al dividir por el número natural  $m$ ; es decir, que  $(ax_n + b) - x_{n+1}$  es un múltiplo de  $m$ . La sucesión  $\{x_{n+1}\}_{n \geq 0}$  proporciona, en consecuencia, números naturales entre 0 y  $(m - 1)$ . Para la elección de los parámetros hay que tener en cuenta que en primer lugar que  $m$  tiene que ser tan grande como sea posible para evitar la aparición de ciclos tempranos, ya que el periodo es siempre menor o igual que  $m$ . Una opción razonable es tomar  $m$  tan grande como permita el ordenador en el que se va a trabajar, de manera que si el ordenador es binario con una palabra de 32 bits, este número será  $m = 2^{32} = 4\,294\,967\,296$ , o un valor próximo a este.

Se demuestra que los métodos congruenciales son los que producen sucesiones de números aleatorios que parecen estadísticamente aleatorios, siempre que  $a$  y  $b$  se elijan apropiadamente. No hay una regla general para la elección de  $a$ ,  $m$  y  $b$ . El método depende de varios factores incluido el hardware y el software disponible. La mayoría de los lenguajes de programación y simulación proporcionan un generador de números aleatorios.

#### **2.4.8. Generación de Variables Aleatorias**

Los modelos que se construyen para poder simular situaciones reales de naturaleza aleatoria utilizan para la modelización de fenómenos aleatorios una gran variedad de variables aleatorias, no sólo variables aleatorias uniformes.

A partir de un generador de números aleatorios, y por tanto de un simulador de variables aleatorias uniformes en  $[0;1)$ , podemos centrarnos en el problema de generar una muestra con una distribución de probabilidad específica para nuestra simulación.

#### 2.4.8.1. Simulación de variables aleatorias discretas

Aunque existen métodos particulares para ciertas variables aleatorias discretas, el siguiente problema nos proporciona un método directo para simular cualquiera de ellas.

Método de la transformación inversa. Sea  $U$  una variable aleatoria uniformemente distribuida sobre el intervalo unidad,  $U \in (0;1)$ , y sea una variable aleatoria con función puntual de probabilidad  $P(X = x_i) = p_i, i = 1; 2; \dots$  La variable aleatoria  $Y$  definida a partir de  $U$ , como:

$$Y = x_1 \text{ si } U \leq p_1$$

$$Y = x_k \text{ si } p_1 + \dots + p_{k-1} < U \leq p_1 + \dots + p_{k-1}$$

Tiene la misma distribución de probabilidad que  $X$ . Este método proporciona un método utilizable para simular cualquier variable aleatoria discreta.

#### 2.4.8.2. Simulación de variables aleatorias continuas

En este apartado seguimos un método análogo al del apartado anterior para el caso discreto, en concreto se presenta el método de la transformación inversa.

Método de transformación Inversa sea  $U$  una variable aleatoria  $U \in (0;1)$  y  $X$  una variable aleatoria absolutamente continua con función de densidad  $f(x)$  y función de distribución  $F(x), x \in I \subseteq R$ . Supongamos que existe la función inversa  $F^{-1}(u) 0 \leq u \leq 1$ . Entonces la variable aleatoria  $Y$  definida a partir de  $U$  como  $Y = F^{-1}(U)$  tiene la misma distribución de probabilidad que  $X$ .

A diferencia del caso discreto, aquí este método no siempre puede utilizarse para generar una variable aleatoria continua puesto que puede que no exista la función  $F^{-1}$ . Podemos sin embargo utilizar el siguiente método alternativo:

Método de rechazo con entorno finito  $(a, b)$ . Sean  $U_1$  y  $U_2$  variables aleatorias  $U(0; 1)$  independientes y  $X$  una variable aleatoria absolutamente continua con función de densidad  $f(x), x \in (a, b), -\infty < a < b < \infty$ . La variable aleatoria  $Y$  definida a partir de  $U_1$  y  $U_2$ , para cualquier constante  $c$ , con  $0 < c \leq 1/\max f(x)$  como:

$$Y = \begin{cases} a + (b - a)U_1 & \text{si } U_2 \leq cf(a + (b - a)U_1) \\ \text{se rechaza} & \text{si } U_2 > cf(a + (b - a)U_1) \end{cases} \quad [17]$$

### III. RESULTADOS

#### 3.1. Condiciones técnicas actuales de los alimentadores de la subestación SECHO

##### 3.1.1. Historial de interrupciones del alimentador C-212 de SECHO (2014-2015)

<b>NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO</b>	<b>MOTIVO</b>	<b>SUB MOTIVO</b>	<b>FECHA INTERRUPCIÓN</b>	<b>FECHA REPOSICIÓN</b>	<b>TIEMPO TOTAL</b>
A2002-C-212	Interrupción por Expansión y Reforzamiento	Expansión o Reforzamiento de redes Transmisión	16/07/2015 08:00:00	16/07/2015 12:00:00	4:00:00
A2002-C-212	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	19/06/2015 12:08:00	19/06/2015 12:13:00	0:05:00
A2002-C-212	Falla	Bajo nivel de aislamiento	03/02/2015 09:37:00	03/02/2015 09:52:00	0:15:00
A2002-C-212	Falla	Avería en equipo de protección y/o maniobra	25/11/2014 16:17:00	25/11/2014 19:03:00	2:46:00
A2002-C-212	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	25/11/2014 16:17:00	25/11/2014 16:27:00	0:10:00
A2002-C-212	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	06/09/2014 12:45:00	06/09/2014 12:59:00	0:14:00
A2002-C-212	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	08/08/2014 05:33:00	08/08/2014 06:34:00	1:01:00
A2002-C-212	Por maniobra sin aviso, corta	Seguridad	01/08/2014 08:47:00	01/08/2014 08:54:00	0:07:00
A2002-C-212	Falla	Cortocircuito	19/07/2014 09:37:00	19/07/2014 09:51:00	0:14:00
A2002-C-212	Otros y/o terceros	Intento de Hurto de Conductores - Instalaciones	23/05/2014 03:40:00	23/05/2014 04:16:00	0:36:00
A2002-C-212	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	25/04/2014 05:31:00	25/04/2014 05:39:40	0:08:40
A2002-C-212	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	24/04/2014 19:41:00	24/04/2014 20:26:00	0:45:00

A2002-C-212	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	17/04/2014 19:27:00	17/04/2014 22:50:00	3:23:00
A2002-C-212	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	13/04/2014 06:41:00	13/04/2014 07:24:00	0:43:00
A2002-C-212	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	27/03/2014 01:35:00	27/03/2014 01:45:00	0:10:00
A2002-C-212	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	26/03/2014 20:12:00	26/03/2014 21:44:00	1:32:00
A2002-C-212	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	11/03/2014 00:13:00	11/03/2014 02:18:00	2:05:00
A2002-C-212	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	09/03/2014 00:07:00	09/03/2014 06:37:00	6:30:00
A2002-C-212	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	04/03/2014 01:05:00	04/03/2014 06:33:00	5:28:00
A2002-C-212	Falla	Cortocircuito	05/02/2014 18:58:00	05/02/2014 19:15:00	0:17:00
A2002-C-212	Interrupción por Expansión y Reforzamiento	Expansión o Reforzamiento de redes Transmisión	26/01/2014 08:02:00	26/01/2014 15:11:00	7:09:00
A2002-C-212	Falla	Cortocircuito	15/01/2014 19:15:00	15/01/2014 19:36:00	0:21:00

Tabla 1. Historial de interrupciones del alimentador C-212 (SECHO 2014-2015).

### 3.1.2. Historial de interrupciones del alimentador C-214 de SECHO (2014-2015)

<b>NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO</b>	<b>MOTIVO</b>	<b>SUB MOTIVO</b>	<b>FECHA INTERRUPCIÓN</b>	<b>FECHA REPOSICIÓN</b>	<b>TIEMPO TOTAL</b>
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Incendio - Quema de material en cercanías	24/06/2015 18:25:00	24/06/2015 19:10:00	0:45:00
A2003-C-214	Falla	Línea abierta o caída	02/05/2015 23:47:00	02/05/2015 23:59:00	0:12:00
A2003-C-214	Falla	Transitorio	17/04/2015 17:45:00	17/04/2015 17:50:00	0:05:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	03/04/2015 02:01:00	03/04/2015 04:32:00	2:31:00
A2003-C-214	Falla	Cortocircuito	26/03/2015 15:01:00	26/03/2015 17:05:00	2:04:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	21/02/2015 02:32:00	21/02/2015 03:01:00	0:29:00
A2003-C-214	Interrupción por Expansión y Reforzamiento	Expansión o Reforzamiento de redes Transmisión	21/02/2015 08:00:00	21/02/2015 17:00:00	9:00:00
A2003-C-214	Falla	Tiempo adicional por mantenimiento programado.	21/02/2015 17:00:00	21/02/2015 18:07:00	1:07:00
A2003-C-214	Falla	Transitorio	25/01/2015 11:00:00	25/01/2015 11:08:00	0:08:00
A2003-C-214	Falla	Transitorio	25/01/2015 06:55:00	25/01/2015 07:01:00	0:06:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	24/01/2015 02:19:00	24/01/2015 04:58:00	2:39:00
A2003-C-214	Interrupción por Expansión y Reforzamiento	Remodelación integral de redes	25/01/2015 06:55:00	25/01/2015 09:00:00	2:05:00
A2003-C-214	Falla	Tiempo adicional por mantenimiento programado.	25/01/2015 09:00:00	25/01/2015 11:08:00	2:08:00
A2003-C-214	Falla	Línea abierta o caída	23/12/2014 17:19:00	23/12/2014 18:23:00	1:04:00
A2003-C-214	Falla	Cortocircuito	21/12/2014 18:55:00	21/12/2014 19:40:00	0:45:00

A2003-C-214	Falla	Cortocircuito	06/12/2014 14:58:00	06/12/2014 15:48:00	0:50:00
A2003-C-214	Interrupción por Expansión y Reforzamiento	Expansión o Reforzamiento de redes Transmisión	07/12/2014 08:00:00	07/12/2014 16:30:00	8:30:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	25/11/2014 16:49:00	25/11/2014 18:05:00	1:16:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	27/10/2014 16:07:00	27/10/2014 16:23:00	0:16:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	23/10/2014 02:14:00	23/10/2014 03:24:00	1:10:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	27/09/2014 01:32:00	27/09/2014 02:07:00	0:35:00
A2003-C-214	Interrupción por Expansión y Reforzamiento	Expansión o Reforzamiento de redes Transmisión	17/08/2014 08:00:00	17/08/2014 14:00:00	6:00:00
A2003-C-214	Falla	Tiempo adicional por mantenimiento programado.	17/08/2014 14:00:00	17/08/2014 14:06:00	0:06:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	03/08/2014 02:03:00	03/08/2014 03:52:00	1:49:00
A2003-C-214	Interrupción por Expansión y Reforzamiento	Expansión o Reforzamiento de redes Transmisión	06/07/2014 08:00:00	06/07/2014 13:45:00	5:45:00
A2003-C-214	Falla	Colapso de estructura	23/06/2014 09:15:00	23/06/2014 09:56:00	0:41:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	03/06/2014 02:12:00	03/06/2014 03:09:00	0:57:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	01/06/2014 02:16:00	01/06/2014 06:01:00	3:45:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	30/05/2014 02:14:00	30/05/2014 02:58:00	0:44:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	22/05/2014 01:47:00	22/05/2014 03:00:00	1:13:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	09/05/2014 00:30:00	09/05/2014 01:11:00	0:41:00
A2003-C-214	Interrupción por Expansión y Reforzamiento	Expansión o Reforzamiento de redes Transmisión	10/05/2014 08:00:00	10/05/2014 15:54:00	7:54:00
A2003-C-214	Falla	Avería en equipo de protección y/o maniobra	03/05/2014 19:44:00	03/05/2014 20:11:00	0:27:00

A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	26/04/2014 03:06:00	26/04/2014 04:01:00	0:55:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	15/04/2014 16:02:00	15/04/2014 17:33:00	1:31:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	31/03/2014 11:06:00	31/03/2014 11:50:00	0:44:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	22/02/2014 20:35:00	23/02/2014 00:18:00	3:43:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	17/02/2014 23:43:00	18/02/2014 02:14:00	2:31:00
A2003-C-214	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	01/02/2014 14:58:00	01/02/2014 16:46:00	1:48:00

Tabla 2. Historial de interrupciones del alimentador C-214 (SECHO 2014-2015).

### 3.1.3. Historial de interrupciones del alimentador C-215 de SECHO (2014-2015)

<b>NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO</b>	<b>MOTIVO</b>	<b>SUB MOTIVO</b>	<b>FECHA INTERRUPCIÓN</b>	<b>FECHA REPOSICIÓN</b>	<b>TIEMPO TOTAL</b>
A2004-C-215	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	02/07/2015 01:56:00	02/07/2015 03:11:00	1:15:00
A2004-C-215	Falla	Cortocircuito	02/04/2015 10:21:02	02/04/2015 10:47:00	0:25:58
A2004-C-215	Falla	Cortocircuito	06/02/2014 11:52:00	06/02/2014 12:37:00	0:45:00

Tabla 3. Historial de interrupciones del alimentador C-215 (SECHO 2014-2015).

### 3.1.4. Historial de interrupciones del alimentador C-217 de SECHO (2014-2015)

<b>NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO</b>	<b>MOTIVO</b>	<b>SUB MOTIVO</b>	<b>FECHA INTERRUPCIÓN</b>	<b>FECHA REPOSICIÓN</b>	<b>TIEMPO TOTAL</b>
A2006-C-217	Falla	Cortocircuito	03/07/2015 21:00:00	03/07/2015 21:16:00	0:16:00

Tabla 4. Historial de interrupciones del alimentador C-217 (SECHO 2014-2015).

### 3.1.5. Historial de interrupciones del alimentador C-219 de SECHO (2014-2015)

<b>NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO</b>	<b>MOTIVO</b>	<b>SUB MOTIVO</b>	<b>FECHA INTERRUPCIÓN</b>	<b>FECHA REPOSICIÓN</b>	<b>TIEMPO TOTAL</b>
A2007-C-219	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	19/06/2015 12:08:00	19/06/2015 12:13:00	0:05:00
A2007-C-219	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	05/02/2015 14:57:00	05/02/2015 16:46:00	1:49:00
A2007-C-219	Falla	De coordinación de protección	25/11/2014 16:17:00	25/11/2014 16:25:00	0:08:00
A2007-C-219	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	06/09/2014 12:45:00	06/09/2014 12:59:00	0:14:00
A2007-C-219	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	21/05/2014 16:38:00	21/05/2014 16:59:00	0:21:00
A2007-C-219	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	07/05/2014 09:21:00	07/05/2014 11:13:00	1:52:00
A2007-C-219	Falla	Línea abierta o caída	13/04/2014 12:34:00	13/04/2014 12:47:00	0:13:00
A2007-C-219	Falla	Línea abierta o caída	08/04/2014 23:00:00	08/04/2014 23:10:00	0:10:00
A2007-C-219	Falla	Línea abierta o caída	10/02/2014 14:09:00	10/02/2014 14:22:00	0:13:00
A2007-C-219	Interrupción por Expansión y Reforzamiento	Expansión o Reforzamiento de redes Transmisión	26/01/2014 08:02:00	26/01/2014 15:57:00	7:55:00

Tabla 5. Historial de interrupciones del alimentador C-219 (SECHO 2014-2015).

### 3.1.6. Historial de interrupciones del alimentador C-221 de SECHO (2014-2015)

<b>NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO</b>	<b>MOTIVO</b>	<b>SUB MOTIVO</b>	<b>FECHA INTERRUPCIÓN</b>	<b>FECHA REPOSICIÓN</b>	<b>TIEMPO TOTAL</b>
A2008-C-221	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	06/04/2015 11:23:00	06/04/2015 12:04:00	0:41:00
A2008-C-221	Falla	Cortocircuito	04/03/2015 19:36:00	04/03/2015 21:36:00	2:00:00
A2008-C-221	Falla	Cortocircuito	06/02/2015 20:24:00	06/02/2015 22:43:00	2:19:00
A2008-C-221	Falla	Cortocircuito	31/01/2015 09:07:00	31/01/2015 09:37:00	0:30:00
A2008-C-221	Falla	Cortocircuito	11/12/2014 12:59:00	11/12/2014 13:37:00	0:38:00
A2008-C-221	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	17/07/2014 09:21:00	17/07/2014 09:37:00	0:16:00
A2008-C-221	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	09/04/2014 18:32:00	09/04/2014 18:38:00	0:06:00
A2008-C-221	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	24/02/2014 10:31:03	24/02/2014 10:58:00	0:26:57
A2008-C-221	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	22/02/2014 19:12:00	22/02/2014 19:18:00	0:06:00
A2008-C-221	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	18/02/2014 15:45:00	18/02/2014 15:56:00	0:11:00
A2008-C-221	Interrupción por Expansión y Reforzamiento	Expansión o Reforzamiento de redes Transmisión	26/01/2014 08:02:00	26/01/2014 15:04:00	7:02:00
A2008-C-221	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	20/01/2014 18:46:00	20/01/2014 19:58:00	1:12:00

Tabla 6. Historial de interrupciones del alimentador C-221 (SECHO 2014-2015).

### 3.1.7. Historial de interrupciones del alimentador C-234 de SECHO (2014-2015)

<b>NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO</b>	<b>MOTIVO</b>	<b>SUB MOTIVO</b>	<b>FECHA INTERRUPCIÓN</b>	<b>FECHA REPOSICIÓN</b>	<b>TIEMPO TOTAL</b>
A2010-C-234	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	17/05/2015 09:28:00	17/05/2015 12:03:00	2:35:00
A2010-C-234	Otros y/o terceros	Otros	05/11/2014 07:11:00	05/11/2014 07:22:00	0:11:00

Tabla 7. Historial de interrupciones del alimentador C-234 (SECHO 2014-2015).

### 3.1.8. Historial de interrupciones del alimentador C-236 de SECHO (2014-2015)

<b>NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO</b>	<b>MOTIVO</b>	<b>SUB MOTIVO</b>	<b>FECHA INTERRUPCIÓN</b>	<b>FECHA REPOSICIÓN</b>	<b>TIEMPO TOTAL</b>
A2011-C-236	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	09/07/2015 22:39:00	09/07/2015 22:57:00	0:18:00
A2011-C-236	Otros y/o terceros	Otros	27/05/2015 12:10:00	27/05/2015 12:35:00	0:25:00
A2011-C-236	Falla	Bajo nivel de aislamiento	25/05/2015 18:39:00	25/05/2015 18:45:00	0:06:00
A2011-C-236	Otros y/o terceros	Objetos en redes (Cometas, etc.)	06/12/2014 17:31:00	06/12/2014 18:24:00	0:53:00
A2011-C-236	Falla	Cortocircuito	22/11/2014 08:13:00	22/11/2014 08:43:00	0:30:00
A2011-C-236	Otros y/o terceros	Otros	05/11/2014 07:11:00	05/11/2014 07:24:00	0:13:00

Tabla 8. Historia de interrupciones del alimentador C-236 (SECHO 2014-2015).

### 3.1.9. Historial de interrupciones del alimentador C-244 de SECHO (2014-2015)

<b>NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO</b>	<b>MOTIVO</b>	<b>SUB MOTIVO</b>	<b>FECHA INTERRUPCIÓN</b>	<b>FECHA REPOSICIÓN</b>	<b>TIEMPO TOTAL</b>
A2014-C-244	Falla	Rechazo de carga por Mínima Frecuencia	19/06/2015 12:08:00	19/06/2015 12:13:00	0:05:00
A2014-C-244	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	13/03/2015 11:10:00	13/03/2015 17:59:00	6:49:00
A2014-C-244	Otros y/o terceros	Colisión de vehículo contra instalaciones	23/01/2015 23:09:00	24/01/2015 04:39:00	5:30:00
A2014-C-244	Falla	Cortocircuito	06/12/2014 17:59:00	06/12/2014 18:01:00	0:02:00
A2014-C-244	Falla	Línea abierta o caída	06/12/2014 01:30:00	06/12/2014 02:21:00	0:51:00
A2014-C-244	Interrupción por Expansión y Reforzamiento	Incremento de la Capacidad del conductor	05/12/2014 13:18:00	05/12/2014 17:00:00	3:42:00
A2014-C-244	Falla	Tiempo adicional por mantenimiento programado.	05/12/2014 17:00:00	05/12/2014 17:48:00	0:48:00
A2014-C-244	Falla	Cortocircuito	22/11/2014 08:13:00	22/11/2014 08:52:00	0:39:00
A2014-C-244	Falla	Bajo nivel de aislamiento	20/11/2014 12:00:00	20/11/2014 12:51:00	0:51:00
A2014-C-244	Falla	Cortocircuito	20/11/2014 11:24:00	20/11/2014 11:55:00	0:31:00
A2014-C-244	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	25/09/2014 02:10:00	25/09/2014 03:00:00	0:50:00
A2014-C-244	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	20/08/2014 01:52:00	20/08/2014 02:10:00	0:18:00
A2014-C-244	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	08/08/2014 01:09:00	08/08/2014 01:38:00	0:29:00
A2014-C-244	Otros y/o terceros	Hurto de conductor o elemento eléctrico	02/08/2014 01:36:00	02/08/2014 02:04:00	0:28:00
A2014-C-244	Falla	Cortocircuito	28/01/2014 11:32:00	28/01/2014 12:08:00	0:36:00

Tabla 9. Historial de interrupciones del alimentador C-244 (SECHO 2014-2015).

### 3.1.10. Historial de interrupciones del alimentador C-251 de SECHO (2014-2015)

<b>NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO</b>	<b>MOTIVO</b>	<b>SUB MOTIVO</b>	<b>FECHA INTERRUPCIÓN</b>	<b>FECHA REPOSICIÓN</b>	<b>TIEMPO TOTAL</b>
A2074-C-251	Falla	Cortocircuito	25/03/2015 09:25:00	25/03/2015 09:29:00	0:04:00
A2074-C-251	Falla	Cortocircuito	06/12/2014 17:59:00	06/12/2014 18:01:00	0:02:00
A2074-C-251	Falla	Cortocircuito	22/11/2014 08:13:00	22/11/2014 08:52:00	0:39:00
A2074-C-251	Falla	Línea abierta o caída	23/01/2014 10:33:00	23/01/2014 10:50:00	0:17:00
A2074-C-251	Falla	Bajo nivel de aislamiento	23/01/2014 10:09:00	23/01/2014 10:52:00	0:43:00
A2074-C-251	Falla	Línea abierta o caída	23/01/2014 10:09:00	23/01/2014 10:52:00	0:43:00

Tabla 10. Historial de interrupciones del alimentador C-251 (SECHO 2014-2015).

### 3.2. Seleccionar dos alimentadores específicos a partir de sus características técnicas

#### 3.2.1. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-212 de SECHO (2014-2015).

NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO	MOTIVO	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	TIEMPO TOTAL
A2002-C-212	Falla	15/01/2014	15/01/2014	0:21:00
A2002-C-212	Falla	05/02/2014	05/02/2014	0:17:00
A2002-C-212	Falla	19/07/2014	19/07/2014	0:14:00
A2002-C-212	Falla	01/08/2014	01/08/2014	0:07:00
A2002-C-212	Falla	06/09/2014	06/09/2014	0:14:00
A2002-C-212	Falla	25/11/2014	25/11/2014	2:46:00
A2002-C-212	Falla	25/11/2014	25/11/2014	0:10:00
A2002-C-212	Falla	03/02/2015	03/02/2015	0:15:00
A2002-C-212	Falla	19/06/2015	19/06/2015	0:05:00
A2002-C-212	Hurto	04/03/2014	04/03/2014	5:28:00
A2002-C-212	Hurto	09/03/2014	09/03/2014	6:30:00
A2002-C-212	Hurto	11/03/2014	11/03/2014	2:05:00
A2002-C-212	Hurto	26/03/2014	26/03/2014	1:32:00
A2002-C-212	Hurto	27/03/2014	27/03/2014	0:10:00
A2002-C-212	Hurto	13/04/2014	13/04/2014	0:43:00
A2002-C-212	Hurto	17/04/2014	17/04/2014	3:23:00
A2002-C-212	Hurto	24/04/2014	24/04/2014	0:45:00
A2002-C-212	Hurto	25/04/2014	25/04/2014	0:08:40
A2002-C-212	Hurto	23/05/2014	23/05/2014	0:36:00
A2002-C-212	Hurto	08/08/2014	08/08/2014	1:01:00
A2002-C-212	Otros	26/01/2014	26/01/2014	7:09:00
A2002-C-212	Otros	16/07/2015	16/07/2015	4:00:00

Tabla 11. Tipos de interrupciones en el alimentador C-212 (SECHO 2014– 2015).

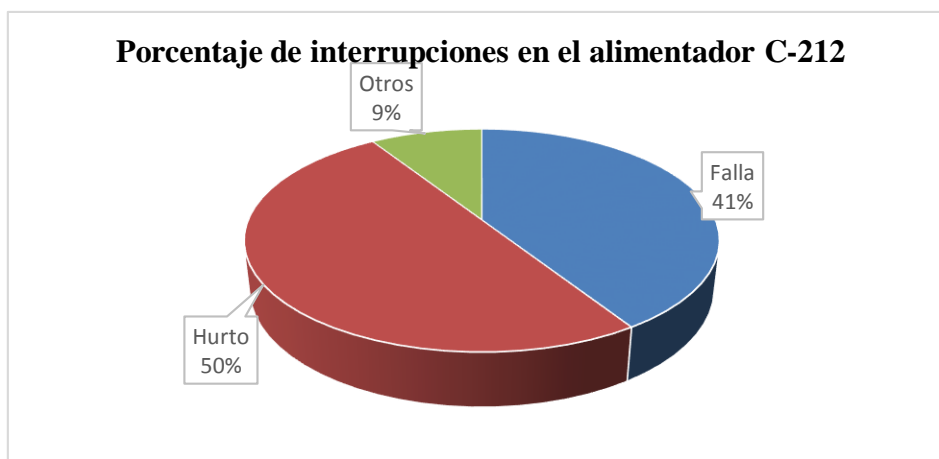


Ilustración 10. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-212 (SECHO 2014– 2015).

### 3.2.2. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-214 de SECHO (2014-2015).

NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO	MOTIVO	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	TIEMPO TOTAL
A2003-C-214	Falla	03/05/2014	03/05/2014	0:27:00
A2003-C-214	Falla	23/06/2014	23/06/2014	0:41:00
A2003-C-214	Falla	17/08/2014	17/08/2014	0:06:00
A2003-C-214	Falla	06/12/2014	06/12/2014	0:50:00
A2003-C-214	Falla	21/12/2014	21/12/2014	0:45:00
A2003-C-214	Falla	23/12/2014	23/12/2014	1:04:00
A2003-C-214	Falla	25/01/2015	25/01/2015	0:06:00
A2003-C-214	Falla	25/01/2015	25/01/2015	2:08:00
A2003-C-214	Falla	25/01/2015	25/01/2015	0:08:00
A2003-C-214	Falla	21/02/2015	21/02/2015	1:07:00
A2003-C-214	Falla	26/03/2015	26/03/2015	2:04:00
A2003-C-214	Falla	17/04/2015	17/04/2015	0:05:00
A2003-C-214	Falla	02/05/2015	02/05/2015	0:12:00
A2003-C-214	Hurto	22/02/2014	23/02/2014	3:43:00
A2003-C-214	Hurto	26/04/2014	26/04/2014	0:55:00
A2003-C-214	Hurto	09/05/2014	09/05/2014	0:41:00
A2003-C-214	Hurto	22/05/2014	22/05/2014	1:13:00
A2003-C-214	Hurto	30/05/2014	30/05/2014	0:44:00
A2003-C-214	Hurto	01/06/2014	01/06/2014	3:45:00
A2003-C-214	Hurto	03/06/2014	03/06/2014	0:57:00
A2003-C-214	Hurto	03/08/2014	03/08/2014	1:49:00
A2003-C-214	Hurto	27/09/2014	27/09/2014	0:35:00
A2003-C-214	Hurto	23/10/2014	23/10/2014	1:10:00
A2003-C-214	Hurto	24/01/2015	24/01/2015	2:39:00
A2003-C-214	Hurto	21/02/2015	21/02/2015	0:29:00
A2003-C-214	Hurto	03/04/2015	03/04/2015	2:31:00
A2003-C-214	Otros	01/02/2014	01/02/2014	1:48:00
A2003-C-214	Otros	17/02/2014	18/02/2014	2:31:00
A2003-C-214	Otros	31/03/2014	31/03/2014	0:44:00
A2003-C-214	Otros	15/04/2014	15/04/2014	1:31:00
A2003-C-214	Otros	10/05/2014	10/05/2014	7:54:00
A2003-C-214	Otros	06/07/2014	06/07/2014	5:45:00
A2003-C-214	Otros	17/08/2014	17/08/2014	6:00:00
A2003-C-214	Otros	27/10/2014	27/10/2014	0:16:00
A2003-C-214	Otros	25/11/2014	25/11/2014	1:16:00
A2003-C-214	Otros	07/12/2014	07/12/2014	8:30:00
A2003-C-214	Otros	25/01/2015	25/01/2015	2:05:00
A2003-C-214	Otros	21/02/2015	21/02/2015	9:00:00
A2003-C-214	Otros	24/06/2015	24/06/2015	0:45:00

Tabla 12. Tipos de interrupciones en el alimentador C-214 (SECHO 2014– 2015).

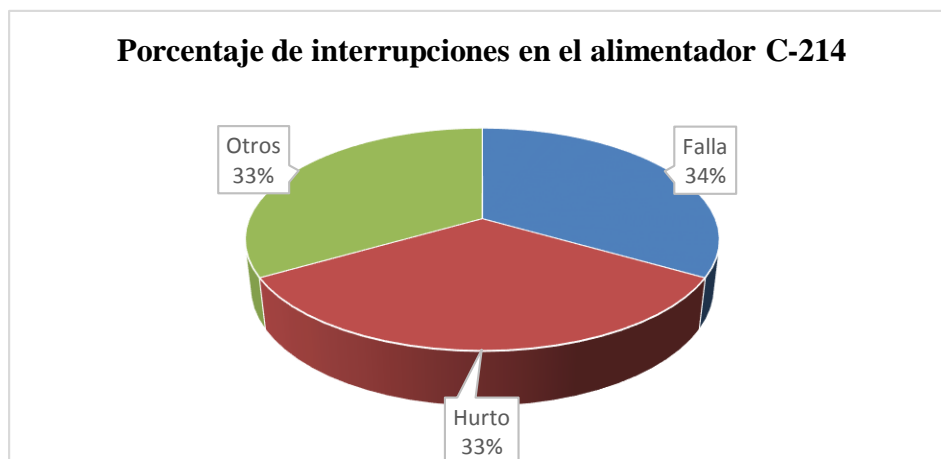


Ilustración 11. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-214 (SECHO 2014– 2015).

### 3.2.3. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-215 de SECHO (2014-2015).

NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO	MOTIVO	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	TIEMPO TOTAL
A2004-C-215	Falla	02/04/2015	02/04/2015	0:25:58
A2004-C-215	Falla	06/02/2014	06/02/2014	0:45:00
A2004-C-215	Hurto	02/07/2015	02/07/2015	1:15:00

Tabla 13. Tipos de interrupciones en el alimentador C-215 (SECHO 2014– 2015).

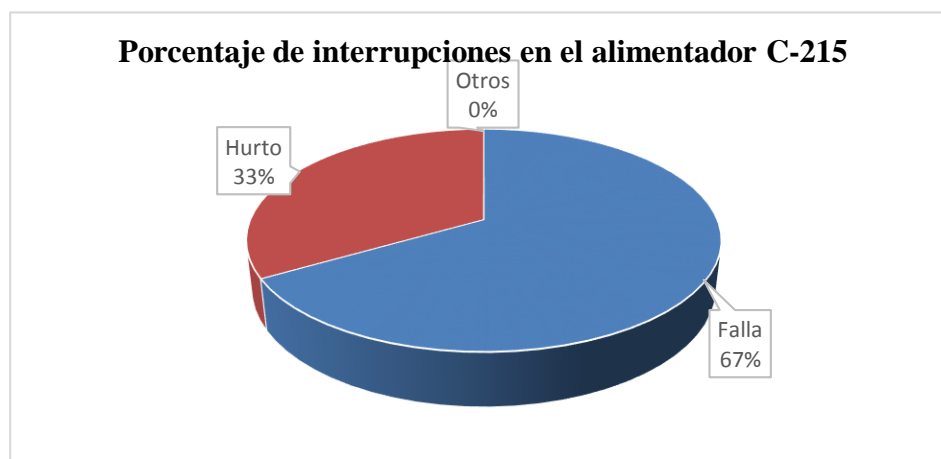


Ilustración 12. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-215 (SECHO 2014– 2015).

### 3.2.4. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-217 de SECHO (2014-2015).

NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO	MOTIVO	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	TIEMPO TOTAL
A2006-C-217	Falla	03/07/2015	03/07/2015	0:16:00

Tabla 14. Tipos de interrupciones en el alimentador C-217 (SECHO 2014– 2015).

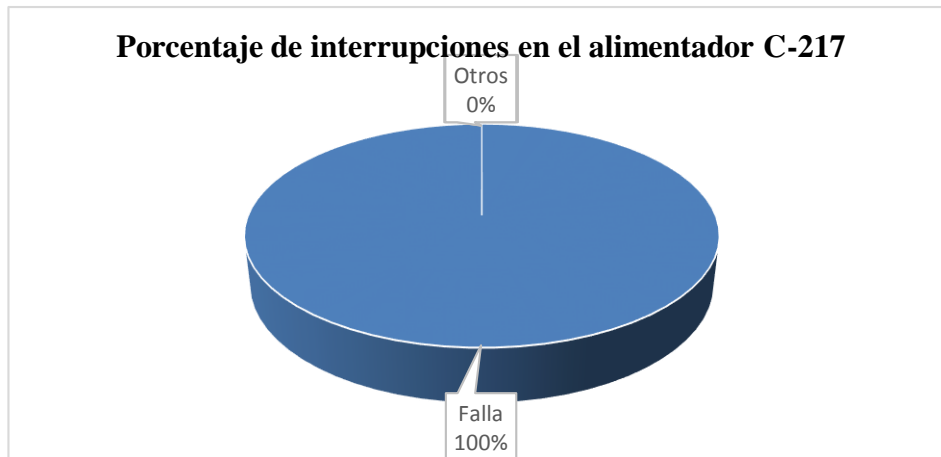


Ilustración 13. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-217 (SECHO 2014– 2015).

### 3.2.5. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-219 de SECHO (2014-2015).

NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO	MOTIVO	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	TIEMPO TOTAL
A2007-C-219	Falla	19/06/2015	19/06/2015	0:05:00
A2007-C-219	Falla	25/11/2014	25/11/2014	0:08:00
A2007-C-219	Falla	06/09/2014	06/09/2014	0:14:00
A2007-C-219	Falla	13/04/2014	13/04/2014	0:13:00
A2007-C-219	Falla	08/04/2014	08/04/2014	0:10:00
A2007-C-219	Falla	10/02/2014	10/02/2014	0:13:00
A2007-C-219	Otros	05/02/2015	05/02/2015	1:49:00
A2007-C-219	Otros	21/05/2014	21/05/2014	0:21:00
A2007-C-219	Otros	07/05/2014	07/05/2014	1:52:00
A2007-C-219	Otros	26/01/2014	26/01/2014	7:55:00

Tabla 15. Tipos de interrupciones en el alimentador C-219 (SECHO 2014– 2015).

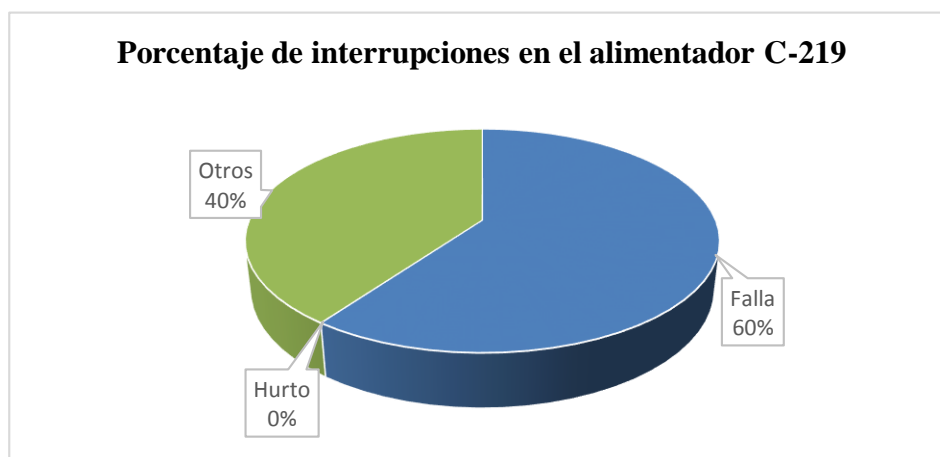


Ilustración 14. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-219 (SECHO 2014– 2015).

### 3.2.6. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-221 de SECHO (2014-2015).

NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO	MOTIVO	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	TIEMPO TOTAL
A2008-C-221	Falla	06/04/2015	06/04/2015	0:41:00
A2008-C-221	Falla	04/03/2015	04/03/2015	2:00:00
A2008-C-221	Falla	06/02/2015	06/02/2015	2:19:00
A2008-C-221	Falla	31/01/2015	31/01/2015	0:30:00
A2008-C-221	Falla	11/12/2014	11/12/2014	0:38:00
A2008-C-221	Falla	09/04/2014	09/04/2014	0:06:00
A2008-C-221	Falla	24/02/2014	24/02/2014	0:26:57
A2008-C-221	Falla	22/02/2014	22/02/2014	0:06:00
A2008-C-221	Falla	18/02/2014	18/02/2014	0:11:00
A2008-C-221	Falla	20/01/2014	20/01/2014	1:12:00
A2008-C-221	Otros	17/07/2014	17/07/2014	0:16:00
A2008-C-221	Otros	26/01/2014	26/01/2014	7:02:00

Tabla 16. Tipos de interrupciones en el alimentador C-221 (SECHO 2014– 2015).

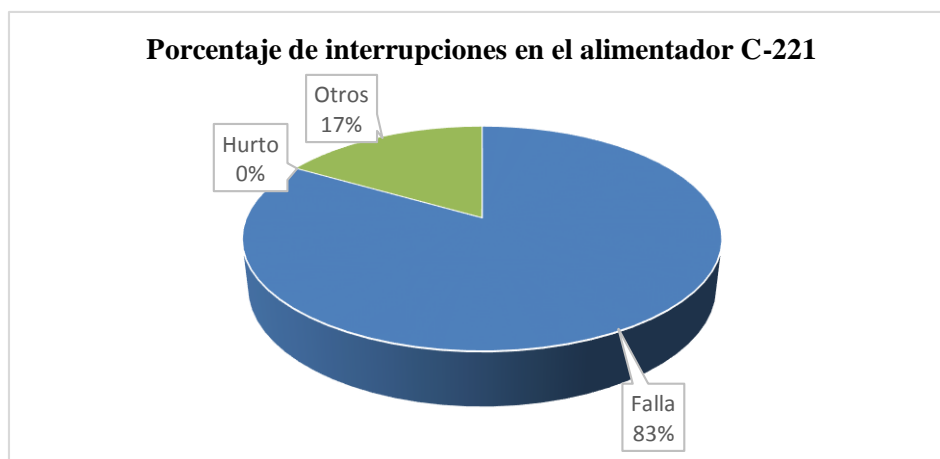


Ilustración 15. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-221 (SECHO 2014– 2015).

### 3.2.7. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-234 de SECHO (2014-2015).

NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO	MOTIVO	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	TIEMPO TOTAL
A2010-C-234	Otros	17/05/2015	17/05/2015	2:35:00
A2010-C-234	Otros	05/11/2014	05/11/2014	0:11:00

Tabla 17. Tipos de interrupciones en el alimentador C-234 (SECHO 2014– 2015).

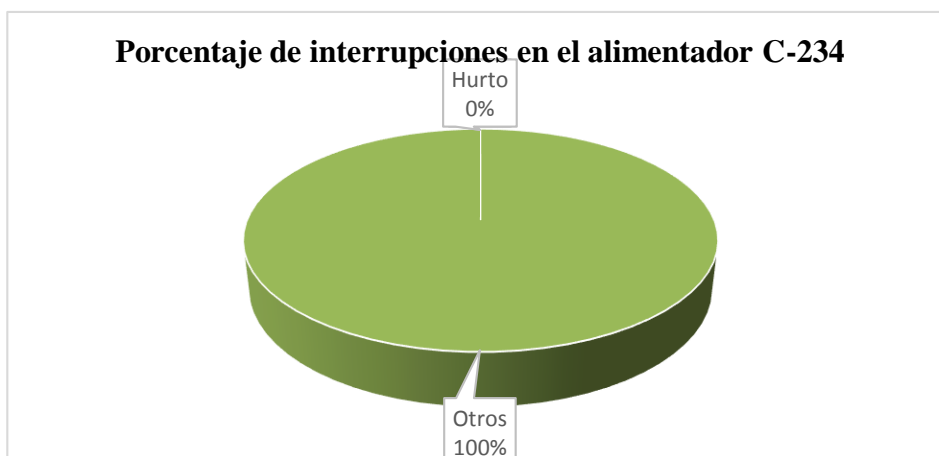


Ilustración 16. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-234 (SECHO 2014– 2015).

### 3.2.8. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-236 de SECHO (2014-2015).

NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO	MOTIVO	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	TIEMPO TOTAL
A2011-C-236	Falla	25/05/2015	25/05/2015	0:06:00
A2011-C-236	Falla	22/11/2014	22/11/2014	0:30:00
A2011-C-236	Hurto	09/07/2015	09/07/2015	0:18:00
A2011-C-236	Otros	27/05/2015	27/05/2015	0:25:00
A2011-C-236	Otros	06/12/2014	06/12/2014	0:53:00
A2011-C-236	Otros	05/11/2014	05/11/2014	0:13:00

Tabla 18. Tipos de interrupciones en el alimentador C-236 (SECHO 2014– 2015).

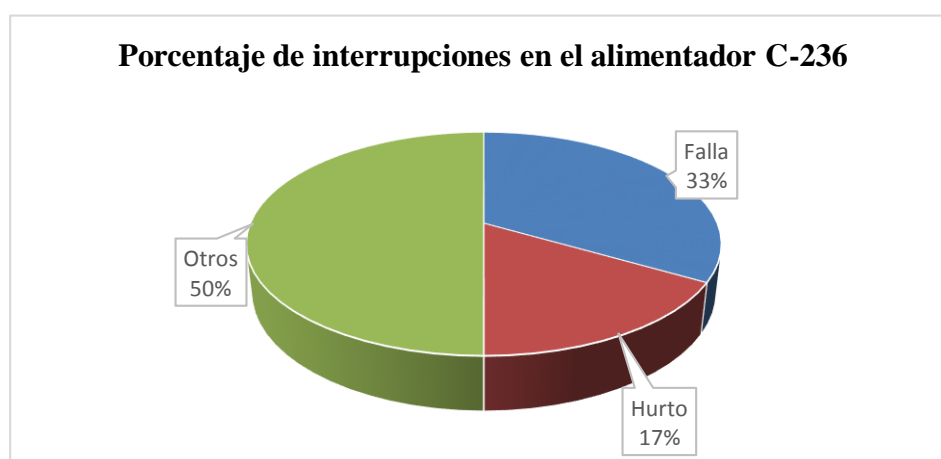


Ilustración 17. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-236 (SECHO 2014– 2015).

### 3.2.9. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-244 de SECHO (2014-2015).

NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO	MOTIVO	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	TIEMPO TOTAL
A2014-C-244	Falla	19/06/2015	19/06/2015	0:05:00
A2014-C-244	Falla	06/12/2014	06/12/2014	0:02:00
A2014-C-244	Falla	06/12/2014	06/12/2014	0:51:00
A2014-C-244	Falla	05/12/2014	05/12/2014	0:48:00
A2014-C-244	Falla	22/11/2014	22/11/2014	0:39:00
A2014-C-244	Falla	20/11/2014	20/11/2014	0:51:00
A2014-C-244	Falla	20/11/2014	20/11/2014	0:31:00
A2014-C-244	Falla	28/01/2014	28/01/2014	0:36:00
A2014-C-244	Hurto	25/09/2014	25/09/2014	0:50:00
A2014-C-244	Otros	13/03/2015	13/03/2015	6:49:00
A2014-C-244	Otros	23/01/2015	24/01/2015	5:30:00
A2014-C-244	Otros	05/12/2014	05/12/2014	3:42:00
A2014-C-244	Otros	20/08/2014	20/08/2014	0:18:00
A2014-C-244	Otros	08/08/2014	08/08/2014	0:29:00
A2014-C-244	Otros	02/08/2014	02/08/2014	0:28:00

Tabla 19. Tipos de interrupciones en el alimentador C-244 (SECHO 2014– 2015).

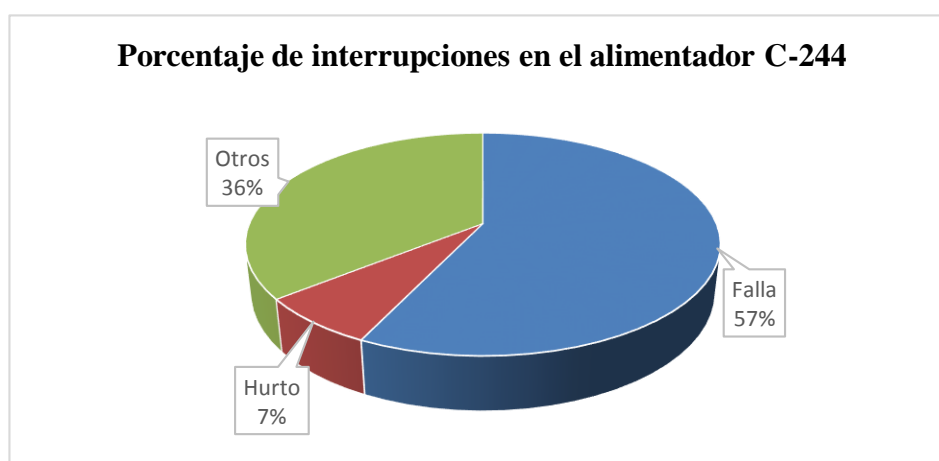


Ilustración 18. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-244 (SECHO 2014– 2015).

### 3.2.10. Porcentaje de interrupciones en el alimentador C-251 de SECHO (2014-2015).

NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO	MOTIVO	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	TIEMPO TOTAL
A2074-C-251	Falla	25/03/2015	25/03/2015	0:04:00
A2074-C-251	Falla	06/12/2014	06/12/2014	0:02:00
A2074-C-251	Falla	22/11/2014	22/11/2014	0:39:00
A2074-C-251	Falla	23/01/2014	23/01/2014	0:17:00
A2074-C-251	Falla	23/01/2014	23/01/2014	0:43:00
A2074-C-251	Falla	23/01/2014	23/01/2014	0:43:00

Tabla 20. Tipos de interrupciones en el alimentador C-251 (SECHO 2014– 2015).

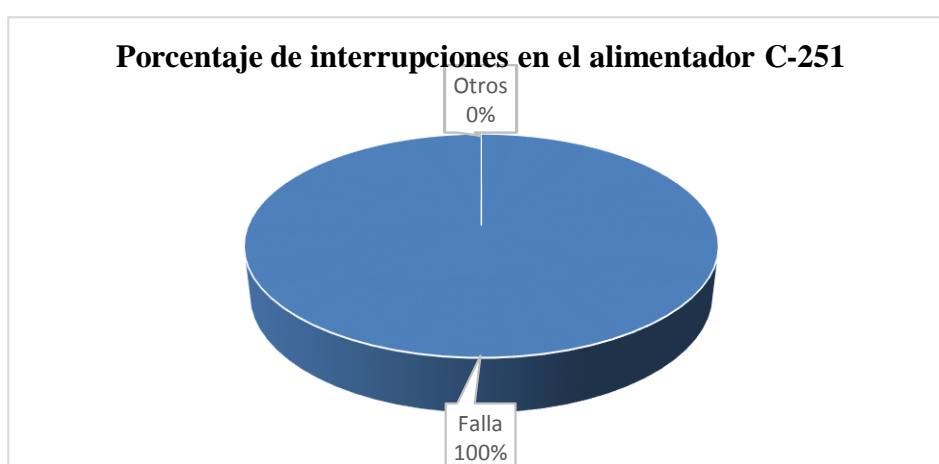


Ilustración 19. Gráfico porcentual de interrupciones en el alimentador C-251 (SECHO 2014– 2015).

### 3.2.11. Porcentaje de fallas en los alimentadores de SECHO (2011 – 2014)

NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO	TIPO DE INTERRUPCIONES		
	FALLA	HURTO	OTROS
C-212	9	11	2
C-214	13	13	13
C-215	2	1	0
C-217	1	0	0
C-219	6	0	4
C-221	10	0	2
C-234	0	0	2
C-236	2	1	3
C-244	8	1	5
C-251	6	0	0

Tabla 21. Cuadro resumen de tipo de interrupciones en los alimentadores (SECHO 2014– 2015).

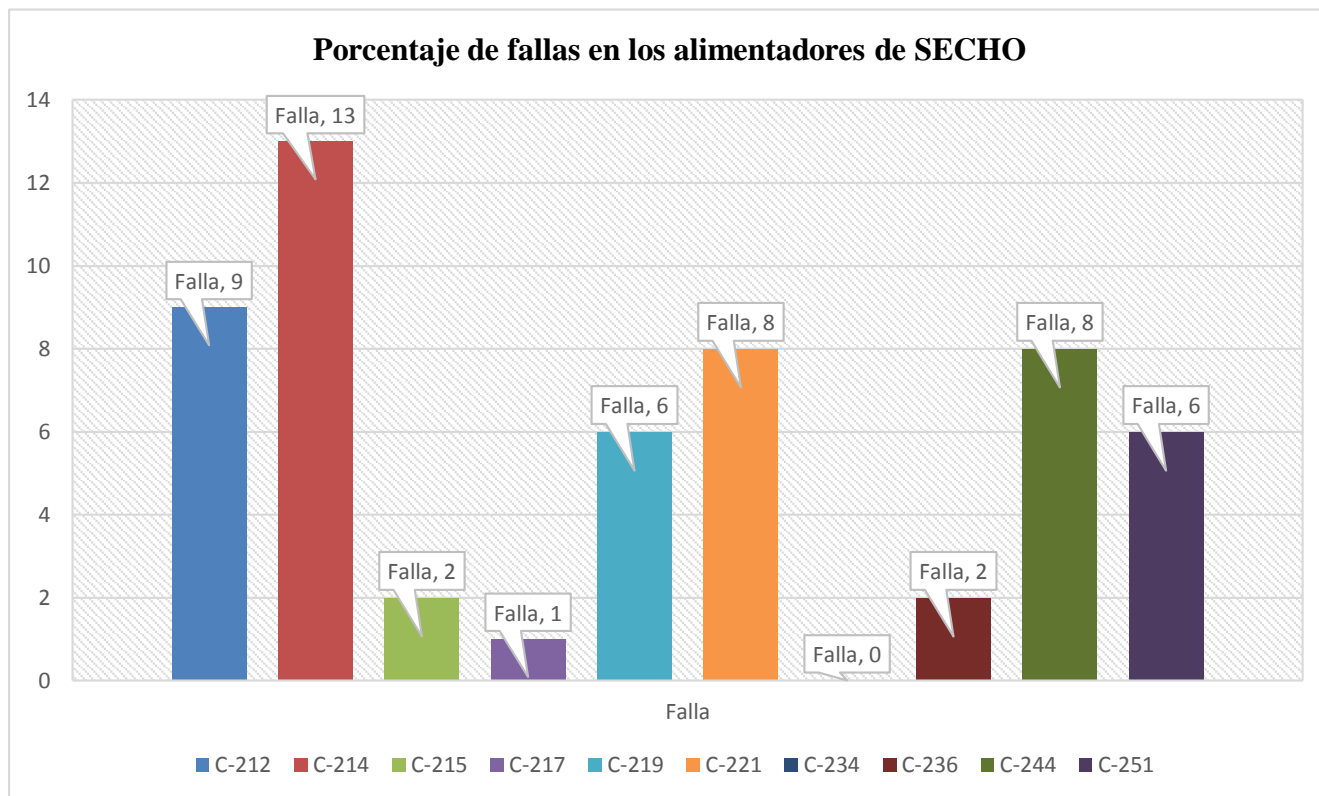


Ilustración 20. Gráfico porcentual de fallas en los alimentadores de SECHO (2014 – 2015).

Como se puede observar en la ilustración 20, los alimentadores con mayores pérdidas son el C-212 (tensión de 10 kV) y el C-214 (tensión 10 kV). Para el desarrollo de este proyecto se trabajara con ambos alimentadores.

### 3.3. Determinar los métodos para la confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución.

Como se menciona en el marco teórico existen dos clases de métodos para evaluar la confiabilidad. En los métodos de simulación estocástica, el más conocido es el de Montecarlo y, entre los métodos de análisis, se tienen los procesos continuos de Markov.

### **3.3.1. Método Montecarlo**

Consiste en la simulación de una gran cantidad de situaciones, generadas en forma aleatoria, donde los valores de los índices de confiabilidad corresponden a los momentos de las distribuciones de probabilidad. Sin embargo, hay preferencia por los métodos de análisis, dado que es mucho más fácil su manejo.

### **3.3.2. Método de Markov**

La mayoría de los métodos analíticos están basados en los procesos continuos de Markov, por lo tanto se presenta a continuación un breve resumen de los conceptos más importantes con esta técnica.

Una red eléctrica, es decir un sistema de distribución o de transmisión, se considera como un sistema reparable, esto significa que al fallar un elemento, éste es reemplazado o reparado, dependiendo de la naturaleza del elemento en cuestión. De esta manera se restablece la condición de operación normal del sistema, o parte de la red afectada. Así entonces, el sistema es continuo en el tiempo, con estados discretos finitos, ajustándose muy bien a una reparación por medio de procesos continuos de Markov.

A continuación se muestra un cuadro comparativo de los dos métodos de simulación mencionados durante el presente trabajo.

MÉTODO MONTECARLO		MÉTODO DE MARKOV	
VENTAJAS	DESVENTAJAS	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Los resultados probabilísticos muestran lo que puede suceder y que tan probable es que suceda un evento.	No siempre proporciona un resultado correcto y podemos cometer un error.	Pueden describir sistemas que sean muy complejos.	No existe un conjunto de soluciones cerrado.
Con los datos generados son fáciles crear gráficas para observar cuales son las posibilidades de que algo suceda.	En algunas aplicaciones del método Montecarlo solo se puede aplicar en medios que contienen geometrías planas.	Pueden ser usados para experimentar con sistemas que todavía no existan, o para experimentar con sistemas existentes sin que éstos se alteren.	Cada cambio en las variables de entrada requiere una solución separada o conjunto de ejecuciones.
Cuando se tienen pocos resultados, se hace más fácil que vea cuales son las variables que influyen más en los resultados.	Las salidas producidas son aleatorias y deben ser tratadas como una estimación solamente.		Los modelos de simulación complejos pueden requerir mucho tiempo para construirlos y ejecutarlos.
Se puede ver qué valores tiene exactamente cada variable, al igual que se puede relacionar distintas variables de entrada para averiguar con certeza porque ciertos valores tienen cambios repentinos paralelamente.			Puede resultar dificultoso establecer la validez del modelo (es decir, la correspondencia con el sistema real).

Tabla 22. Cuadro comparativo entre el Método de Montecarlo y Markov.

Podemos decir que el método de Markov es una herramienta para analizar el comportamiento y el gobierno de determinados tipos de procesos que evolucionan de forma no determinística a lo largo del tiempo en torno a un conjunto de estados, mientras que el método de Montecarlo en la simulación es muy útil para su aplicación y aunque consta de algunas desventajas si lo comparamos con sus semejantes, es bastante eficaz a la hora de ser usado para aproximar expresiones matemáticas complejas y costosas de evaluar con exactitud.

En el presente trabajo se utiliza el método de simulación Montecarlo debido a las ventajas que tiene en comparación con el Método de Markov.

**3.4. Diseño de la aplicación de Excel en la simulación de Montecarlo, que permita evaluar, diagnosticar y predecir la confiabilidad en los alimentadores en base a un historial de eventos.**

**3.4.1. Alimentador C-212**

**3.4.1.1. Historial de fallas**

Partimos de la Tabla 22, la cual filtramos datos solo consideramos las interrupciones por fallas, además de ordenarlas por orden cronológico para realizar el análisis, obteniendo:

<b>ITEM</b>	<b>NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO ORIGEN</b>	<b>FECHA INTERRUPCIÓN</b>	<b>FECHA REPOSICIÓN</b>	<b>TIPO DE INTERRUPCIÓN</b>
0	C-212	15/01/2014	15/01/2014	Falla
1	C-212	5/02/2014	5/02/2014	Falla
2	C-212	19/07/2014	19/07/2014	Falla
3	C-212	1/08/2014	1/08/2014	Falla
4	C-212	6/09/2014	6/09/2014	Falla
5	C-212	25/11/2014	25/11/2014	Falla
6	C-212	25/11/2014	25/11/2014	Falla
7	C-212	3/02/2015	3/02/2015	Falla
8	C-212	19/06/2015	19/06/2015	Falla

Tabla 23. Historial de fallas en el alimentador C-212.

Se observa que en total se tienen 9 fallas y se enumeran por ítems, iniciando con ITEM 0 (día en que se comenzó a registrar las fallas del alimentador), hasta ITEM 8 (última falla registrada).

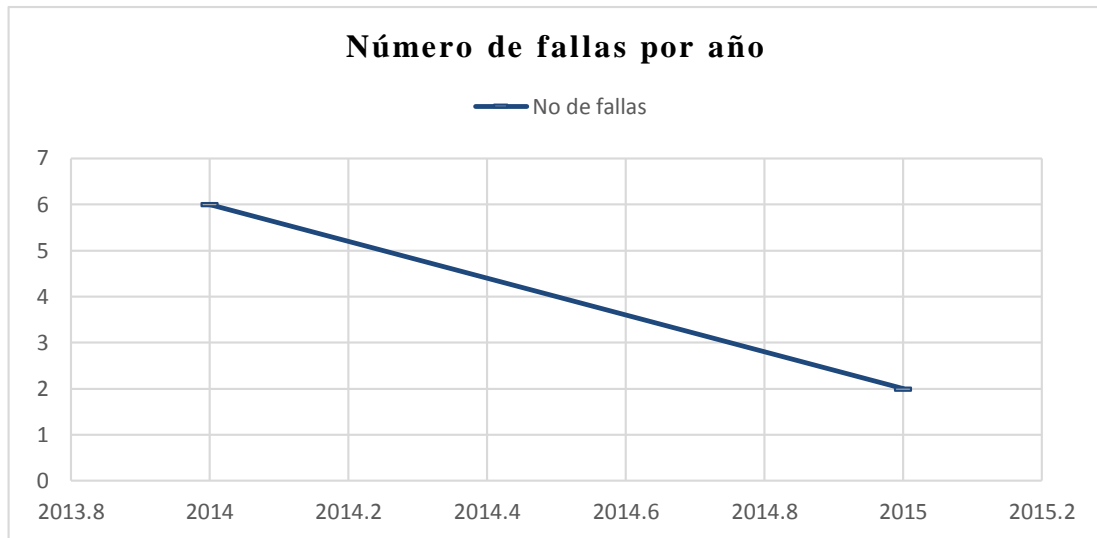


Ilustración 21. Número de fallas por año en el alimentador C-212.

### 3.4.1.2. Horas para la falla

Debido a que se cuenta con las fechas de interrupción y reposición de cada falla se debe de restar la fecha de interrupción de ITEM 1 con la del ITEM 0, y así sucesivamente para las demás.

$$\text{Horas para la falla}_{item_i} = \text{fecha de inter}_{item_i} - \text{fecha de rep}_{item_i}$$

Donde:

*Días para la falla* : Intervalo de tiempo que transcurre entre ítems.

*i* : Número de ítem, el cual es igual número de la falla (0;1;2;...;8).

Una vez obtenido los días para la falla, lo multiplicamos por 24 horas que tiene el día y se obtiene:

$$\text{Días para la falla}_{item_i} = \text{Días para la falla}_{item_i} * 24$$

ITEM	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	DIAS PARA LA FALLA	HORAS PARA LA FALLA
0	15/01/2014	15/01/2014	0	0
1	5/02/2014	5/02/2014	21,00	504,00
2	19/07/2014	19/07/2014	164,00	4440,00
3	1/08/2014	1/08/2014	13,00	4752,00
4	6/09/2014	6/09/2014	36,00	5616,00
5	25/11/2014	25/11/2014	80,00	7536,00
6	25/11/2014	25/11/2014	0,13	7539,12
7	3/02/2015	3/02/2015	70,00	9219,12
8	19/06/2015	19/06/2015	136,00	12483,12

Tabla 24. Horas para la falla en el alimentador C-212.

### 3.4.1.3. Cálculo de los parámetros de Weibull

#### 3.4.1.3.1. Rango de la mediana

Es un estimador no paramétrico basado en el orden de los fallos. Este aspecto implica que la muestra de datos se debe organizar de menor a mayor.

$$RM = \frac{N^{\circ} \text{ de orden del fallo} - 0,3}{\text{Tamaño de la muestra} + 0,4}$$

#### 3.4.1.3.2. Recta de regresión

El método de los mínimos cuadrados permite calcular los parámetros de forma y escala mediante la transformación doble logarítmica de la función de distribución acumulativa.

Partimos de la función de distribución de Weibull y operando con ella llegamos:

$$y = \ln \left( \ln \left( \frac{1}{1 - F(x)} \right) \right)$$

Obtenemos el siguiente cuadro con los valores calculados para los fallos del alimentador C-212

<b>ITEM</b>	<b>RM</b>	<b>Ln(T)</b>	<b>RECTA DE REGRESIÓN</b>
1	8,33%	6,22	-2,442
2	20,24%	8,40	-1,487
3	32,14%	8,47	-0,947
4	44,05%	8,63	-0,544
5	55,95%	8,93	-0,199
6	67,86%	8,93	0,127
7	79,76%	9,13	0,469
8	91,67%	9,43	0,910

Tabla 25. Cuadro resumen sobre la recta de regresión y el rango de la mediana - (C-212).

### 3.4.1.3.3. Cálculos de los parámetros $\beta$ y $\eta$

El parámetro de forma  $\beta$ , es la pendiente de regresión. Mientras que el parámetro de escala  $\eta$ , está en función del intercepto  $b$  de la recta de regresión y del parámetro  $\beta$ .

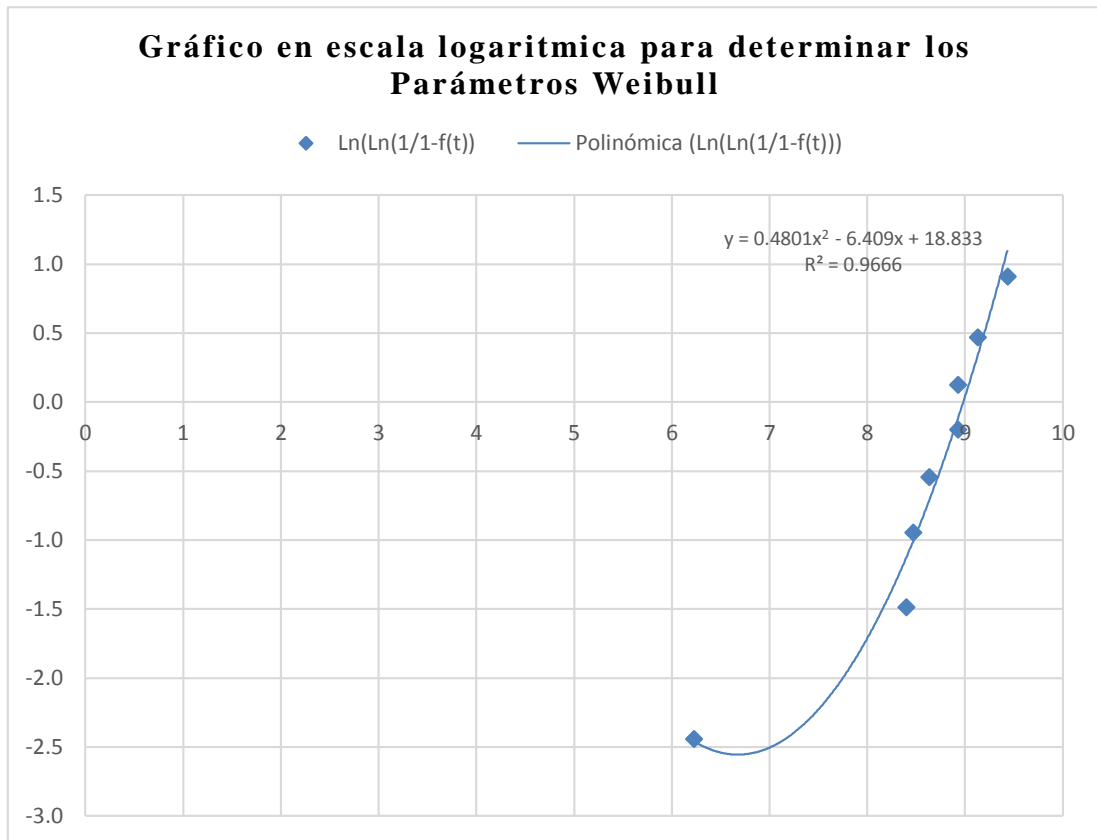


Ilustración 22. Recta de regresión – (C-212).

<b>PARÁMETROS DE WEIBULL</b>		
beta	$\beta$	1
eta	$\eta$	8 353,50
gamma	$\gamma$	0

Tabla 26. Cuadro Resumen sobre la recta de regresión y el rango de la mediana - (C-212).

### 3.4.1.4. Simulación de Montecarlo

A partir de los valores obtenidos de  $\beta$  y  $\eta$  se pueden generar valores aleatorios para generar diversas edades de falla para el alimentador analizado. A continuación se presentan los resultados:

#### 3.4.1.4.1. Generando una edad de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)
1	8 354	6 493

Tabla 27. Resultados para una edad de falla – (C-212).

#### 3.4.1.4.2. Generando dos edades de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)	Generando dos edades de fallas (h)
1	8 354	6 493	2 268
			5 336

Tabla 28. Resultados para dos edades de falla – (C-212).

#### 3.4.1.4.3. Generando tres edades de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)	Generando dos edades de fallas (h)	Generando tres edades de fallas (h)
1	8 354	6 493	2 268	22 181
			5 336	1 242
				28 090

Tabla 29. Resultados para tres edades de falla – (C-212).

### 3.4.1.4.4. Generando cuatro edades de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)	Generando dos edades de fallas (h)	Generando tres edades de fallas (h)	Generando cuatro edades de fallas (h)
1	8 354	6 493	2 268	22 181	12
			5 336	1 242	3 272
				28 090	14 131
					3 479

Tabla 30. Resultados para cuatro edades de falla – (C-212).

### 3.4.1.4.5. Generando cinco edades de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)	Generando dos edades de fallas (h)	Generando tres edades de fallas (h)	Generando cuatro edades de fallas (h)	Generando cinco edades de falla (h)
1	8 354	6 493	2 268	22 181	12	16 003
			5 336	1 242	3 272	5 756
				28 090	14 131	17 296
					3 479	4 593
						30 542

Tabla 30. Resultados para cinco edades de falla – (C-212).

### 3.4.1.4.6. Generando seis edades de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)	Generando dos edades de fallas (h)	Generando tres edades de fallas (h)	Generando cuatro edades de fallas (h)	Generando cinco edades de falla (h)	Generando seis edades de falla (h)
1	8 354	6 493	2 268	22 181	12	16 003	686
			5 336	1 242	3 272	5 756	12 818
				28 090	14 131	17 296	397
					3 479	4 593	24 298
						30 542	603
							2 887

Tabla 31. Resultados para seis edades de falla – (C-212).

### 3.4.1.5. Confiabilidad del alimentador

$$C = e^{-\frac{\text{horas de trabajo} \cdot \gamma}{\eta}}$$

Realizamos 5 iteraciones para ver el progreso de la confiabilidad con respecto a las horas de trabajo. Se obtiene:

CONFIABILIDAD		
Horas	Confiabilidad	%
2 000	0,787	78,71%
4 000	0,620	61,95%
8 000	0,384	38,38%
10 000	0,302	30,21%
12 000	0,238	23,78%

Tabla 32. Confiabilidad del alimentador C-212.

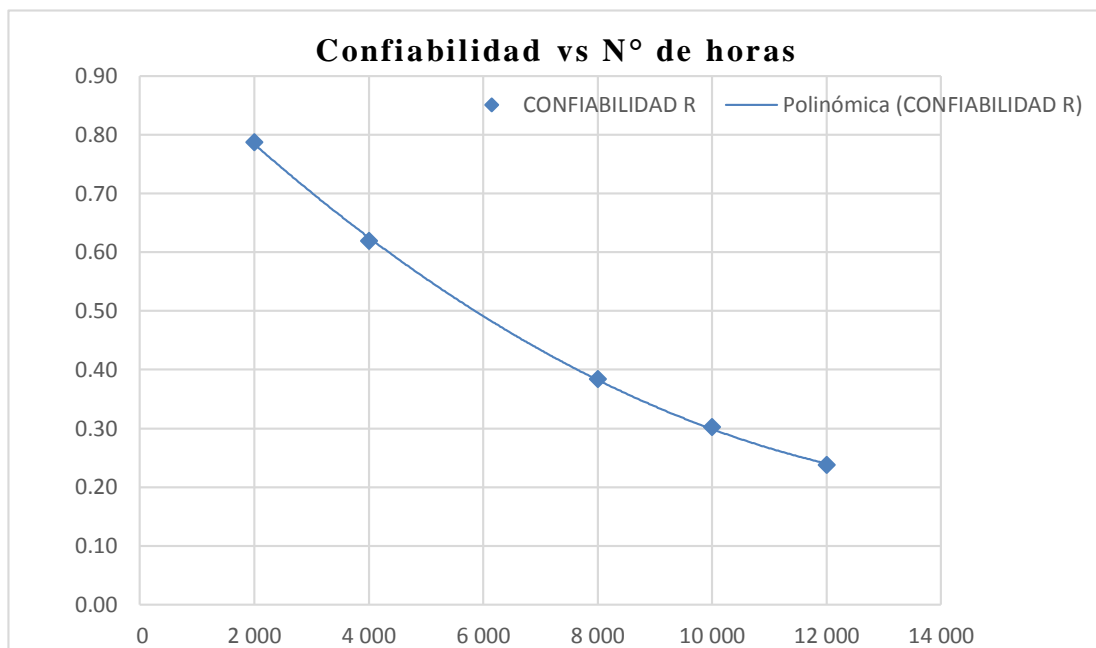


Ilustración 23. Confiabilidad vs N° de horas – (C-212).

En la ilustración 23 se puede observar que conforme aumentan las horas de trabajo del alimentador la confiabilidad disminuye.

### 3.4.1.6. Índices de confiabilidad

Se calculan los índices de confiabilidad.

Periodo (h)	N° interrupciones	MTBF (h)	MTTR (h)
13090,01	9	1 454,45	4,22

Tabla

33. Índices de Confiabilidad del alimentador C-212.

A continuación; la disponibilidad, las fallas por hora y por día:

$$Disponibilidad = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)}$$

Periodo (h)	Disponibilidad	Disponibilidad (%)	$\lambda = 1/MTBF$ (fallas/h)	Fallas/día
13090,01	0,9971	99,7	0,0007	0,0165

Tabla 34. Disponibilidad, fallas por hora y día del alimentador C-212.

### 3.4.2. Alimentador C-214

#### 3.4.2.1. Historial de fallas

Partimos de la Tabla 35, la cual filtramos datos solo consideramos las interrupciones por fallas, además de ordenarlas por orden cronológico para realizar el análisis, obteniendo:

ITEM	NOMBRE ELEMENTO ELÉCTRICO ORIGEN	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	TIPO DE INTERRUPCIÓN
0	C-214	3/05/2014	3/05/2014	Falla
1	C-214	23/06/2014	23/06/2014	Falla
2	C-214	17/08/2014	17/08/2014	Falla
3	C-214	6/12/2014	6/12/2014	Falla
4	C-214	21/12/2014	21/12/2014	Falla
5	C-214	23/12/2014	23/12/2014	Falla
6	C-214	25/01/2015	25/01/2015	Falla
7	C-214	25/01/2015	25/01/2015	Falla
8	C-214	25/01/2015	25/01/2015	Falla
9	C-214	21/02/2015	21/02/2015	Falla
10	C-214	26/03/2015	26/03/2015	Falla
11	C-214	17/04/2015	17/04/2015	Falla
12	C-214	17/04/2015	17/04/2015	Falla

Tabla 35. Historial de fallas en el alimentador C-212.

Se observa que en total se tienen 13 fallas y se enumeran por ítems, iniciando con ITEM 0 (día en que se comenzó a registrar las fallas del alimentador) hasta ITEM 12 (última falla registrada).

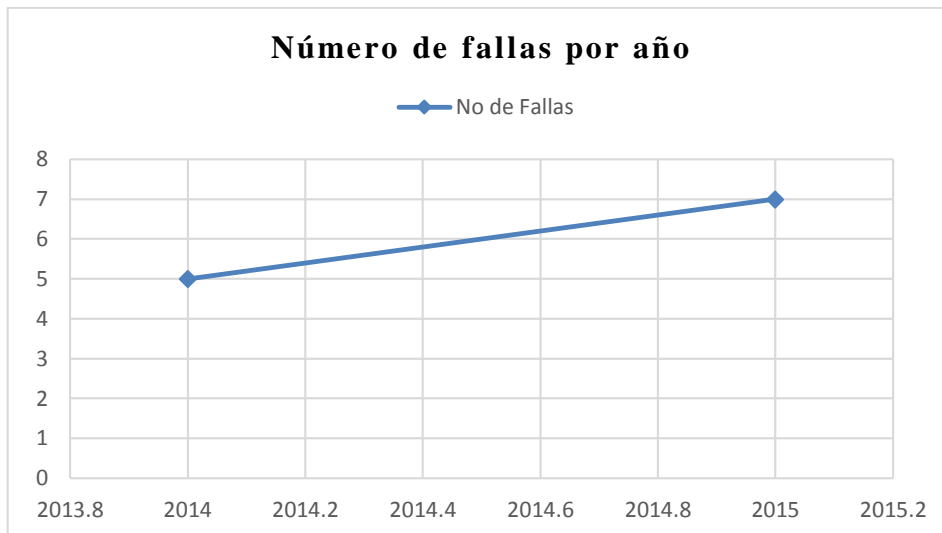


Ilustración 24. Número de fallas por año en el alimentador C-214.

### 3.4.2.2. Horas para la falla

Debido a que se cuenta con las fechas de interrupción y reposición de cada falla se debe de restar la fecha de interrupción de ITEM 1 con la del ITEM 0, y así sucesivamente para las demás.

$$Días\ para\ la\ falla_{item_i} = fecha\ de\ inter_{item_i} - fecha\ de\ rep_{item_i}$$

Donde:

*Días para la falla* : Intervalo de tiempo que transcurre entre ítems.

*i* : Número de ítem, el cual es igual número de la falla (0;1;2;...;12).

Una vez obtenido los días para la falla, lo multiplicamos por 24 hrs. que tiene el día y se obtiene:

$$Horas\ para\ la\ falla_{item_i} = Días\ para\ la\ falla_{item_i} * 24$$

ITEM	FECHA INTERRUPCIÓN	FECHA REPOSICIÓN	DIAS PARA LA FALLA	HORAS PARA LA FALLA
0	3/05/2014	3/05/2014	0	0
1	23/06/2014	23/06/2014	51,00	1 224
2	17/08/2014	17/08/2014	55,00	2 544
3	6/12/2014	6/12/2014	111,00	5 208
4	21/12/2014	21/12/2014	15,00	5 568
5	23/12/2014	23/12/2014	2,00	5 616
6	25/01/2015	25/01/2015	33,00	6 408
7	25/01/2015	25/01/2015	0,00	6 408
8	25/01/2015	25/01/2015	0,00	6 408
9	21/02/2015	21/02/2015	27,00	7 056
10	26/03/2015	26/03/2015	33,00	7 848
11	17/04/2015	17/04/2015	22,00	8 376
12	17/04/2015	17/04/2015	15,00	8 736

Tabla 36. Horas para la falla en el alimentador C-214.

### 3.4.2.3. Cálculo de los parámetros de Weibull

#### 3.4.2.3.1. Rango de la mediana

Es un estimador no paramétrico basado en el orden de los fallos. Este aspecto implica que la muestra de datos se debe organizar de menor a mayor.

$$RM = \frac{N^{\circ} \text{ de orden del fallo} - 0,3}{\text{Tamaño de la muestra} + 0,4}$$

#### 3.4.2.3.2. Recta de regresión

El método de los mínimos cuadrados permite calcular los parámetros de forma y escala mediante la transformación doble logarítmica de la función de distribución acumulativa.

Partimos de la función de distribución de Weibull y operando con ella llegamos:

$$y = \ln \left( \ln \left( \frac{1}{1 - F(x)} \right) \right)$$

Obtenemos el siguiente cuadro con los valores calculados para los fallos del alimentador C-214

<b>ITEM</b>	<b>RM</b>	<b>Ln(T)</b>	<b>RECTA DE REGRESIÓN</b>
1	5,65%	7,11	-2,85
2	13,71%	7,84	-1,91
3	21,77%	8,56	-1,40
4	29,84%	8,62	-1,04
5	37,90%	8,63	-0,74
6	45,97%	8,77	-0,49
7	54,03%	8,77	-0,25
8	62,10%	8,77	-0,03
9	70,16%	8,86	0,19
10	78,23%	8,97	0,42
11	86,29%	9,03	0,69
12	94,35%	9,08	1,06

Tabla 37. Cuadro resumen sobre la recta de regresión y el rango de la mediana – (C-214).

### 3.4.2.3.3. Cálculos de los parámetros $\beta$ y $\eta$

El parámetro de forma  $\beta$ , es la pendiente de regresión. Mientras que el parámetro de escala  $\eta$ , está en función del intercepto  $b$  de la recta de regresión y del parámetro  $\beta$ .

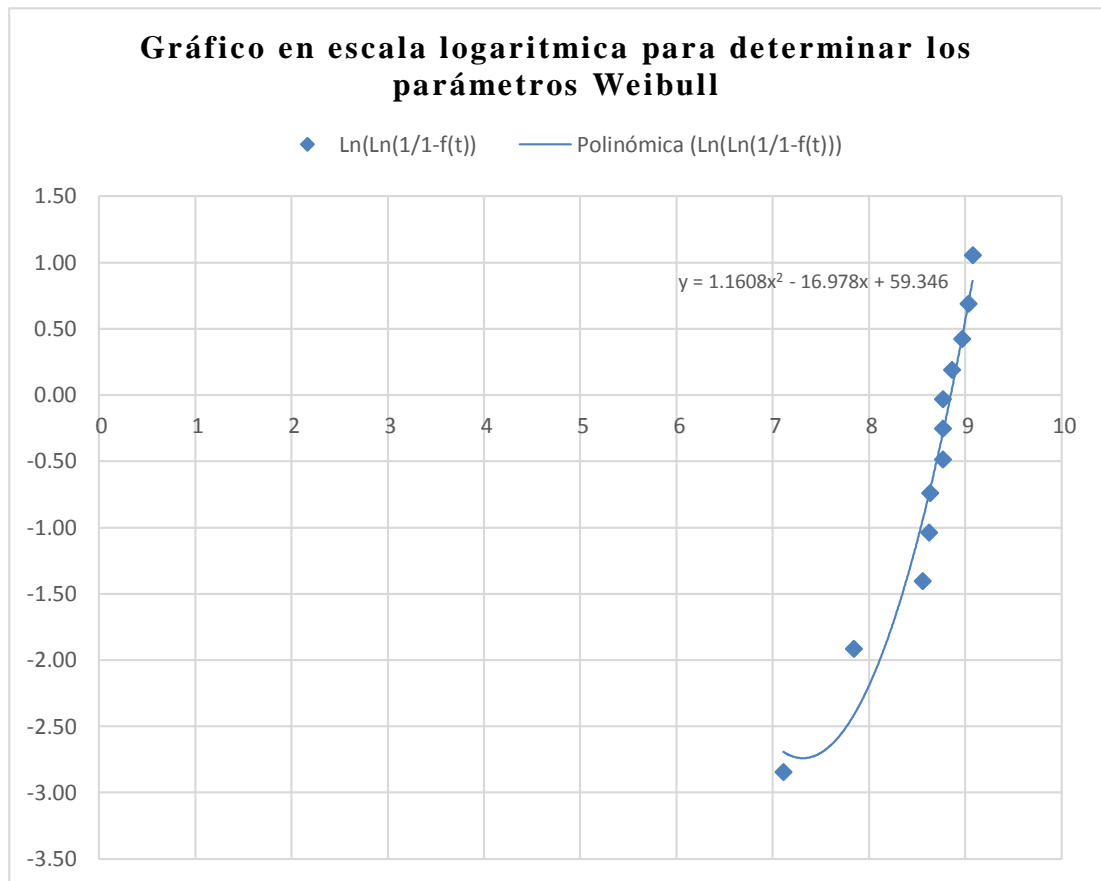


Ilustración 25. Recta de regresión – (C-214).

<b>PARÁMETROS DE WEIBULL</b>		
beta	$\beta$	1,85
eta	$\eta$	7 111,51
gamma	$\gamma$	0

Tabla 3938. Cuadro Resumen sobre la recta de regresión y el rango de la mediana - (C-214).

### 3.4.2.4. Simulación de Montecarlo

A partir de los valores obtenidos de  $\beta$  y  $\eta$  se pueden generar valores aleatorios para generar diversas edades de falla para el alimentador analizado. A continuación se presentan los resultados:

#### 3.4.2.4.1. Generando una edad de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)
1,85	7 111,51	5 635

Tabla 40. Resultados para una edad de falla – (C-214).

#### 3.4.2.4.2. Generando dos edades de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)	Generando dos edades de fallas (h)
1,85	7 111,51	5 635	5 939
			546

Tabla 41. Resultados para dos edades de falla – (C-214).

#### 3.4.2.4.3. Generando tres edades de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)	Generando dos edades de fallas (h)	Generando tres edades de fallas (h)
1,85	7 111,51	5 635	5 939	1 047
			546	18 152
				8 960

Tabla 392. Resultados para tres edades de falla – (C-214).

### 3.4.2.4.4. Generando cuatro edades de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)	Generando dos edades de fallas (h)	Generando tres edades de fallas (h)	Generando cuatro edades de fallas (h)
1,85	7 111,51	5 635	5 939	1 047	20 823
			546	18 152	4 441
				8 960	8 280
					20 442

Tabla 40. Resultados para cuatro edades de falla – (C-214).

### 3.4.2.4.5. Generando cinco edades de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)	Generando dos edades de fallas (h)	Generando tres edades de fallas (h)	Generando cuatro edades de fallas (h)	Generando cinco edades de falla (h)
1,85	7 111,51	5 635	5 939	1 047	20 823	8 576
			546	18 152	4 441	6 389
				8 960	8 280	5 122
					3.479	18 749
						2 889

Tabla 414. Resultados para cinco edades de falla – (C-214).

### 3.4.2.4.6. Generando seis edades de falla

BETA ( $\beta$ )	ETA ( $\eta$ )	Generando una edad de falla (h)	Generando dos edades de fallas (h)	Generando tres edades de fallas (h)	Generando cuatro edades de fallas (h)	Generando cinco edades de falla (h)	Generando seis edades de falla (h)
1,85	7 111,51	5 635	5 939	1 047	20 823	8 576	10 489
			546	18 152	4 441	6 389	4 079
				8 960	8 280	5 122	944
					3.479	20 442	1 098
						2 889	1 018
							8 837

Tabla 425. Resultados para seis edades de falla – (C-214).

### 3.4.2.5. Confiabilidad del alimentador

$$C = e^{-\frac{\text{horas de trabajo} \cdot \gamma}{\eta}}$$

Realizamos 5 iteraciones para ver el progreso de la confiabilidad con respecto a las horas de trabajo. Se obtiene:

CONFIABILIDAD		
Horas	Confiabilidad	%
2 000	0,755	75,49%
4 000	0,570	56,98%
8 000	0,325	32,47%
10 000	0,245	24,51%
12 000	0,185	18,50%

Tabla 436. Confiabilidad del alimentador C-214

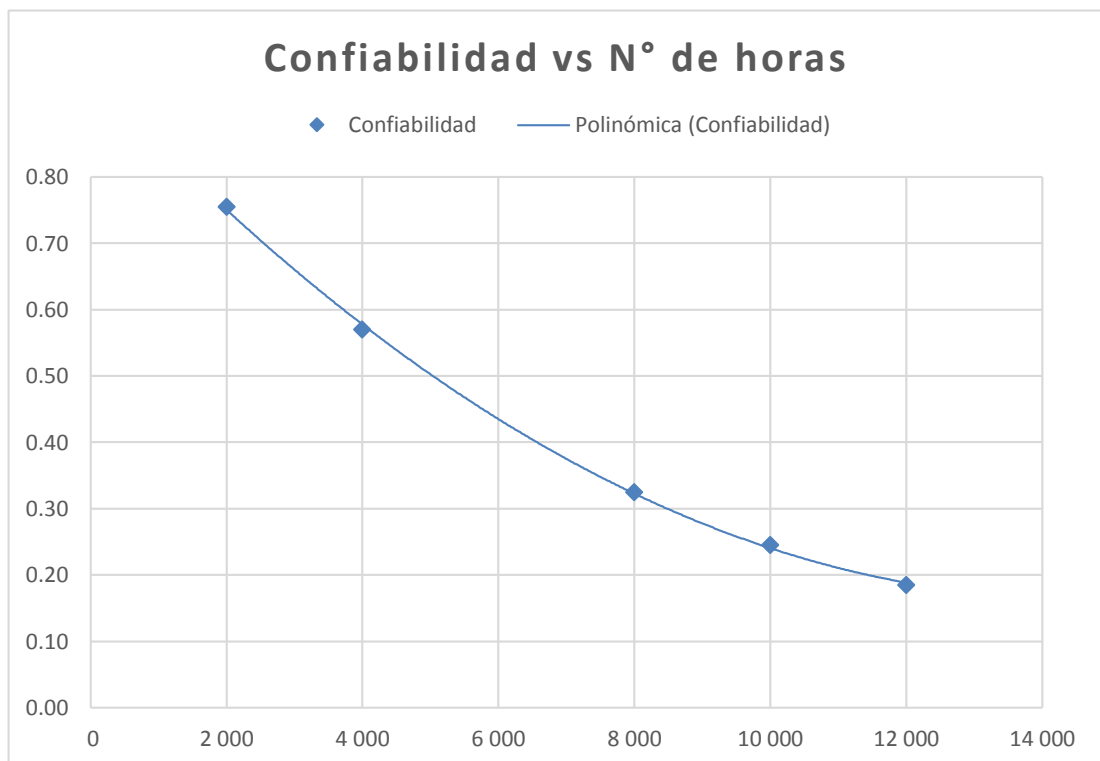


Ilustración 26. Confiabilidad vs N° de horas – (C-214).

En el gráfico 26 se puede observar que conforme aumentan las horas de trabajo del alimentador la confiabilidad disminuye.

### 3.4.2.6. Índices de confiabilidad

Se calculan los índices de confiabilidad.

<b>Periodo (h)</b>	<b>N° interrupciones</b>	<b>MTBF (h)</b>	<b>MTTR (h)</b>
12 147,48	13	934,42	3,42

Tabla 447. Índices de Confiabilidad del alimentador C-214.

A continuación; la disponibilidad, las fallas por hora y por día:

$$Disponibilidad = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)}$$

<b>Periodo (h)</b>	<b>Disponibilidad</b>	<b>Disponibilidad (%)</b>	<b><math>\lambda = 1/MTBF</math> (fallas/h)</b>	<b>Fallas/día</b>
12 147,48	0,996	99,63	0,0011	0,0257

Tabla 458. Disponibilidad, fallas por hora y día del alimentador C-214.

#### **IV. CONCLUSIONES**

De los datos proporcionados según fuente Electronorte SA de los años 2014 y 2015 que cuenta con 10 alimentadores, se concluye que las condiciones técnicas actuales de dichos alimentadores son desfavorables para la empresa y el consumidor, ya que en su mayor porcentaje se debe a los hurtos de los conductores de energía eléctrica por gente inescrupulosa en relación al número de fallas eléctricas propias del alimentador.

Según los datos analizados en la Ilustración 20 se toma como objeto de estudio los alimentadores C-212 y C-214, debido a que son los que cuentan con mayores interrupciones por falla.

En la Tabla 22 se muestra las ventajas y desventajas que ofrecen el método de Markov y el método de Montecarlo. Debido a que el historial de fallas de los alimentadores C-212 y C-214 es pequeño, se decidió utilizar el Método de Simulación de Montecarlo, ya que nos permite trabajar con una base de datos pequeña y obtener resultados favorables con porcentajes de error pequeños.

El análisis de Montecarlo si bien no es un método muy conocido, es capaz de simular un determinado número de fallas y realizar las programaciones adecuadas a fin de optimizar la confiabilidad de la red. El análisis presentado que se muestra en la tesis es para simular desde una posible falla hasta seis fallas en el periodo de vida del alimentador.

El indicador de disponibilidad del alimentador C-212, debido solo a fallas está un nivel de disponibilidad del 99,7%. Lo cual nos indica que es sistema es confiable, debido a que hay 99,7% de oportunidades para que el sistema se encuentre operando en forma correcta en el tiempo esperado.

La confiabilidad del alimentador C-212 analizado va de un nivel del 79 % para las primeras 2 000 horas para luego llegar al 24% a las 12 000 horas, lo cual muestra que

es posible que el alimentador no cumpla con su misión específica conforme pasa el tiempo.

El tiempo medio entre fallas para el alimentador C-212 es de 1 454,45 horas, lo cual nos está indicando que por lo menos debería establecerse un plan de mantenimiento que tome en cuenta este número de horas. El tiempo medio para la reparación es de 4,22 horas; tiempo promedio en el que debería subsanarse las fallas, de acuerdo al histórico de interrupciones presentadas. Y las fallas por día de 0,0165, un valor muy pequeño que demuestra las probabilidades de que ocurra una falla al día.

El indicador de disponibilidad del alimentador C-214, debido solo a fallas teniendo está un nivel de disponibilidad del 99,67%. Lo cual nos indica que el sistema es confiable, debido a que hay 99,67% de oportunidades para que el sistema se encuentre operando en forma correcta en el tiempo esperado.

La confiabilidad del alimentador C-214 analizado va de un nivel del 75,5 % para las primeras 2000 horas para luego llegar al 18,5% a las 12000 horas, Para el alimentador C-214.

El tiempo medio entre fallas para el alimentador C-214 es de 934,2 horas, lo cual nos está indicando que por lo menos debería establecerse un plan de mantenimiento que tome en cuenta este número de horas. El tiempo medio para la reparación es de 3,42 horas; tiempo promedio en el que debería subsanarse las fallas, de acuerdo al histórico de fallas presentadas. Y las fallas por día de 0,0257, un valor muy pequeño que demuestra las probabilidades de que ocurra una falla al día.

Los valores de los indicadores del alimentador C-212 son mayores que los del C-214, esto varía debido al historial de interrupciones de cada alimentador.

## V. RECOMENDACIONES

Para obtener mejores resultados que nos permita analizar no solamente los indicadores de confiabilidad sino también los costos asociados, se deberían establecer datos que nos permita cuantificar los mismos.

Se debería de registrar las fallas por equipos en los alimentadores para que de esta manera si se deseara realizar una análisis, éste sea más profundo y muestre valores más cercanos a la realidad.

Para mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico de distribución, se ha recurrido a diferentes métodos, entre los que se destacan:

### a. Reducción de la tasa de fallos:

La reducción de la frecuencia de las interrupciones se puede conseguir a través del mejoramiento del sistema y sus componentes. Las medidas a tomar pueden ser las siguientes:

- Mantenimiento preventivo y monitorización.
- Reposición preventiva de componentes que han alcanzado su vida útil.
- Cables aislados o semiaislados en líneas aéreas.
- Recorte de la vegetación cerca y debajo de las líneas aéreas.
- Protecciones contra la invasión de animales en instalaciones.

### b. Reducción del tiempo de afectación:

El tiempo de afectación representa principalmente el tiempo necesario para restablecer el suministro en la zona afectada por la interrupción. Debido a la configuración de la red, la zona afectada por la falla se puede aislar del resto de la red, desconectando la sección que englobe esta zona. Esta medida no reduce el tiempo de afectación de la sección afectada, pero introduce una mejora substancial en tiempo para las partes de la red no afectadas directamente por la

falla, sobre todo, si la operación de la reconfiguración de la red está automatizada. Además, si la reconfiguración se produce en un tiempo menor de tres minutos, la interrupción experimentada por el cliente no se considera una interrupción de larga duración. Dicha reducción se puede conseguir actuando sobre las siguientes medidas:

- Automatización de las redes.
- Reconfiguración del sistema tras el fallo.
- Sistema de localización de fallos.
- Reducción del tiempo de respuesta.

**c. Reducción de número de clientes afectados:**

Con la reducción de número de clientes o potencia interrumpida por cada falla se puede conseguir la disminución de todo tipo de índices. Esta reducción se puede lograr a través de las siguientes medidas:

- Reconfiguración permanente de la red.
- Incremento de los elementos de protección.
- Régimen de puesta a tierra del neutro resonante.

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

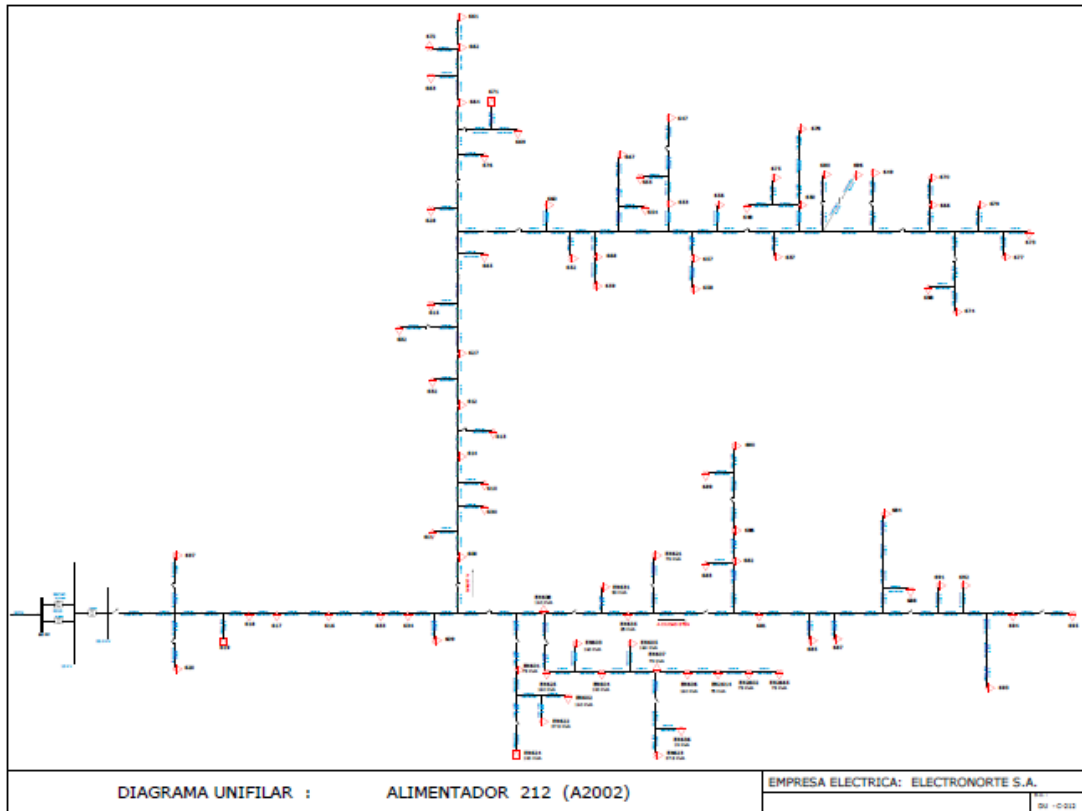
- [1] V. VARELA VARELA, «EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN,» Univerdidad de Costa Rica, Costa Rica, 2004.
- [2] C. J. ZAPATA, L. C. PIÑEROS y D. A. CASTAÑO, «EL MÉTODO DE SIMULACIÓN DE MONTECARLO EN ESTUDIOS DE CONFIABILIDAD DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA,» *Scientia Et Technica*, vol. X, n° 24, pp. 55-60, mayo 2004.
- [3] Sector eléctrico en el Perú, «Wikipedia,» 19 enero 2018. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Sector\\_el%C3%A9ctrico\\_en\\_el\\_Per%C3%BA](https://es.wikipedia.org/wiki/Sector_el%C3%A9ctrico_en_el_Per%C3%BA). [Último acceso: 17 marzo 2018].
- [4] J. P. ORDOÑEZ SANCLEMENTE y L. G. NIETO ALVARADO, «MANTENIMIENTO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE DISTRIBUCION,» Universidad Politecnica Salesiana Sede Guayaquil, Guayaquil, 2010.
- [5] D. G. d. Electricidad, CÓDIGO NACIONAL DE ELECTRICIDAD (SUMINISTRO 2011), Lima: Ministerio de Energía y Minas, 2011.
- [6] J. J. MORA FLÓREZ, «Localización de Faltas en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica usando Métodos Basados en el Modelo y Métodos de Clasificación Basados en el Conocimiento,» Universitat de Girona , Girona, 2006.
- [7] A. URQUÍA MORALEDA, «SIMULACIÓN Texto Base de Teoría,» Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática, Madrid, 2009.
- [8] J. C. ORJUELA, «La confiabilidad en los sistemas eléctricos,» Schneider Electric, Lima, 2008.
- [9] M. A. G. ARRIAGADA, «EVALUACION DE CONFIABILIDAD EN SISTEMAS ELECTRICOS DE DISTRIBUCION,» Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 1994.
- [10] L. A. CHUSIN CAYO y B. S. ESCOBAR GUANOLUISA, «ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA CON PENETRACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA.,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2015.
- [11] Minitab, «¿Qué es el tiempo promedio para fallar (MTTF)?,» Soporte de Minitab18, Ciudad de México, 2013.
- [12] G. SIGÜENZA GONZALEZ, «CONSULTORIA ITC Difusión de Cultura de Confiabilidad y Alto Desempeño Operativo,» CONSULTORIA ITC, 11 abril 2018. [En línea]. Available: <http://www.industrialtijuana.com/pdf/B-4.pdf>. [Último acceso: 17 marzo 2018].
- [13] L. C. PINEROS VERGARA y D. A. CASTAÑO ALZATE, «ESTUDIO DE CONFIABILIDAD DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PEREIRA USANDO EL MÉTODO DE SIMULACIÓN DE MONTECARLO,» UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, PEREIRA, 2003.
- [14] P. D. I. D. E. (PRIEN), CONFIABILIDAD DE SISTEMAS ELÉCTRICOS, Santiago de Chile: Programa de Investigaciones de Energía (PRIEN), 1999.
- [15] C. J. ZAPATA y E. L. CAMPOS, «VALORACIÓN DE CONFIABILIDAD DE SISTEMAS DE GENERACIÓN CON RECURSOS LIMITADOS DE ENERGÍA

UTILIZANDO SIMULACIÓN DE MONTECARLO,» *Scientia et Technica*, vol. XI, n° 29, pp. 43-48, 2005.

- [16] Y. E. GRIJALVA YAURI, «METODOS CUANTITATIVOS PARA LOS NEGOCIOS,» 20 Julio 2009. [En línea]. Available: <https://uplamcdn.files.wordpress.com/2009/04/libro-cap-08.pdf>. [Último acceso: 28 04 2018].
- [17] B. S. BENNETT, *Simulation Fundamentals*, P. E. Limited, Ed., Harlow: Prentice-Hall, 1995.
- [18] A. GARCÉS, O. GÓMEZ CARMONA y A. GONZÁLEZ ARIAS, «MEJORAMIENTO DE LA CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE RECONFIGURACIÓN DE ALIMENTADORES PRIMARIOS,» *Scientia et Technica.*, vol. XIV, n° 38, pp. 59-64, Junio 2008.

## VII. ANEXOS

### ALIMENTADOR C-212



### ALIMENTADOR C-214

