



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS
DE DESCONEXIÓN EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN MEDIANTE UN
ALGORITMO GENÉTICO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD
EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

P R E S E N T A:

GUSTAVO ISAAC MARTÍNEZ RUIZ



MEXICO, D.F.

2013



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO
ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 7 del mes de Noviembre del 2013 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME-Zacatenco para examinar la tesis titulada:

UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS DE DESCONEXIÓN EN REDES DE DISTRIBUCIÓN
MEDIANTE UN ALGORITMO GENÉTICO

Presentada por el alumno:

MARTÍNEZ
Apellido paterno

RUÍZ
Apellido materno

GUSTAVO ISAAC
Nombre(s)

Con registro:

B	1	1	0	7	2	1
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

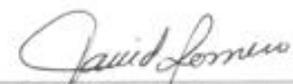
Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis


DR. JAIME ROBLES GARCÍA

PRESIDENTE


DR. DAVID ROMERO ROMERO

TERCER VOCAL


M. EN C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER

SEGUNDO VOCAL


DR. JOSÉ ALBERTO GÓMEZ HERNÁNDEZ

SECRETARIO


DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


DR. MAURO ALBERTO ENCISO AGUILAR





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 02 del mes de Noviembre del año 2013, el que suscribe Gustavo Isaac Martínez Ruiz, alumno del Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica, con número de registro B110721, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME-Zacatenco del IPN, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Jaime Robles García y cede los derechos del trabajo titulado Ubicación Óptima de Dispositivos de Desconexión en Redes de Distribución mediante un Algoritmo Genético, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o directores del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones gustavommrr@hotmail.com, y jarobles@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Gustavo Isaac Martínez Ruiz

DEDICATORIAS

A mis padres, por ser las personas más importantes en mi vida y las que más quiero, porque gracias a sus motivaciones y consejos lleve adelante este trabajo.

A mis tres extraordinarios hermanos que quiero con todo mi corazón, porque siempre me apoyaron y motivaron durante esta etapa.

A mis sobrinos porque siempre serán una parte importante de mi vida.

A mis compañeros de la SEPI, porque hicieron que esta etapa de mi vida fuera inolvidable.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Jaime Robles García, por todos sus consejos, atenciones, conocimientos y motivaciones brindadas durante esta etapa, y por su dirección para la realización de este trabajo.

A los miembros de la comisión revisora de tesis: Dr. David Romero Romero, Dr. Ricardo O. Mota Palomino, Dr. José Alberto Gómez Hernández, M. en C. Gilberto Enríquez Harper, Dr. David Sebastián Baltazar; por todos sus conocimientos transmitidos dentro y fuera del aula de clase, y por sus acertadas recomendaciones para el enriquecimiento de este trabajo.

A los ingenieros: Mauricio Gallegos Escobar y Eduardo Hernández Hernández, por su colaboración en la realización de las pruebas llevadas a cabo en este trabajo.

Al Instituto Politécnico Nacional y al CONACYT, por su apoyo económico recibido durante el desarrollo de este trabajo.

RESUMEN

Uno de los factores que influye directamente en la confiabilidad del sistema de distribución es la ubicación de los dispositivos de desconexión. Se puede obtener varios niveles de confiabilidad variando la combinación de estos componentes en el sistema. Obviamente, con más de estos componentes puestos en el sistema hará que el costo inversión de la compañía sea mayor, sin embargo, no necesariamente hará que aumente la confiabilidad. Esto es porque puede haber dispositivos de desconexión de más o mal ubicados que no tengan ningún efecto en la confiabilidad de la red. Así, estos dispositivos juegan un rol importante en la confiabilidad del sistema de distribución y por lo tanto, la ubicación y selección de un adecuado número de estos componentes es un factor importante en la planeación del sistema. Por lo anterior surge un problema, el seleccionar y ubicar los dispositivos de desconexión en el sistema de distribución de manera óptima. Cuando se habla de optimización, se puede realizar diversos planteamientos, sin embargo, en este trabajo se utilizan los dos siguientes: 1.- Minimizar costos sujeto a restricciones de confiabilidad y 2.-Minimizar el costo total de la confiabilidad, incluyendo los costos para proporcionar la confiabilidad y los costos incurridos asociados con interrupciones.

En este trabajo se aborda el problema descrito en el párrafo anterior. Para resolverlo se utiliza un método de optimización discreto híbrido; el cual combina un algoritmo genético y un algoritmo de búsqueda local. También, de acuerdo a los dos planteamientos de optimización que se mencionaron en el párrafo anterior, se tiene que utilizar un método para realizar evaluaciones de confiabilidad de redes de distribución; en el primer planteamiento para obtener los valores de las restricciones (índices de confiabilidad) y en el segundo para obtener los costos debido a las interrupciones. En este trabajo para realizar la evaluación de la confiabilidad se utilizan dos simulaciones: Primero un Monte Carlo y después una simulación analítica.

Se desarrolló un programa en lenguaje Fortran para resolver el problema de ubicar y seleccionar dispositivos de desconexión en redes de distribución para minimizar el costo de la confiabilidad. Para las pruebas se utilizó un alimentador de la red de la IEEE [1] y un alimentador real de 23 kV [2], en ambos casos se lograron obtener resultados donde se minimizan los costos. También, con el alimentador de la IEEE se realizaron pruebas donde se demostró en qué casos es conveniente utilizar sólo el algoritmo genético, y en qué casos es conveniente utilizar ambos algoritmos (genético y búsqueda local). Los tiempos de cómputo fueron de segundos cuando se utilizó el primero de los alimentadores, éstos aumentaron a horas (entre 5 y 8) cuando se utilizó el alimentador real de 23kV.

ABSTRACT

One of the factors that directly influence the reliability of the distribution system is the location of the disconnect devices. We can obtain various levels of reliability varying the combination of these components in the system. Obviously, with more of these components put on the system will make the investment cost of the company be greater, however, not necessarily will increase the reliability. This is because there may be components misplaced that will not have effect in the network reliability. Thus, the disconnect devices play an important role in the reliability of the distribution system and therefore, the location and selection of a suitable number of these components is an important factor in the planning of the system. Therefore arises a new problem, select and locate the disconnect devices in the distribution system optimally. When it comes to optimization, can make various approaches, however, this paper use the following two: 1.- Minimize cost subject to reliability constraints and 2.- Minimize the total cost of reliability, including the cost to provide reliability and the incurred costs associated with interruptions.

This paper approaches the problem described in the previous paragraph. To solve this problem it developed a hybrid optimization method; this combines a genetic algorithm and local search algorithm. Also, according to the two optimization approaches mentioned in the previous paragraph, it has to use a method for reliability assessment of distribution networks; in the first approach to obtain the values of the restrictions (reliability indices) and the second to obtain the incurred costs associated with interruptions. In this paper for the evaluation of the reliability using two simulations: First a Monte Carlo and after an analytical simulation.

It developed a program in Fortran to solve the problem of locating and selecting disconnect devices in distribution networks to minimize the cost of reliability. For tests, a feeder of network of IEEE [1] and a real feeder of 23 kV [2] was used; both cases the results were achieved where costs are minimized. Also, tests in the IEEE feeder were performed which showed in which situations it is appropriate to use only the genetic algorithm, and in what cases it is convenient to use both algorithms (genetic and local search). The computation times were of seconds when using the first of the feeders, they increased to hours (5 to 8) when using the real feeder of 23kV.

CONTENIDO

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS	XI
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 ASPECTOS GENERALES	1
1.1.1 CONFIABILIDAD DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	2
1.1.1.1 UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE DESCONEXIÓN EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	3
1.2 OBJETIVO	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 ESTADO DEL ARTE	4
1.4.1 TRABAJOS SOBRE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA	4
1.4.2 TRABAJOS SOBRE LA OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN REDES DE DISTRIBUCIÓN ..	6
1.4.3 TRABAJOS RELACIONADOS DESARROLLADOS EN LA SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN DEL IPN.....	7
1.5 APORTACIONES DE LA TESIS.....	7
1.6 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE TESIS.....	8
CAPÍTULO 2: EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	10
2.1 INTRODUCCIÓN	10
2.2 MODELADO DE LA CONFIABILIDAD DE LOS COMPONENTES.....	10
2.3 MÉTODOS PARA REALIZAR LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE REDES DE DISTRIBUCIÓN	12
2.3.1 SIMULACIÓN DE MONTE CARLO	12
2.3.1.1 GENERADORES DE NÚMEROS ALEATORIOS.....	13

CONTENIDO

2.3.1.2 SIMULACIÓN NO SECUENCIAL DE MONTE CARLO	14
2.3.1.3 SIMULACIÓN SECUENCIAL DE MONTE CARLO	14
2.3.2 SIMULACIÓN ANÁLITICA	20
2.3.2.1 NAVEGACIÓN EN REDES RADIALES	20
2.3.2.2 SIMULACIÓN DE CONTINGENCIA	26
2.3.2.3 RESPUESTA DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN	26
2.3.2.4 RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA	29
2.4 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE REDES EN DISTRIBUCIÓN RADIALES.....	33
CAPÍTULO 3: OPTIMIZACIÓN DEL COSTO DE LA CONFIABILIDAD.....	37
3.1 INTRODUCCIÓN.....	37
3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	39
3.2.1 OPTIMIZACIÓN DEL COSTO SUJETO A RESTRICCIONES DE CONFIABILIDAD.....	40
3.2.1.1 COSTOS DE LOS DISPOSITIVOS DE DESCONEXIÓN	41
3.2.2 OPTIMIZACIÓN DEL COSTO TOTAL DE LA CONFIABILIDAD	42
3.3 REPRESENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN	42
3.4 BÚSQUEDA LOCAL PARA SELECCIONAR Y UBICAR DISPOSITIVOS DE DESCONEXIÓN EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	45
3.5 ALGORITMOS GENÉTICOS	47
3.5.1 ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE PARA SELECCIONAR Y UBICAR DISPOSITIVOS DE DESCONEXIÓN EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	47
3.6 ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO	52
CAPÍTULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS.....	55
4.1 INTRODUCCIÓN.....	55
4.2 PRUEBAS EN UN ALIMENTADOR DE LA IEEE	55
4.2.1 PRUEBAS CON EL ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE: VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE LA POBLACIÓN.....	58
4.2.2 PRUEBAS CON EL ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE: VARIACIÓN DE LA TASA DE MUTACIÓN	63
4.2.3 PRUEBAS CON EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA LOCAL (ESCALADA SIMPLE).....	67

CONTENIDO

4.3 PRUEBAS EN UN ALIMENTADOR REAL.....	69
4.3.1 PRUEBA UNO: MISMA CONFIABILIDAD	72
4.3.2 PRUEBA DOS: MAYOR CONFIABILIDAD.....	77
4.3.3 PRUEBA TRES: CONFIABILIDAD PARA REDUCIR COSTOS TOTALES DE LA COMPAÑÍA.....	80
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS.....	85
5.1 INTRODUCCIÓN.....	85
5.2 CONCLUSIONES SOBRE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	85
5.3 CONCLUSIONES SOBRE LA OPTIMIZACIÓN DEL COSTO DE LA CONFIABILIDAD.....	86
5.4 SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS	88
REFERENCIAS.....	89
ANEXO A: ÍNDICES DE CONFIABILIDAD.....	96
A.1 INTRODUCCIÓN.....	96
A.2 ÍNDICES DE CONFIABILIDAD BASADOS EN EL CLIENTE	96
A.3 ÍNDICES DE CONFIABILIDAD BASADOS EN LA CARGA.....	99
ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD.....	100
B.1 INTRODUCCIÓN.....	100
B.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD	100
B.2.1 PRUEBAS TOMANDO EN CUENTA TODOS LOS DISPOSITIVOS	102
B.2.2 PRUEBAS SIN CUCHILLAS Y SIN ALIMENTACIÓN ALTERNA	107
B.2.3 PRUEBAS SIN FUSIBLES	110
B.2.4 PRUEBAS CON RESTAURADORES	112
ANEXO C: DATOS DEL ALIMENTADOR REAL.....	117
C.1 INTRODUCCIÓN.....	117
C.2 DESCRIPCIÓN DEL ALIMENTADOR	117

CONTENIDO

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO	127
D.1 INTRODUCCIÓN.....	127
D.2 ARCHIVOS DE DATOS	127
D.2.1 ARCHIVO DE TOPOLOGIA Y CONFIABILIDAD	127
D.2.2 ARCHIVO DE LOS PUNTOS DE CARGA.....	129
D.2.3 ARCHIVO DE OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD	130
D.3 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA	131
D.3.1 CODIGO FUENTE	132

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Nombre	Pág.
2.1	Diagrama de estados y transiciones del componente.	15
2.2	Historia de operación de un componente.	16
2.3	Historias de operación de los componentes antes y después de la evaluación de confiabilidad.	17
2.4	Red de distribución por niveles.	22
2.5	Búsqueda aguas arriba.	23
2.6	Búsqueda aguas abajo.	25
2.7	Esquemas de protección de un alimentador de distribución.	27
2.8	Reconfiguraciones de la red para restaurar secciones después de una falla.	30
2.9	Reconfiguraciones de la red para restaurar secciones en dos pasos.	33
2.10	Primera parte del diagrama de flujo de la combinación de la simulación secuencial de Monte Carlo y la simulación analítica.	34
2.11	Segunda parte del diagrama de flujo de la combinación de la simulación secuencial de Monte Carlo y la simulación analítica.	35
3.1	Curvas confiabilidad-costo.	37
3.2	Combinaciones de dispositivos de desconexión para obtener diversos valores del SAIDI.	38
3.3	Posibles ubicaciones de los dispositivos de desconexión en un alimentador.	43
3.4	Ubicación de los dispositivos de desconexión en un alimentador.	44
3.5	Alimentador para ejemplificar el algoritmo genético simple.	48
3.6	Rueda de la ruleta para la selección de cromosomas.	50
3.7	Diagrama de flujo del algoritmo de optimización propuesto.	54
4.1	Alimentador prueba de la IEEE.	56
4.2	Costo total en relación al tamaño de la población.	60
4.3	Tiempo de ejecución en relación al tamaño de la población.	61
4.4	Comportamiento del algoritmo genético con un tamaño de población de 10.	61
4.5	Comportamiento del algoritmo genético con un tamaño de población de 70.	62
4.6	Ubicación final de los dispositivos de desconexión en el alimentador prueba utilizando un algoritmo genético simple.	63
4.7	Variación del costo con diferentes tasas de mutación y diferentes tamaños de población.	65
4.8	Variación del tiempo de ejecución con diferentes tasas de mutación y con tamaños de población de 5, 10 y 20.	66
4.9	Variación del tiempo de ejecución con diferentes tasas de mutación y con tamaños de población de 35 y 60.	66
4.10	Ubicación final de los dispositivos de desconexión en el alimentador prueba utilizando un algoritmo de búsqueda local (escalada simple).	68

Índice de Figuras

4.11	Alimentador real de 23 kV.	69
4.12	Alimentador con sus dispositivos de desconexión actuales.	70
4.13	Posible ubicación de los dispositivos de desconexión en el alimentador real.	73
4.14	Ubicación final de los dispositivos de desconexión en la primera prueba, obtenido con el programa de optimización.	75
4.15	Comportamiento del algoritmo genético con la primera prueba.	76
4.16	Ubicación final de los dispositivos de desconexión en la segunda prueba, obtenido con el programa de optimización.	79
4.17	Comportamiento del algoritmo genético con la segunda prueba.	80
4.18	Ubicación final de los dispositivos de desconexión en la tercera prueba, obtenido con el programa de optimización.	81
4.19	Relación SAIFI-Costo total.	83
4.20	Relación SAIDI-Costo total.	83
4.21	Relación MAIFI-Costo total.	84
B.1	Red de distribución prueba.	101
B.2	Densidad de probabilidad de la tasa de falla en el punto de carga 8.	105
B.3	Densidad de probabilidad de la tasa de falla en el punto de carga 18.	106
B.4	Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 8.	107
B.5	Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 18.	107
B.6	Densidad de probabilidad de la tasa de falla en el punto de carga 8 sin cuchillas en la red.	108
B.7	Densidad de probabilidad de la tasa de falla en el punto de carga 18 sin cuchillas en la red.	109
B.8	Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 8 sin cuchillas en la red.	109
B.9	Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 18 sin cuchillas en la red.	110
B.10	Densidad de probabilidad de la tasa de falla en el punto de carga 8 sin fusibles en la red.	111
B.11	Densidad de probabilidad de la tasa de falla en el punto de carga 18 sin fusibles en la red.	111
B.12	Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 8 sin fusibles en la red.	112
B.13	Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 18 sin fusibles en la red.	112
C.1	Secciones de línea del alimentador real.	118
D.1	Red de distribución para la creación de los archivos de datos.	128
D.2	Primer archivo de datos.	129
D.3	Segundo archivo de datos.	130
D.4	Tercer archivo de datos.	130
D.5	Estructura del programa principal.	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Nombre	Pág.
3.1	Costos obtenidos de la población inicial.	49
3.2	Costos obtenidos de la segunda población.	52
4.1	Longitud de las secciones de línea del alimentador prueba.	55
4.2	Datos de clientes del alimentador prueba.	56
4.3	Datos de confiabilidad de los componentes del alimentador prueba.	56
4.4	Costos anualizados de los dispositivos de desconexión.	57
4.5	Costos por energía y potencia no suministradas.	57
4.6	Resultados obtenidos variando el tamaño de la población para la ejecución del algoritmo genético.	59
4.7	Resultados obtenidos variando el tamaño de la población y con tasa de mutación de 0.01%.	63
4.8	Resultados obtenidos variando el tamaño de la población y con tasa de mutación de 0.05%.	64
4.9	Resultados obtenidos variando el tamaño de la población y con tasa de mutación de 0.1%.	64
4.10	Resultados obtenidos variando el tamaño de la población y con tasa de mutación de 0.5%.	64
4.11	Resultados obtenidos variando el tamaño de la población y con tasa de mutación de 1%.	64
4.12	Resultados obtenidos utilizando el algoritmo de “escalada simple”.	68
4.13	Datos de confiabilidad utilizados en el alimentador real.	71
4.14	Índices de confiabilidad del alimentador con los dispositivos de desconexión actuales.	71
4.15	Costos de los dispositivos de desconexión para su colocación en el alimentador real.	73
4.16	Datos utilizados en la primera prueba para la ejecución del algoritmo genético.	74
4.17	Comparación de los índices de confiabilidad de la primera prueba.	75
4.18	Comparación de algunas características de la primera prueba.	76
4.19	Índices de confiabilidad requeridos.	77
4.20	Datos utilizados en la segunda prueba para la ejecución del algoritmo genético.	78
4.21	Comparación de los índices de confiabilidad de la segunda prueba.	79
4.22	Índices de confiabilidad obtenidos en la tercera prueba.	82
4.23	Comparación de los costos actuales y de los costos de las tres pruebas.	82
B.1	Longitud de las secciones de línea de los alimentadores.	100
B.2	Datos de clientes.	101
B.3	Datos de confiabilidad de los componentes.	102

Índice de Tablas

B.4	Índices de confiabilidad en los puntos de carga.	103
B.5	Índices de confiabilidad por usuario en los alimentadores.	104
B.6	SAIFI simulando diversas veces un año.	104
B.7	CAIDI simulando diversas veces un año.	105
B.8	ENS simulando diversas veces un año.	105
B.9	Índices de confiabilidad por usuario en los alimentadores, con y sin cuchillas.	108
B.10	Índices de confiabilidad por usuario en los alimentadores, con y sin fusibles.	110
B.11	SAIFI utilizando el esquema de protección “Restaurado-Fusible”.	113
B.12	SAIFI utilizando el esquema de protección “Fusible-Restaurador”.	113
B.13	MAIFI utilizando el esquema de protección “Restaurado-Fusible”.	114
B.14	MAIFI utilizando el esquema de protección “Fusible-Restaurador”.	114
B.15	SAIDI utilizando el esquema de protección “Restaurado-Fusible”.	114
B.16	SAIDI utilizando el esquema de protección “Fusible-Restaurador”.	115
B.17	ENS utilizando el esquema de protección “Restaurado-Fusible”.	115
B.18	ENS utilizando el esquema de protección “Fusible-Restaurador”.	115
C.1	Características de las secciones de línea.	116
C.2	Características de los puntos de carga.	124

SIMBOLOGÍA Y ABREVIATURAS

<i>Símbolo</i>	<i>Significado</i>
n_a	Número aleatorio uniforme
λ_C	Tasa de falla individual del componente
r_C	Tiempo medio de reparación individual del componente
r_S	Tiempo medio de conmutación de una cuchilla normalmente cerrada
r_{SA}	Tiempo medio de conmutación de una cuchilla normalmente abierta
λ	Tasa de falla
r	Tiempo medio de reparación
U	Indisponibilidad
Nf	Número de cortes de energía durante los años muestreados
N	Número de años muestreados
s	Densidad de probabilidad de la tasa de falla
q	Densidad de probabilidad de la indisponibilidad
M	Total de fallas en los años muestreados
C	Representa un componente en una red de distribución
N1	Representa una fila de la matriz de niveles
P1	Representa una columna de la matriz de niveles
V1	Representa algún valor de la matriz de conectividad
V2	Representa algún valor de la matriz de niveles
D	Vector para realizar búsquedas hacia varios caminos en una red de distribución
R	Representa un restaurador
P	Representa un dispositivo de protección
Cnc	Representa una cuchilla normalmente cerrada
Cna	Representa una cuchilla normalmente abierta
rt	Tiempo de restauración total
C_{comp}	Costo de inversión de la compañía
C_a	Costo anualizado de un dispositivo de desconexión
C_{client}	Costo del cliente debido a fallas en la red de distribución
C_{kW}	Costo por kilo Watt interrumpido
C_{kWh}	Costo por kilo Watt hora no suministrado
P_p	Potencia promedio
ndd	Número de dispositivos de desconexión
C_r	Costo recurrente anual de un dispositivo de desconexión.
C_p	Costo presente o costo por la compra de un dispositivo de desconexión.
F	Función objetivo en el problema de optimización
d	Tasa de descuento anual
tdv	Tiempo de vida de un dispositivo de desconexión
nd	Número de posibles combinaciones de dispositivos de desconexión

Simbología y Abreviaturas

nc	Número de posibles ubicaciones de dispositivos de desconexión
Ndl	Número de lugares que se asignan a un cromosoma en la rueda de la ruleta
Bmin	Número mínimo de lugares que tendrá un cromosoma en la rueda de la ruleta
Bmax	Número máximo de lugares que tendrá un cromosoma en la rueda de la ruleta
Fm	Función objetivo del cromosoma más apto
Fp	Función objetivo del cromosoma menos apto
PC	Representa un punto de carga en una red de distribución
Fe	Representa un alimentador en una red de distribución
\$	Pesos mexicanos
NdC	Número de Clientes

Abreviatura Significado

SEP	Sistema Eléctrico de Potencia
SEPI	Sección de Estudios de Posgrado e Investigación
IPN	Instituto Politécnico Nacional
TTF	Tiempo a la falla
FT	Tiempo de falla
TTR	Tiempo de reparación
SAIFI	Índice Promedio de la Frecuencia de Interrupción del Sistema
SAIDI	Índice Promedio de la Duración de Interrupción del Sistema
CAIDI	Índice Promedio de la Duración de Interrupción de los Clientes
ASAI	Índice Promedio de la Disponibilidad del Servicio
CAIFI	Índice Promedio de la Frecuencia de Interrupción de los Clientes
MAIFI	Índice Promedio de la Frecuencia de Interrupción Momentánea
CEMI _n	Interrupciones Múltiples que Experimentan los Clientes
CEMSMI _n	Interrupciones Sostenidas y Momentáneas que Experimentan los Clientes
ENS	Energía No Suministrada
AENS	Índice promedio del Acortamiento del Cliente
ACCI	Representa algún valor de la matriz de conectividad
MWh	Mega Watt hora
km	Kilometro
kV	Kilo volt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt hora
hrs	Horas
m	Metro
pu	Por unidad
seg	Segundo

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 ASPECTOS GENERALES

La función de un sistema eléctrico de potencia (SEP) es proporcionar un suministro eléctrico adecuado a sus clientes, tan económico como sea posible y con un nivel razonable de confiabilidad [3-5]. Este último aspecto ha sido, y será siempre, de gran interés para los ingenieros y administradores del sistema de potencia. El concepto de la confiabilidad del sistema de potencia es extremadamente amplio y cubre todos los aspectos de la capacidad del sistema para satisfacer los requerimientos del cliente. Incluye medidas del lado de la demanda o carga, tales como calidad y continuidad del servicio desde el punto de vista del cliente. También incluye lo concerniente desde el lado del suministro o compañía tal como la reserva de energía presente y futura, y las restricciones operacionales, tales como valores nominales del equipo y límites de estabilidad, los cuales no directamente se ven por los clientes. Por lo que algunos investigadores han enfocado el tema de la confiabilidad desde el punto de vista del cliente con poca consideración por el sistema, mientras otros han visto esta situación primeramente desde el sistema y compañía sin consideración del cliente. Es necesario que las consideraciones del suministro y la demanda sean apropiadamente incluidas para satisfacer los requerimientos del cliente y que el sistema tenga un buen funcionamiento y longevidad.

Un sistema eléctrico de potencia confiable sirve a las cargas de los clientes sin interrupciones en el suministro de voltaje. Un sistema empieza a ser menos confiable cuando aumenta la probabilidad de falla en él y la respuesta ante una posible falla empeora. Para lograr que un SEP sea confiable, se tiene que cumplir lo siguiente [6]:

1. Instalaciones de generación, se debe de producir suficiente potencia para satisfacer la demanda del cliente.
2. Sistemas de transmisión, transportar potencia en grandes cantidades a través de largas distancias sin sobrecalentamiento o poniendo en peligro la estabilidad del sistema.
3. Sistemas de distribución, suministrar la energía eléctrica a la entrada de servicio de cada cliente.

De esta manera para hacer un SEP confiable se debe lograr el buen funcionamiento de todas sus zonas.

En el contexto de confiabilidad, generación, transmisión y distribución son referidas como zonas funcionales y sus evaluaciones de confiabilidad son usualmente realizadas separadamente. También se realizan evaluaciones combinadas, como generación y transmisión, llamadas evaluación de sistema a granel. En las evaluaciones de confiabilidad de sistemas de generación, la capacidad de las plantas generadoras es examinada con el fin de analizar cuantas horas al año el sistema debe de cortar carga y cuantos MWh al año no serán suministrados en el sistema debido a una inadecuada generación. En esta evaluación se calculan también, números esperados de interrupciones y de minutos de interrupción. Por otro lado, la evaluación de confiabilidad de un sistema de distribución tiene un enfoque hacia los clientes, se busca analizar el impacto que puede tener en ellos cada una de las probables fallas.

1.1.1 CONFIABILIDAD DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Tradicionalmente, los sistemas de generación y transmisión han recibido mayor atención que los sistemas de distribución, en cuanto al modelado y evaluación de la confiabilidad se refiere [6-9]. Esto se ha dado debido a que fallas en generación o transmisión puede tener severas consecuencias para los clientes y el medio ambiente. En cambio, fallas en sistemas de distribución no son tan severas, ya que sólo ocasionan pérdidas del suministro en puntos aislados del consumo. Sin embargo, análisis de estadísticas de fallas muestran que el sistema de distribución representa la mayor contribución a la indisponibilidad del suministro al cliente [10-12], esto debido a la proximidad que hay entre ambos y a que la mayoría de las fallas del sistema de potencia ocurren a nivel distribución. En la referencia [13] se dice que el 90% de los problemas relacionados con la confiabilidad del cliente son debidos al sistema de distribución. Por ello es que en las últimas décadas se ha dado una mayor importancia al modelado y a la evaluación de la confiabilidad en sistemas de distribución.

La confiabilidad en distribución se enfoca en los puntos carga. Las evaluaciones se realizan para predecir el número de horas y cortes que se espera tengan los clientes al año. De esta forma al realizar una evaluación se consigue clasificar las zonas de acuerdo a su confiabilidad. Pero que una zona, alimentador o sistema sea más o menos confiable que otro va depender de muchos factores, como son:

- El área geográfica en la que se encuentra.
- La frecuencia de mantenimiento que se le da a sus componentes.
- El tipo de sistema (aérea o subterránea).
- Su topología.
- La carga.
- La ubicación de los dispositivos de desconexión.

Todos estos factores son considerados cuando se planea una red con cierta confiabilidad. Sin embargo, cuando se toma una elección surge un factor que es el que domina, el costo.

Una red se puede hacer muy confiable pero esto implica que la compañía tenga que realizar una mayor inversión, si esta alta confiabilidad no es remunerada de alguna manera, la compañía terminará por planear una red menos confiable, ya que llevará a tener una menor inversión. Aquí es cuando surge uno de los problemas más difíciles que enfrentan los responsables de la planificación de los sistemas de suministro eléctrico, el decidir hasta qué punto está justificado el aumento de la inversión para mejorar la confiabilidad del servicio. Para ello se debe considerar a parte de los costos de la compañía, los costos debido a las fallas.

El valor del costo por fallas puede variar en forma importante, dependiendo principalmente de los siguientes factores:

1. Magnitud de la falla.
2. La duración de la interrupción.
3. El tipo de usuario afectado.
4. La frecuencia de las interrupciones.
5. El nivel afectado dentro del sistema (baja, media o alta tensión).
6. La hora, día y estación en que ocurre la falla.

1.1.1.1 UBICACIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE DESCONEXIÓN EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Uno de los factores que influyen directamente en la confiabilidad del sistema de distribución es la ubicación de los dispositivos de desconexión. Se puede obtener varios niveles de confiabilidad variando la combinación de estos componentes en el sistema. Obviamente, con más de estos componentes puestos en el sistema hará que la inversión de la compañía sea mayor, sin embargo, no necesariamente hará que aumente la confiabilidad. Esto es porque puede haber dispositivos de desconexión de más o mal ubicados que no tengan ningún efecto en la confiabilidad del sistema. Así, estos dispositivos juegan un rol importante en la confiabilidad del sistema de distribución y por lo tanto la ubicación y selección de un adecuado número de estos componentes es un factor determinante en la planeación del sistema [14-16]. Por lo anterior surge un nuevo problema, el seleccionar y ubicar los dispositivos de desconexión en el sistema de distribución de manera que minimice el costo de la confiabilidad, los costos para proporcionar la confiabilidad y los costos incurridos asociados con interrupciones.

1.2 OBJETIVO

Utilizar un algoritmo genético para seleccionar y ubicar los dispositivos de desconexión en un sistema de distribución de manera que se optimice el costo de la confiabilidad.

1.3 JUSTIFICACIÓN

Confiabilidad en sistemas de distribución es uno de los temas más importantes en la industria de potencia eléctrica debido a su alto impacto sobre el costo de electricidad y su alta correlación con la satisfacción de los clientes [13]. Además, el 90% de los problemas relacionados con la confiabilidad del cliente son debidos al sistema de distribución, por lo que mejorar la confiabilidad en distribución es el camino para mejorar la confiabilidad del cliente. Así, realizar estudios que aborden este tema será siempre bien justificado.

Muchas compañías ubican los dispositivos de desconexión en los sistemas de distribución en base a su experiencia y a los datos del cliente [17,19]. Esto lleva muchas veces, como ya se explicó anteriormente, a que haya componentes de más o mal ubicados que provocan un gasto innecesario para las compañías suministradoras. Por ello, es importante implementar herramientas computacionales que ayuden a la planeación y a la toma de decisiones de la colocación de estos componentes. De esta manera se logrará un mejor manejo del sistema y un beneficio óptimo tanto para la compañía suministradora como para los clientes.

1.4 ESTADO DEL ARTE

El estado del arte se divide en tres partes, en la primera se presentan algunos de los trabajos relacionados con las técnicas de evaluación de confiabilidad en sistemas eléctricos de potencia (principalmente en distribución), en la segunda parte se muestran algunos de los trabajos relacionados a la optimización de la confiabilidad en redes de distribución y en la tercera parte se presentan los trabajos relacionados a esta tesis que se han realizado en Sección de estudios de posgrado e investigación (SEPI) del IPN.

1.4.1 TRABAJOS SOBRE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA

Los primeros trabajos que hubo sobre la confiabilidad en los sistemas eléctricos de potencia fueron en el área de generación, ya que como se explicó antes, era de gran interés conocer la capacidad de generación del sistema para poder satisfacer la carga total, y porque se pensaba que el sistema de distribución influía muy poco en la confiabilidad del sistema de potencia. Sin embargo, en 1964 en [19,20] se publican los dos primeros trabajos sobre el cálculo de la confiabilidad en sistemas de transmisión y distribución, a partir de aquí se incrementaron los estudios para mejorar las técnicas de evaluación de la confiabilidad en estas áreas.

Aunque se suele hacer estudios de confiabilidad de forma separada (generación, transmisión y distribución), existen trabajos como en [21-23] donde el análisis se realiza de manera conjunta en generación y transmisión. También se han hecho esfuerzos por

evaluar la confiabilidad considerando los impactos en todas las partes del sistema de potencia, como en [7,24].

El proceso de Markov es una de las técnicas más comunes empleadas en el análisis de la confiabilidad. En [25] se ilustra la aplicación de las cadenas de Markov en la confiabilidad de sistema de potencia. Sin embargo, este enfoque es limitado en la aplicación porque requiere mucho esfuerzo computacional y errores de redondeo que ocurren en la solución de grandes sistemas.

Entre los primeros trabajos realizados en la evaluación de la confiabilidad de redes de distribución, aparte de las mencionadas anteriormente, están [4,26,27]. El primero se desarrolló en 1975 e implementa ecuaciones que dan resultados muy cercanos a los que se obtienen con el enfoque de Markov, además desarrolla un modelo de clima de tres estados. El segundo presenta el enfoque de conjunto de cortes mínimos para el análisis de efectos y modos de falla, y muestra la manera en cómo podían calcularse los índices de confiabilidad empleando ecuaciones modificadas de [4]. Esta técnica tuvo gran aceptación debido a la simplicidad de su manejo y gran facilidad de programación computacional. El tercero presenta un enfoque para comparar la confiabilidad de diferentes diseños con acciones de conmutación, en él también aborda el enfoque de conjuntos de cortes mínimos.

Muchos de los trabajos utilizan un enfoque de la simulación secuencial de Monte Carlo para realizar la evaluación de confiabilidad en sistemas de potencia. En [28], lo utilizan para evaluar la confiabilidad de un sistema compuesto (generación y transmisión), lo relevante de este trabajo es que utilizan curvas de carga anuales para modelar cada bus del sistema. En [29], es un trabajo parecido pero obtienen además las densidades de probabilidad de los índices de confiabilidad del sistema. También se han realizado muchos trabajos con este enfoque en el área distribución, en [30] lo utilizan para obtener las densidades de probabilidad de los principales índices de confiabilidad en los puntos de carga y de los alimentadores. En [31,32] utilizan este enfoque para evaluar el costo debido a los cortes en la red. También se ha utilizado el enfoque de Monte Carlo para abordar la programación del mantenimiento de unidades generadoras, como es el caso de [33], donde además utilizan un Algoritmo Genético.

A lo largo de la historia se han desarrollado también libros de suma importancia donde se aborda el modelado de la confiabilidad en sistemas eléctricos de potencia, como en [10,34]. Sin embargo, estos libros abordan de forma muy breve la confiabilidad en redes de distribución.

En [13] se muestra un libro desarrollado por Richard E. Brown en 2009, donde aborda todo lo relacionado con la confiabilidad en redes de distribución, como son los índices utilizados para medir la confiabilidad, las principales causas de las interrupciones, el modelado de los componentes, las principales técnicas que se utilizan para la evaluación, ejemplos reales y hasta la optimización aplicada a la confiabilidad. Además, aborda como

afecta la generación distribuida y el envejecimiento de los componentes a la confiabilidad de la red de distribución.

En [35] se muestra un libro de la IEEE desarrollado por Ali. A. Chowdhury y Don O. Koval en 2009, en él abordan de manera extensa la confiabilidad en redes de distribución. Muestran algunos de los métodos utilizados para realizar la evaluación y los modelos para evaluar el costo por interrupción a los clientes.

Aunque la mayoría de los trabajos concernientes a la confiabilidad abordan las metodologías para la evaluación, hay también trabajos interesantes acerca del modelado de la confiabilidad de los componentes que integran una red de confiabilidad. En [36] se modela la confiabilidad de los componentes, estiman probabilidades de falla y tasas de falla a partir de estadísticas, además toman en cuenta pruebas de envejecimiento y de degradación. En [37], modelan la confiabilidad de los componentes basados en las condiciones de operación de tiempo real, realizan modelos lineales, cuadráticos e hiperbólicos.

Otros trabajos han realizado estudios de confiabilidad tomando en cuenta las condiciones de operación en tiempo real del sistema de potencia, como en [38], donde obtiene niveles de confiabilidad en estados de falla o en modos de operación especiales. En [39], evalúan la confiabilidad de un sistema de potencia basado sobre su estado de mantenimiento.

1.4.2 TRABAJOS SOBRE LA OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Uno de los problemas de optimización en redes de distribución es el de ubicar los dispositivos de desconexión de tal forma que nos maximicen la confiabilidad y nos minimicen los costos. En [40], proporciona cuatro reglas para localizar dispositivos de protección en orden para mejorar la confiabilidad. Se utiliza lógica difusa y algoritmos genéticos en [17,18] y simulación templada en [20] para determinar la localización óptima de las cuchillas. En [41,42] también consideran el problema de localización de cuchillas.

En [43], se utiliza programación entera, simulación templada, algoritmos genéticos y métodos híbridos para ubicar de manera óptima los dispositivos de protección y las cuchillas. Compara estos cuatro métodos y demuestra que los métodos híbridos entregan mejores resultados.

Los algoritmos de optimización son también utilizados para la planeación de redes de distribución. En [44], se presenta un modelo para resolver los problemas de dimensionamiento y ubicación óptima de subestaciones y alimentadores, para ello utilizan algoritmos genéticos. En [45] utilizan algoritmos evolucionarios para minimizar los costos de expansión del sistema de distribución, logran la localización y el dimensionamiento óptimo de futuros alimentadores y subestaciones.

1.4.3 TRABAJOS RELACIONADOS DESARROLLADOS EN LA SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN DEL IPN

En 1997 en [46], se utiliza un algoritmo genético para determinar el número de líneas de transmisión en paralelo necesarias para maximizar la confiabilidad sujeta a una restricción de costo, incluyendo incertidumbre de la tasa de falla.

En 2001 en [47], se desarrolla una metodología híbrida que optimiza la confiabilidad de sistemas compuestos (generación-transmisión). Se determina el número óptimo de componentes y asignación de compensación en derivación en nodos de carga de la red necesarios para maximizar la confiabilidad sujeta a restricciones de costo, se considera además condiciones de seguridad en estado estacionario.

En 2002 en [48], se presenta una metodología para la evaluación del costo esperado por fallas en redes de transmisión, se basa en el concepto de energía no suministrada, tanto del lado del distribuidor como del generador.

En 2003 en [49], se utiliza la técnica de búsqueda directa y de búsqueda de bisección para determinar el número óptimo de dispositivos de desconexión en sistemas de distribución radial, así como su localización. Se utiliza la metodología de cortes mínimos para considerar las contingencias.

En 2004 en [50], se desarrolla una técnica enumerativa incorporada a una técnica de búsqueda directa para seleccionar de manera óptima las cuchillas y restauradores en redes de distribución.

En 2007 en [51], se utilizan algoritmos genéticos para seleccionar de manera óptima dispositivos de seccionamiento en redes de distribución radial. Se optimiza en este trabajo el costo total (costo de la compañía y costo del cliente debido a los cortes).

En 2011 en [52], se presenta una metodología para el mejoramiento de la confiabilidad de redes de distribución. Se utiliza una simulación no secuencial de Monte Carlo y el Software SynerGEE Electric 3.8.3 para realizar el análisis de confiabilidad de la red de distribución. Se propone la ubicación de restauradores y de cuchillas en las zonas menos confiables.

1.5 APORTACIONES DE LA TESIS

Se desarrolló un programa en lenguaje de programación Fortran 90 para realizar la evaluación de la confiabilidad de redes de distribución radiales. Para ello se utilizaron dos metodologías, la simulación de Monte Carlo y la simulación Analítica.

Para la ubicación óptima de los dispositivos de desconexión en un sistema de distribución se desarrolló un programa en lenguaje de programación Fortran 90, empleando dos algoritmos de optimización, el genético y el de búsqueda local.

1.6 ESTRUCTURA DEL TRABAJO DE TESIS

En esta sección se presenta de forma breve el contenido de cada uno de los capítulos y anexos que conforman este trabajo.

Capítulo 1.

Este capítulo presenta los aspectos generales de la confiabilidad de redes de distribución, se expone el objetivo y se justifica el desarrollo de este trabajo. Se muestra un breve estado del arte acerca de los trabajos que se han realizado sobre las metodologías para evaluar la confiabilidad de sistemas de potencia, principalmente a nivel distribución, y se presentan también algunos de los trabajos más relevantes sobre la optimización de la confiabilidad. Finalmente se describen las aportaciones.

Capítulo 2.

Este capítulo aborda la evaluación de la confiabilidad en redes de distribución. Se da una breve revisión de las principales metodologías que han sido utilizadas. Posteriormente se abordan de manera completa las dos simulaciones utilizadas en este trabajo, la secuencial de Monte Carlo y la Analítica. Finalmente se presenta la metodología propuesta para realizar la evaluación de la confiabilidad de redes de distribución.

Capítulo 3.

Este capítulo presenta la optimización del costo de la confiabilidad. Se describe primero las formulaciones de optimización que son utilizadas en este trabajo. Se abordan posteriormente los métodos para resolver el problema de optimización discreta, se explica de forma amplia el algoritmo de búsqueda local y el algoritmo genético simple para resolver el problema de ubicar y seleccionar de forma óptima los dispositivos de desconexión en un sistema de distribución.

Capítulo 4.

Este capítulo presenta los resultados obtenidos de la optimización del costo de la confiabilidad. Se muestra primero las simulaciones realizadas con un alimentador prueba de la IEEE [1], posteriormente se presentan las simulaciones realizadas con un alimentador real de 23kV [2].

Capítulo 5.

Este capítulo presenta los trabajos futuros y las conclusiones obtenidas.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

ANEXO A.

En este apartado se presenta los principales índices utilizados para medir la confiabilidad en sistemas de distribución. También se aborda el cálculo de la energía y la potencia no suministrada, los cuales son utilizados para obtener el costo debido a cortes.

ANEXO B

En este apartado se presentan las simulaciones y los resultados de la evaluación de la confiabilidad de sistemas de distribución utilizando la metodología propuesta en el capítulo 2.

ANEXO C.

En este apartado se presenta los datos del alimentador real de 23kV utilizado para la realización de las pruebas.

ANEXO D.

En este apartado presenta el programa desarrollado para la selección y ubicación óptima de los dispositivos de desconexión en sistemas de distribución. Se describe los archivos de datos que hay que introducir, la estructura del programa y el código fuente. En este apartado también se aborda el programa de confiabilidad desarrollado.

CAPÍTULO 2: EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

La confiabilidad en general se define como la probabilidad de que un sistema o componente realice su función adecuadamente por un periodo de tiempo previsto y bajo ciertas condiciones [10,34]. En redes de distribución cuando se realiza una evaluación de confiabilidad no solo se basa en los tiempos en que falla cada componente, sino también en tiempos en que son reparadas las fallas y el impacto que tienen éstas sobre la red. Se enfoca principalmente en predecir el número de cortes y el tiempo de corte que puede esperar cada cliente al año, aunque existen métodos más sofisticados que predicen interrupciones momentáneas, número de operaciones de los dispositivos de protección y caídas de tensión.

Las funciones principales o los usos que se le dan a la evaluación de la confiabilidad pueden ser [13]:

- Diseñar nuevos sistemas que cumplan con cierta confiabilidad.
- Localizar las zonas con poca confiabilidad en un sistema existente.
- Probar la efectividad de los proyectos de mejora de confiabilidad.
- Determinar el impacto en la confiabilidad ante la expansión del sistema.
- Diseño de sistemas que pueden ofrecer diferentes niveles de confiabilidad.

En la siguiente sección del capítulo se aborda de manera breve el modelado de los componentes de la red de distribución para el análisis de la confiabilidad. Después, se aborda a fondo los dos métodos (simulación analítica y de Monte Carlo) utilizados en el trabajo para realizar la evaluación. Al final del capítulo se muestra la metodología propuesta.

2.2 MODELADO DE LA CONFIABILIDAD DE LOS COMPONENTES

Una red de distribución puede estar compuesta por muchos componentes, como líneas, cables, buses, transformadores, interruptores, restauradores, fusibles, cuchillas, entre otros. Cada uno de estos componentes tiene una función específica para el buen

funcionamiento de la red y en el caso de algunos para tener una buena respuesta ante una contingencia. Cuando se realiza el análisis de confiabilidad, cada uno de estos componentes además de ser visto como un componente que cumple una función en la red, es visto también como un conjunto de parámetros que describen su información de confiabilidad. Los parámetros más importantes para modelar los componentes para la evaluación de confiabilidad son [27]:

- **Tasa de falla permanente:** Describe el número de veces por año que se espera que el componente sufra una falla permanente. Esta dada en No. de fallas/año.
- **Tiempo medio de reparación:** Describe el tiempo que se espera esté el componente fuera de operación si falla. Esta dado en horas.
- **Tasa de mantenimiento:** Describe el número de veces por año que se espera que el componente este en mantenimiento. Esta dada en No. de ocurrencias/año.
- **Tiempo medio de mantenimiento:** Describe el tiempo en que se espera esté el componente fuera de operación si entra a mantenimiento. Esta dado en horas.
- **Tasa de falla momentánea:** Describe el número de veces por año que se espera que el componente sufra una falla momentánea. Esta dado en No. de fallas/año.
- **Tiempo medio de conmutación:** Describe el tiempo esperado en que conmutara la cuchilla después de que una falla ocurre en el sistema. Esta dado en horas.
- **Probabilidad de falla operacional:** Describe la probabilidad condicional que un dispositivo no operé si esta supuesto a operar.

Estos parámetros son obtenidos a partir de estadísticas, de llevar un registro de los acontecimientos, como: las veces que falla cada uno de los componentes de la red, qué tipo de fallas ocurren (momentánea o sostenida), la frecuencia con que se les da mantenimiento a cada uno de los componentes, los tiempos en que son reparadas las fallas en los componentes, los tiempos en que son restaurados los usuarios, etc. A partir de este registro no sólo se pueden obtener valores esperados para modelar a los componentes, sino también sus densidades de probabilidad y probabilidades de falla a través del tiempo, como se realiza y analiza en [36,53,54], lo que lleva a que cada parámetro pueda ser tratado como una variable aleatoria que sigue cierto comportamiento probabilístico. Sin embargo, dependiendo el método que sea utilizado para realizar la evaluación, será la forma en que se representen estos parámetros.

Muchas veces cuando se realiza la evaluación y sobre todo cuando se utilizan métodos analíticos, estos parámetros son representados como constantes que describen valores esperados o medias. Sin embargo, esto no describe del todo sus comportamientos, ya que tienen un comportamiento estocástico, es decir, que los valores de los parámetros no siempre serán los valores esperados, sino que pueden resultar en valores más chicos o grandes. La mejor forma de representarlos y que normalmente se utiliza en las simulaciones de Monte Carlo son como variables aleatorias, de esta forma no solo se pueden obtener valores esperados si no también varianzas, desviaciones estándar y otras medidas estadísticas que dan una mejor descripción de los parámetros y por lo tanto un mejor modelado del componente. Algunas de las funciones de probabilidad más utilizadas

para modelar los componentes y en general para análisis de confiabilidad pueden ser vistas con más detalle en la referencia [13].

2.3 MÉTODOS PARA REALIZAR LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

Para la evaluación de la confiabilidad de sistemas de potencia existen métodos analíticos y de simulación. Los primeros están basados en los procesos continuos de Markov [10,25,55], donde representan el sistema por modelos matemáticos y a partir de estos evalúan los índices de confiabilidad usando soluciones matemáticas. Sin embargo, el análisis de contingencias es más complicado aun cuando se utilizan sistemas pequeños y el nivel de complejidad aumenta rápidamente como aumenta el tamaño del sistema [30]. Estos métodos analíticos son utilizados para obtener valores esperados de los índices de confiabilidad en los puntos de carga o en ciertos componentes del sistema.

Los segundos, los métodos o técnicas de simulación, se refieren principalmente a las simulaciones de Monte Carlo [30-32,56], éstas utilizan generadores de números aleatorios para representar eventos estocásticos a partir de información de confiabilidad del sistema. Con estas simulaciones no solo se puede obtener los valores esperados de los índices de confiabilidad de los componentes de la red, sino también sus distribuciones de probabilidad, así como información importante de eventos del sistema que con los métodos analíticos no puede ser obtenida, como son el número esperado de operaciones de ciertos dispositivos de protección o densidades de probabilidad de los índices de confiabilidad.

Existen otro tipo de simulaciones que evalúan la confiabilidad a partir de la topología del sistema, observando cómo impacta al sistema cada una de las posibles contingencias. Estas simulaciones son referidas como analíticas [13], las cuales obtienen valores esperados como resultado. Entre otras metodologías comunes para evaluar la confiabilidad en redes de distribución se encuentran [19,57]: método de la probabilidad condicional, método de cortes mínimos, métodos de conexiones mínimas, método de la matriz de conexión y árbol de eventos.

2.3.1 SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

La simulación de Monte Carlo puede asimilarse a un experimento real si se describe exactamente o de forma satisfactoria el sistema o evento que se va analizar, por ello, se debe tener la mayor información posible para introducir los datos de la forma más representativa. Así como ocurre en la vida real donde los componentes que fallan en una red de distribución varían año con año variando también sus índices de confiabilidad, también ocurre con la simulación de Monte Carlo, donde se obtendrán dos resultados diferentes al simular dos veces un año la misma red con los mismos datos, esto debido a la

naturaleza estocástica de los eventos involucrados. Esta variación aunque puede parecer mala en realidad es de gran ayuda porque a partir de esto se pueden obtener las densidades de probabilidad de los eventos. Debido a lo mencionado anteriormente se suelen simular muchas veces un año con los mismos datos, de esta forma se cubre la mayoría de los posibles eventos, al final los índices de confiabilidad se obtienen realizando un promedio, de esta forma se tienen resultados más representativos.

La forma de realizar la simulación de Monte Carlo puede variar de trabajo a trabajo y aunque se pueden dividir en No secuencial y en secuencial, las formas de aplicarlas pueden variar, por ejemplo en [13] y [30] la forma en que explican una simulación secuencial es diferente. Sin embargo, se puede decir que una simulación no secuencial evalúa los eventos sin llevar una secuencia en el tiempo, por lo que su carga computacional es más pequeña que una simulación secuencial, donde va generando los eventos conforme avanza en el tiempo. La base para la implementación de estas simulaciones es mediante la generación de números aleatorios, los cuales sirven para representar los eventos estocásticos.

La simulación de Monte Carlo puede fácilmente modelar el comportamiento de un sistema complejo como son eventos no exclusivos, fallas en cascada y probabilidades condicionales. La simulación secuencial comparada con la no secuencial tiene varias desventajas como son la intensidad computacional y la complejidad de aplicación.

2.3.1.1 GENERADORES DE NÚMEROS ALEATORIOS

Los generadores de números aleatorios más usado son los congruenciales, los cuales generan números aleatorios con densidad uniforme y con valores entre cero y uno. Se caracteriza por tres parámetros y genera cada nuevo número a partir del número anterior generado. El primer número es llamado semilla y comúnmente en los lenguajes de programación o en los algoritmos de las hojas de cálculo es asignado basado en el la hora actual. Con una misma semilla se generará la misma secuencia de números aleatorios, esto es útil para tener el control de pruebas y resultados. Las dos ecuaciones utilizadas en los generadores congruenciales son [13]:

$$h_{i+1} = [P1_r * x_i + P3_r] \text{mod } P2_r \quad 2.1$$

$$n_{a_i} = \frac{h_i}{P2_r} \quad 2.2$$

Dónde:

$P1_r$ =Entero no negativo llamado multiplicador

$P2_r$ =Entero no negativo llamado modulo

$P3_r$ =entero no negativo llamado incrementador

h_0 =Semilla

n_{a_i} = número aleatorio uniforme generado entre 0 y 1

La notación modulo, $a \bmod b$, se refiere al residuo del cociente de a y b .

La mayoría de los lenguajes de programación como Fortran, MATLAB y C++ tienen subrutinas o funciones para generar números aleatorios uniformes entre cero y uno. Sin embargo, cuando se modelan variables aleatorias con otra densidad se debe de hacer a partir de estos números uniformes generados. Existen algunos métodos para obtener diferentes densidades a partir de la uniforme y pueden ser vistos con detalle en la referencia [58]. Por ejemplo, para obtener una variable con densidad normal se utiliza el teorema del límite central y para obtener variables con densidad exponencial se utiliza la transformación inversa. Este último solo se utiliza con funciones que tienen inversa y se apoya del hecho de que la función de distribución siempre está entre cero y uno.

2.3.1.2 SIMULACIÓN NO SECUENCIAL DE MONTE CARLO

Una simulación no secuencial de Monte Carlo se puede utilizar si las contingencias son mutuamente exclusivas y el comportamiento del sistema no depende sobre eventos pasados. Esta simulación no genera contingencias en orden de ocurrencia, es decir, en orden de aparición en el tiempo, por lo que tiende a tener una carga computacional mucho menor que la secuencial debido a que solo un porcentaje pequeño de cada periodo de simulación es actualmente simulado y toma en cuenta reglas más simples de contingencias. El procedimiento de esta simulación puede ser descrito por los siguientes pasos [13]:

1. Generar un número aleatorio para la contingencia.
2. A partir del número aleatorio generado y de la función de probabilidad de la contingencia obtener el número de veces que ocurre la falla en el tiempo de simulación establecido.
3. Si la contingencia ocurre una o más veces, evaluar el impacto que tiene en la red de distribución.
4. ¿Es la última contingencia? Sí, entregar resultados. No, seleccionar otra contingencia y regresar al paso 1.

Como se puede ver en los pasos anteriores se requiere evaluar el impacto que tienen las contingencias que ocurren una o más veces, esto no se puede hacer con la simulación de Monte Carlo por lo que se requiere utilizar otro método que proporcione los componentes que son afectados por las contingencias.

2.3.1.3 SIMULACIÓN SECUENCIAL DE MONTE CARLO

La simulación secuencial de Monte Carlo se realiza precisamente como ocurre en la realidad, genera eventos aleatorios conforme se avanza en el tiempo. En diversos

trabajos la forma en que aplican y describen esta simulación varia, sin embargo, en todos siempre se genera los eventos siguiendo una secuencia en el tiempo. En [13], por ejemplo, el periodo de tiempo de simulación se parte en pequeños pedazos; empieza la simulación con el primer pedazo teniendo cierta probabilidad de que ocurra alguna contingencia, cada pedazo de tiempo es simulado en secuencia para identificar nuevas contingencias. Obviamente si se avanza en el tiempo y no ha ocurrido una falla va aumentando la probabilidad de falla en los pedazos posteriores, esto se puede ver con más detalle en dicha referencia. En la sección siguiente se presenta con detalle otra forma de aplicar la simulación secuencial de Monte Carlo.

2.3.1.3.1 SIMULACIÓN SECUENCIAL DE MONTE CARLO APLICADO A LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

Esta simulación se basa en crear una historia artificial-real de operación para cada componente, para lo cual los representa mediante dos estados: Operando y No operando. Cuando el componente está operando y falla o entra en mantenimiento cambia de estado, al terminar el mantenimiento o reparar la falla regresa al estado de operación. En la figura 2.1 se muestra el diagrama de los estados y transiciones del componente.

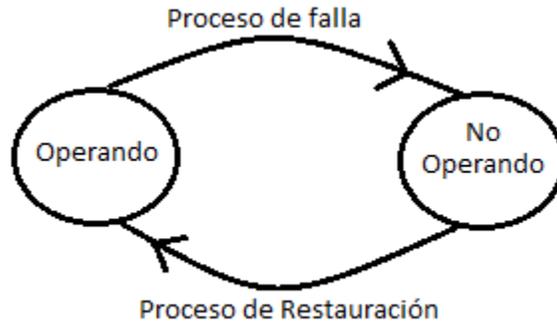


Figura 2.1 Diagrama de estados y transiciones del componente [30].

El modo de generar las historias de operación para cada componente es mediante la generación de números aleatorios y utilizando sus datos de confiabilidad (tasa de falla y tiempo medio de reparación). A partir de éstos se obtienen los tiempos en que los componentes están en un estado u otro. Al el tiempo durante el cual el componente permanece en el estado de operación es llamado tiempo a la falla (TTF) o tiempo de falla (FT) y el tiempo en el cual el componente permanece en el estado de no operación es llamado tiempo de reparación (TTR) [30]. En la figura 2.2 se muestra la historia creada para un componente en donde se pueden apreciar los tiempos de falla y los tiempos de reparación.

Estos tiempos de falla y de reparación son variables aleatorias que pueden seguir densidades de probabilidad diferentes. En este trabajo se modelan con densidades

exponenciales ya que su probabilidad de ocurrencia no varía conforme se avanza en el tiempo. Para obtener esta densidad de probabilidad a partir de generar números aleatorios con densidad uniforme entre cero y uno, y de utilizar los datos de confiabilidad de cada componente, se utiliza el método de transformación inversa y se obtienen las siguientes ecuaciones [30,32]:

$$FT = -\frac{\ln(n_a)}{\lambda_c} * 8760 \quad 2.3$$

$$TTR = -\ln(n_a) * r_c \quad 2.4$$

Dónde:

n_a = Número aleatorio con densidad uniforme entre cero y uno.

λ_c = Tasa individual de falla del componente [fallas-año].

r_c = Tiempo medio de reparación individual del componente[horas].

FT= Tiempo de falla [horas].

TTR= Tiempo de reparación [horas].

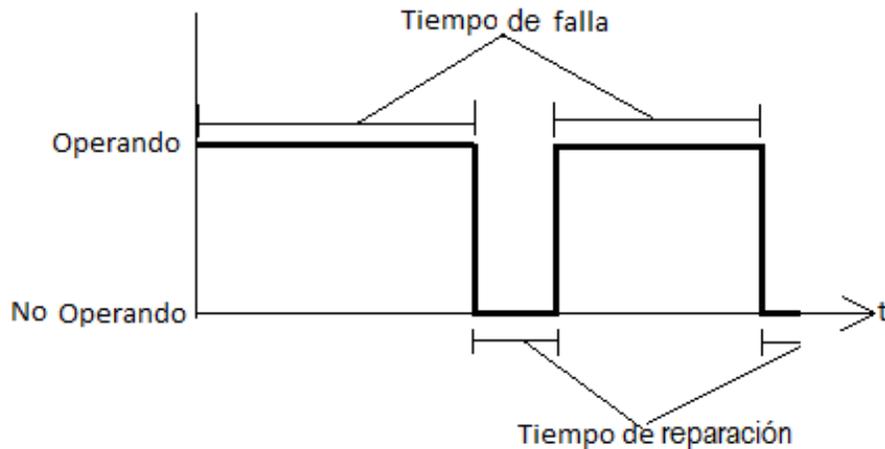


Figura 2.2 Historia de operación de un componente [30].

Una vez que se forman las historias de operación de cada uno de los componentes de la red de distribución, se puede obtener toda la información para realizar la evaluación de confiabilidad, como cuáles componentes fallan, en qué momento fallan, duración de cada una de las fallas e incluso se puede saber cuándo fallan dos o más componentes al mismo tiempo. Por ejemplo en la figura 2.3, en la parte de arriba se muestra las historias de operación de cuatro componentes (señalados con el prefijo "C") de una red distribución antes de realizar la evaluación, se observa que la secuencia de fallas será C1-C3-C2-C1-C4, y conforme se avance en el tiempo se puede seguir observando la secuencia. También se observa que cuando falla C2 por primera vez, durante su reparación falla C1 y durante la

reparación de este último falla C4. De esta forma es como se puede obtener y visualizar la secuencia de falla en los componentes.

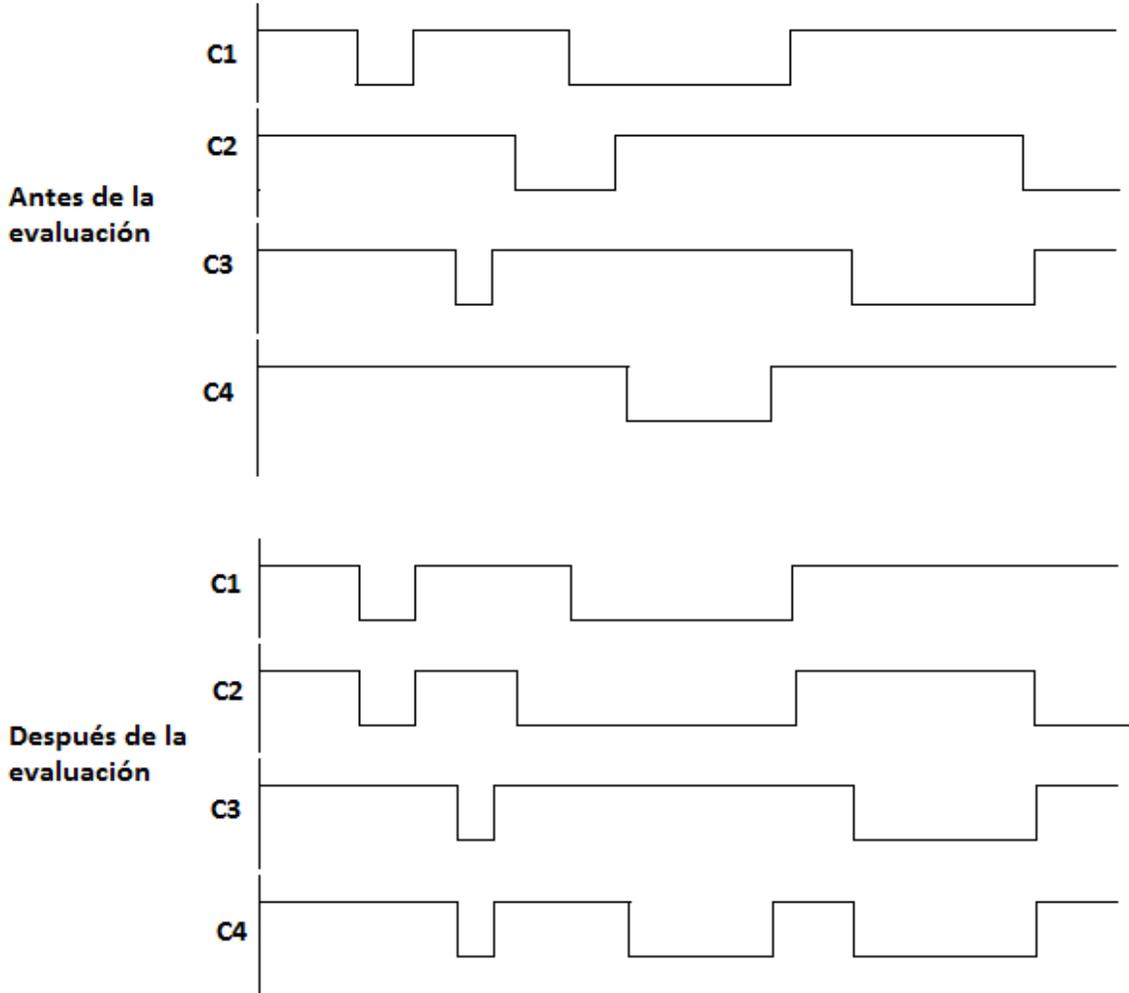


Figura 2.3. Historias de operación de los componentes antes y después de la evaluación de confiabilidad.

Estas historias de operación creadas para los componentes antes de la evaluación de la confiabilidad son vistas independientemente, es decir, cuando todavía no están conectados entre sí para crear la red de distribución. Cuando ya son vistos los componentes como una red, obviamente sus historias de operación cambiarán debido a que si falla algún componente puede afectar a la operación de otros componentes. Estas nuevas historias de operación se obtienen después de realizar la evaluación de la confiabilidad de la red; cuando se analiza que componentes fallan dentro del periodo establecido y cómo afectan estas fallas a la red. En la figura 2.3, se muestra las historias de operación de 4 componentes antes y después de realizar la evaluación de confiabilidad de una red de distribución. En este caso, se observa que el componente 1 afecta al

componente 2, y el componente 3 afecta al componente 4, es decir, que cuando deja de operar el componente 1 también lo hace el componente 2, y cuando deja de operar el componente 3 también lo hace el componente 4, por lo que las historias de operación de los componentes 2 y 4 cambian.

A partir de estas historias de operación obtenidas después de la evaluación se busca encontrar tasas de fallas, tiempos medios de reparación e indisponibilidad de los componentes que representen la confiabilidad de la red, para ello se utilizan las siguientes ecuaciones [30]:

$$\lambda_j = \frac{Nf_j}{\sum FT_j} \quad 2.5$$

$$r_j = \frac{\sum tr_j}{Nf_j} \quad 2.6$$

$$U_j = \frac{\sum TTR_j}{\sum FT_j + \sum TTR_j} \quad 2.7$$

Dónde:

λ_j = Tasa de falla del componente j [fallas-año].

r_j = Tiempo medio de reparación del componente j [horas].

U_j = Indisponibilidad del componente j [horas-año]

Nf_j = Número de cortes de energía en el componente j durante los años muestreados.

$\sum TTR_j$ = Sumatoria de los tiempos de No operación del componente j durante los años muestreados [horas].

$\sum FT_j$ =Sumatoria de los tiempos de Operación del componente j durante los años muestreados [horas].

Las ecuaciones 2.5, 2.6 y 2.7 proporcionan los valores esperados de los principales índices de confiabilidad. El primero indica el número de veces al año que se espera el componente sufra un corte de energía, el segundo indica el tiempo que se espera el componente sea restablecido si sufre un corte de energía y el último indica las horas que se espera el componente este sin energía al año. Sin embargo, esto no proporciona la información completa, por lo que es mejor obtener las densidades de probabilidad de dichos índices. Para determinar la densidad de probabilidad de la tasa de falla y de la indisponibilidad de los componentes se utilizan las siguientes ecuaciones [30]:

$$s(k) = \frac{n(k)}{N}, \quad k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad 2.8$$

$$q(i) = \frac{m(i)}{M}, \quad i = 1, 2, 3, 4, \dots \quad 2.9$$

Dónde:

k = número de cortes que sufre un componente en un año.

$n(k)$ = número de años que el componente sufre k cortes.

N = número de años muestreados.

$s(k)$ = probabilidad de que el componente sufra k cortes en un año.

i = duración de corte que sufre el componente.

$m(i)$ = número de fallas con duración de corte entre $i-1$ e i .

M = total de fallas en los años muestreados.

$q(i)$ = probabilidad de que un corte en el componente dure entre $i-1$ e i .

También para el análisis y al tratarse de redes de distribución interesa obtener los índices de usuarios como son SAIFI, SAIDI, CAIDI, MAIFI Y ENS. Por lo que en el anexo A se aborda más afondo sus significados y la forma en que son obtenidos.

El procedimiento completo para realizar la evaluación de confiabilidad de redes de distribución usando la simulación secuencial de Monte Carlo descrita en esta sección se puede resumir con los siguientes pasos [30,32]:

1. Introducir los datos y el número de años a simular.
2. La simulación comienza con $N=1$ (con el primer año).
3. Generar un número aleatorio entre cero y uno para cada uno de los componentes que forman la red de distribución y convertirlos en sus tiempos de falla FT utilizando la fórmula 2.3.
4. Obtener el componente con el menor tiempo de falla. Este será el componente fallado.
5. Generar un número aleatorio entre cero y uno, y convertirlo en el tiempo de reparación del componente fallado utilizando la fórmula 2.4.
6. Generar un número aleatorio entre cero y uno, y convertirlo en el tiempo de conmutación del componente fallado utilizando una la fórmula similar a la 2.4.
7. Evaluar el impacto que tiene la falla en la red de distribución; realizar las modificaciones correspondientes como aumento de número de fallas y aumento de tiempo de corte.
8. Generar un número aleatorio entre cero y uno para el componente fallado y convertirlo en su nuevo tiempo de falla. Regresar al paso 4 si el tiempo de simulación es menor que un año.
9. Obtener el número de fallas que tuvo cada componente de la red en el año de simulación terminado.
10. Hacer $N=N+1$. Si " N " es menor o igual al número de años a simular regresar al paso 3.
11. Obtener los índices de confiabilidad con las formulas 2.5, 2.6 y 2.7, y las distribuciones de probabilidad con las ecuaciones 2.8 y 2.9.
12. Terminar.

Aunque se podría obtener resultados para todos los componentes de la red de distribución, en la mayoría de los análisis sólo interesa obtenerlos en los puntos de carga, ya que en ellos es donde se encuentran los usuarios. El tiempo de conmutación es utilizado para calcular las horas en que se realizarán posibles restauraciones, como se verá en secciones posteriores.

2.3.2 SIMULACIÓN ANALÍTICA

La simulación analítica evalúa la confiabilidad en base a observar cómo responde el sistema a cada una de las posibles contingencias, calculando el impacto que tienen en cada uno de los componentes. Los resultados en cada análisis de contingencia son ponderados de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de cada una de estas fallas. Al final, los valores esperados de los índices de confiabilidad para cada componente se obtienen sumando los resultados de cada análisis de contingencia [13].

La forma de observar cómo impacta una contingencia al sistema es siguiendo una serie de pasos como ocurre en la realidad. Primero se simula la respuesta de los dispositivos de protección, después se obtienen componentes afectados y por último se realiza, de ser posible, restauraciones.

Con esta simulación no se pueden obtener densidades de probabilidad de los índices de confiabilidad como sí lo hace la simulación de Monte Carlo, sin embargo, se pueden obtener otros resultados que son útiles para representar la confiabilidad en la red como son valores esperados de frecuencia de operación de cuchillas y de dispositivos de protección.

2.3.2.1 NAVEGACIÓN EN REDES RADIALES

Una red radial es aquella donde cada uno de sus componentes tiene un único camino a la fuente de energía y la dirección de los flujos de potencia siempre van alejándose de la fuente. Cuando uno o más componentes tienen más de un camino se les llama red débilmente mallada o mallada (dependiendo de qué tantos componentes tengan más de un camino a la fuente de energía) y sus flujos de potencia pueden ir en diferentes direcciones. Es por ello que las navegaciones en redes radiales son más fáciles que las de redes malladas.

Una de las partes más importante de la simulación analítica es realizar navegaciones en la red de distribución para encontrar uno o varios componentes que sirven para algún fin en el análisis. Entre las cosas que sonde interés en la navegación es encontrar: dispositivos de protección para simular su operación, componentes afectados por la contingencia, chuchillas normalmente abiertas y normalmente cerradas para realizar restauraciones,

entre otras. La forma de encontrar todos estos dispositivos y componentes en la red es mediante búsquedas aguas arriba (hacia la fuente de potencia) y aguas abajo (alejándose de la fuente de potencia). Estas serán descritas en el resto de la sección así como cosas importantes que hay que tomar en cuenta para poder implementar sus algoritmos.

2.3.2.1.1 RED DE DISTRIBUCIÓN RADIAL POR NIVELES

Para facilitar la navegación en una red radial se puede acomodar cada uno de los componentes que la integran por niveles [13,59]. El primer nivel lo conforman las fuentes de energía que en el caso de redes de distribución las representan los buses de las subestaciones, conforme los componentes se encuentren más alejados de estos buses estarán en niveles más altos, de esta forma cuando se requiera realizar una búsqueda de algún componente se puede hacer por niveles yendo hacia niveles más bajos en búsquedas aguas arriba o hacia niveles más altos en búsquedas aguas abajo. En la figura 2.4 se muestra una red de distribución sencilla acomodada por niveles, algo que se puede observar es que a diferencia de un estudio de flujos, aquí los nodos representan componentes y las ramas representan sus conexiones, además se cuentan como componentes los dispositivos de protección y las cuchillas normalmente cerradas; las chuchillas normalmente abiertas no se toman en la representación porque en sí no están en ningún nivel y solo interesa saber a qué componentes de la red están conectados. A partir de la red de distribución vista por niveles se puede obtener una matriz de componentes que será de ayuda para la implementación de algoritmos de búsqueda. En esta matriz el número de fila representará el nivel y sus localidades las representan los componentes que se encuentran en ésta, para la red de la figura 2.4 sería:

1	0	0	0
2	3	0	0
4	5	0	0
6	7	8	9
10	11	0	0
12	13	0	0
14	15	0	0
16	18	17	19
20	21	0	0
22	24	25	23
26	27	0	0
28	29	0	0

CAPÍTULO 2: EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE REDES DE DISTRIBUCIÓN

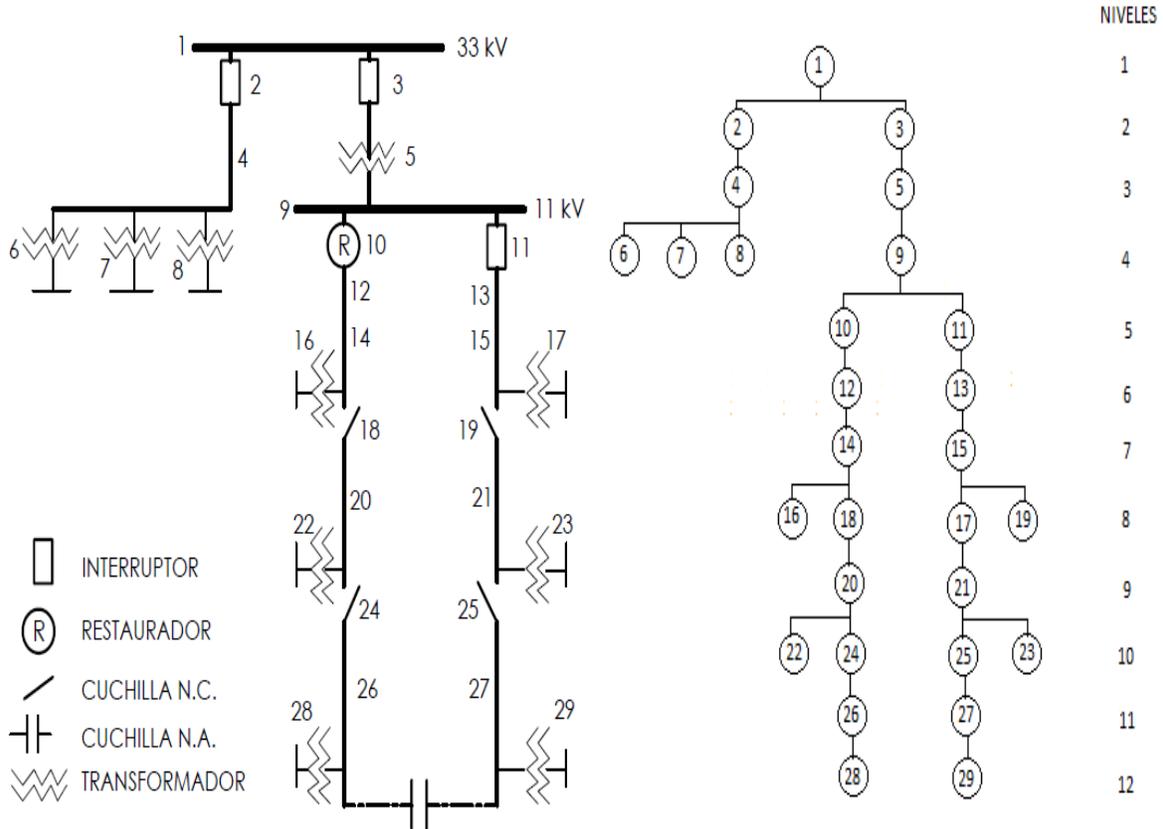


Figura 2.4. Red de distribución por niveles.

Además de obtener qué componentes se encuentran en cada nivel se debe también de saber cómo están conectados éstos entre sí. Al tratarse de una red radial, un nivel dado sólo tendrá conexión con el nivel anterior y posterior, a partir de esto se puede crear una matriz de conectividad que proporcione información de cómo están conectados los componentes de un nivel en relación al nivel anterior. Por ejemplo, para la red de la figura 2.4 sería:

0	0	0	0
1	1	0	0
1	2	0	0
1	1	1	2
4	4	0	0
1	2	0	0
1	2	0	0
1	1	2	2
2	3	0	0
1	1	2	2
2	3	0	0
1	2	0	0

La matriz anterior se forma de revisar la conectividad que hay con el nivel anterior. En la primera fila siempre serán ceros ya que representa el primer nivel y por lo tanto no tiene conectividad con un nivel anterior. En la fila 4 por ejemplo, los primeros tres valores son 1 ya que los elementos 6, 7 y 8 están conectados al primer componente del nivel 3 (componente 4) y la cuarta columna es 2 ya que su cuarto componente está conectado al segundo componente del nivel 3 (componente 5). De esta manera se puede llenar el resto de la matriz.

Con la creación de las matrices de niveles y de conectividad se puede de una manera compacta visualizar la topología de la red de distribución y obtener información necesaria para realizar la navegación en ésta. Como el fin de la navegación es encontrar uno o varios componentes específicos, se debe de identificar que representa cada componente, para ello se puede asociar a cada uno un subíndice. Por ejemplo, se puede especificar el número "3" para representar las líneas en la red, así todos los componentes que tengan este subíndice representarán líneas. Con las matrices y con la especificación de los subíndices se obtienen todos los datos necesarios para realizar las búsquedas en la red de distribución.

2.3.2.1.2 BÚSQUEDA AGUAS ARRIBA

Esta búsqueda se utiliza en la simulación analítica para encontrar: fuentes de energía, dispositivos de protección y cuchillas normalmente cerradas. La búsqueda se realiza hacia la fuente de energía y como en redes radiales cualquier componente donde se pueda iniciar la búsqueda sólo tendrá un único camino hacia ella, el algoritmo suele ser sencillo. La forma de realizar la búsqueda va depender de cómo se introducen los datos de la topología de la red, por lo que pueden variar los algoritmos de trabajo a trabajo, pero se pueden consultar en la referencia [59] un algoritmo común.

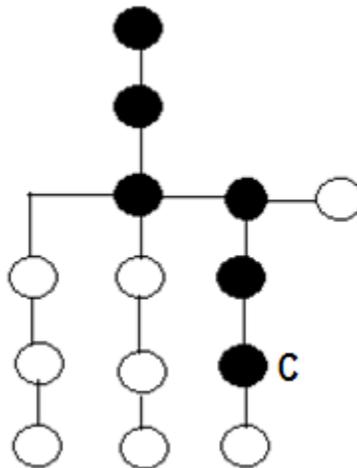


Figura 2.5 Búsqueda aguas arriba.

En la figura 2.5 se muestra una búsqueda aguas arriba en una red radial a partir de un componente "C". Todos los elementos rellenos representan los componentes encontrados. Si la red fuera mallada se tendría varios caminos para realizar la búsqueda por lo que sería más difícil implementarla.

El algoritmo para realizar esta búsqueda a partir de la creación de las dos matrices descritas en la sección anterior es [13,59]:

1. Introducir la matriz de niveles y la matriz de conectividad.
2. Introducir el componente "C" en el cual se inicia la búsqueda.
3. Localizar "C" en la matriz de niveles y obtener su nivel (fila) "N1" y su posición (columna) "P1".
4. Extraer el valor "V1" que se encuentra en la fila "N1" y en la columna "P1" en la matriz de conectividad.
5. Obtener el valor "V2" que se encuentra en la fila "N1-1" y en la columna "V1" en la matriz de niveles (este valor "V2" es el componente encontrado).
6. Si el criterio se ha cumplido, ir al paso 8.
7. Hacer $N1=N1-1$ y $P1=V1$ e ir al paso 4.
8. Terminar.

El algoritmo termina cuando se cumple un criterio, en el caso de la realización de la simulación analítica éste podrá ser cuando se haya encontrado algún dispositivo de protección, alguna cuchilla normalmente cerrada o algún bus de subestación.

2.3.2.1.3 BÚSQUEDA AGUAS ABAJO

Esta búsqueda se utiliza en la simulación analítica para encontrar: componentes afectados por la falla, puntos de carga, cuchillas normalmente cerradas para aislar la falla y cuchillas normalmente abiertas para restaurar componentes que se encuentran aguas abajo del componente fallado. Se realiza la búsqueda alejándose de la fuente de energía y a diferencia de la búsqueda aguas arriba de redes radiales, ésta puede tener varios caminos donde se realice la búsqueda, por lo que estos algoritmos de búsqueda son más complicados. Existen dos algoritmos comunes para realizar la búsqueda: recorrido profundo y recorrido amplio [13,59]. Sin embargo, puede variar la forma de realizar la búsqueda dependiendo de cómo se introduzcan los datos de la topología de la red.

En la figura 2.6 se muestra una búsqueda aguas abajo en una red radial a partir del componente "C". Todos los elementos rellenos representan los componentes encontrados en la búsqueda.

Para la implementación de este algoritmo de búsqueda a partir de la creación de las dos matrices descritas en la sección anterior se debe auxiliar de la creación de un vector "D", el cual sirve para realizar la búsqueda hacia varios caminos, y será del tamaño del número

de componentes máximos que hay en un nivel. El algoritmo de la búsqueda aguas abajo es [13,59]:

1. Introducir la matriz de niveles y la matriz de conectividad.
2. Introducir el componente "C" en el cual se iniciara la búsqueda.
3. Localizar "C" en la matriz de niveles y obtener su nivel (fila) "N1" y su posición (columna) "P1" en esta matriz.
4. Guardar "P1" en el vector "D".
5. Ir a la matriz de conectividad y hacer los siguientes pasos en cada uno de los elementos "V1" que están en la fila N1+1.
 - a. ¿El elemento "V1" es igual a algún componente del vector "D"? No, ir al paso "e". Sí, obtener su posición "P2".
 - b. Obtener el valor "V2" que se encuentra en el nivel "N1+1" y en la posición "P2" en la matriz de niveles (este valor "V2" es el componente encontrado).
 - c. Si el criterio se ha cumplido, ir al paso 9.
 - d. Guardar "P2" en un lugar disponible del vector auxiliar "D1".
 - e. ¿Son todos los elementos? No, escoger un nuevo elemento e ir al paso a. Sí, ir al siguiente paso.
6. Hacer los elementos del vector "D" igual a los elementos del vector "D1".
7. Igualar a cero todos los elementos de los vectores D1.
8. Hacer $N1=N1+1$ e ir al paso 5.
9. Terminar.

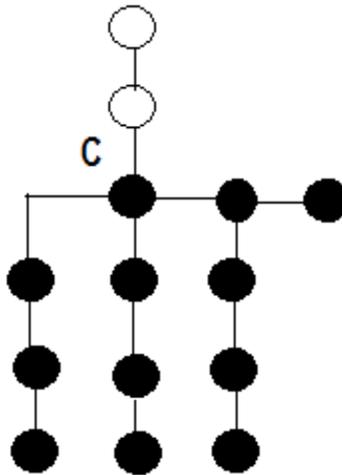


Figura 2.6 Búsqueda aguas abajo.

El algoritmo termina cuando se cumple un criterio y en el caso de la realización de la simulación analítica éste podrá ser cuando se haya encontrado los puntos de carga, alguna cuchilla o todos los componentes afectados.

2.3.2.2 SIMULACIÓN DE CONTINGENCIA

Una vez que una contingencia ocurre en una red de distribución se tiene que seguir una serie de complicados procesos, ya que cada contingencia puede afectar de muchas formas a muchos usuarios. Una misma falla puede resultar para algunos usuarios en una interrupción momentánea y para otros usuarios en una interrupción sostenida, esto dependiendo de la topología de la red, de los dispositivos de protección que haya en él, de cómo se operen las cuchillas para la restauración y del tiempo que se lleve en reparar la falla. Para que una simulación analítica contemple todas las situaciones y consecuencias que puedan tener los usuarios se debe de modelar una secuencia de eventos después de que ocurre una contingencia en la red de distribución. Esta secuencia es [13]:

1. **Contingencia.** Ocurre una falla en la red de distribución.
2. **Recierre.** Un restaurador abre para permitir que la falla desaparezca. Si desaparece, el restaurador cierra y la red de distribución opera de forma normal.
3. **Seccionalización Automática.** Seccionalizadores automáticos que ven la corriente de falla intentan aislar la falla mediante su apertura cuando la red es desenergizada por un dispositivo restaurador.
4. **Corte.** Si la falla es sostenida, un dispositivo de protección de sobre corriente como interruptor o fusible desaparece la falla. El dispositivo también puede ser aquel que es utilizado para la función de recierre.
5. **Conmutación automática.** Se restaura a los clientes de manera rápida mediante la apertura y el cierre de cuchillas automatizadas. Para ello se realizan restauración aguas arriba y aguas abajo.
6. **Conmutación manual.** Los clientes que no fueron restaurados con la conmutación automática son restaurados por la apertura y cierre de cuchillas no automatizadas, obviamente puede haber clientes que no puedan ser restaurados por ninguna de las dos. Esta al igual que la conmutación automática utiliza restauración aguas arriba y aguas abajo.
7. **Reparación.** La falla es reparada y la red se regresa a su estado de pre-falla.

2.3.2.3 RESPUESTA DE LOS DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

Una vez que una falla ocurre en el sistema, la respuesta de los dispositivos de protección inicia. Al tratarse de una red radial, los dispositivos de protección siempre se buscaran yendo hacia los buses de las subestaciones debido a que el flujo de potencia siempre va alejándose éstos.

En este trabajo se van a utilizar dos esquemas de protección. El primero se llama “**Restaurador-Fusible**” y el segundo “**Fusible-Restaurador**”. El utilizar uno u otro esquema tendrá una influencia directa con la confiabilidad de la red de distribución por lo que es importante entender la forma en que operan.

El esquema “Restaurador-Fusible” permite que las fallas temporales tengan oportunidad de ser liberadas, lo que lleva a una reducción de fallas sostenidas y de tiempos de corte de energía [13,60]. El procedimiento de este esquema puede ser descrito por el siguiente párrafo.

Después de que una falla ocurre en la red, se realiza una búsqueda aguas arriba del dispositivo de recierre (restaurador) más cercano del componente fallado. Si es encontrado, abre sin ningún retardo para darle oportunidad a la falla de desaparecer. Después de un pequeño retardo el dispositivo cierra. Si la falla persiste, el dispositivo puede operar otras cuantas veces para darle más oportunidades a la falla de desaparecer. Si la falla desaparece se toma como momentánea y la red vuelve a operar en su estado normal. Si persiste la falla o si no se encuentra algún dispositivo de recierre, entonces se inicia una nueva búsqueda a partir del componente fallado pero ahora para encontrar un fusible cortacorriente o un interruptor. Este opera y la falla se toma como sostenida [13,60].

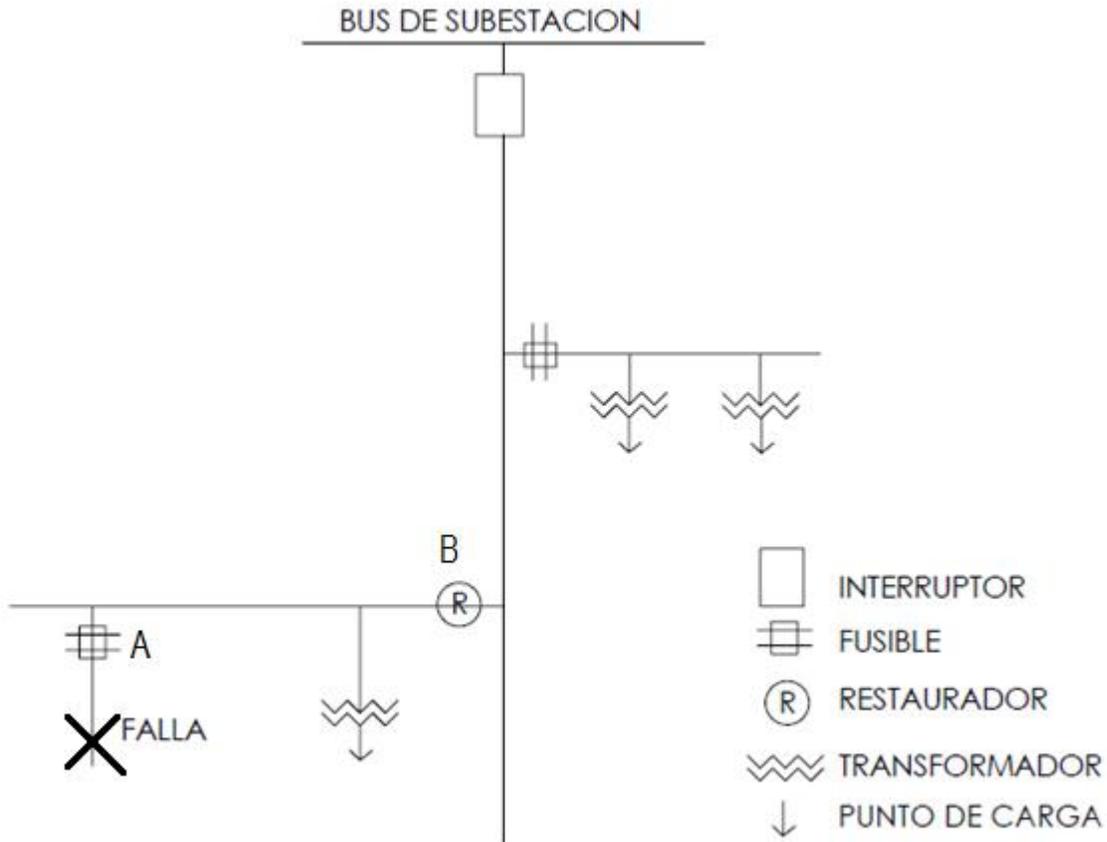


Figura 2.7. Esquemas de protección de un alimentador de distribución.

Por ejemplo, en la figura 2.7 se muestra una sencilla red de distribución radial donde ocurre una falla en la línea señalada. En este caso, el primer dispositivo de protección aguas arriba de él es un fusible cortacorriente "A". Sin embargo, con este esquema opera primero el restaurador "B", aun cuando se encuentre más alejado del componente fallado. Si la falla persiste después de que el restaurador opera las veces establecidas, entonces el fusible "A" opera.

En el segundo esquema, "Fusible-Restaurador", opera el primer dispositivo de protección que se encuentra aguas arriba del componente fallado, sin importar cuál sea [13,60]. Por ejemplo, en la figura 2.7 operaría el fusible "A" antes de que opere el restaurador "B". Por lo que con este esquema aumentan las fallas sostenidas y los tiempos de corte, a cambio disminuyen las fallas momentáneas.

El siguiente algoritmo [13,60] es utilizado para simular el primer esquema de protección, no se presenta el del segundo esquema ya que es más sencillo de implementar y varía muy poco de este.

1. Falla ocurre en el componente "C" con frecuencia λ_c y tiempo de reparación r_c .
2. Empezar una búsqueda aguas arriba del primer dispositivo de recierre "R" a partir de "C". ¿Es encontrado? No, ir al paso 7.
3. ¿La falla es momentánea? No, ir al paso 7.
4. Incrementar las operaciones de "R" por λ_c .
5. Incrementar las interrupciones momentáneas de todos los componentes aguas abajo de "R" por λ_c .
6. Ir al paso 11.
7. Empezar una búsqueda aguas arriba del primer dispositivo de protección (fusible, restaurador o interruptor) "P" a partir de "C".
8. Incrementar las operaciones de "P" por λ_c .
9. Incrementar interrupciones sostenidas de todos los componentes aguas abajo de "P" por λ_c .
10. Incrementar duración de interrupciones sostenidas de todos los componentes aguas abajo de "P" por $\lambda_c * r_c$.
11. Terminar.

El algoritmo anterior no sólo simula la operación de los dispositivos de protección, también realiza las búsquedas necesarias para encontrar todos los componentes que fueron afectados por la falla y realizarles las modificaciones necesarias en cuanto a sus números y tiempos de interrupción.

Se asume también en el algoritmo que los dispositivos de protección operan simultáneamente en las tres fases, es decir, que una falla de una fase a tierra sobre un sistema trifásico provocará en las tres fases la operación de los dispositivos. Sin embargo, puede haber dispositivos monofásicos usados en cada fase o dispositivos trifásicos que controlan cada fase independientemente, lo que puede causar que sólo las fases falladas

operen. En este caso, se puede hacer una modificación al algoritmo para simular la operación en una fase, en dos fases o en tres fases, pero para realizar esto se tiene que contar con cierta información. Se debe de conocer primero cuales son las fases afectadas por la contingencia, ya que estas son las que operaran. Después se debe saber cuáles son los clientes que se encuentran en cada fase, así cuando falle alguna fase en particular sólo se desconectarán los clientes que están conectados en ésta. Por último, se tiene que tener información acerca de si se puede desconectar una o dos fases, o si se tienen que desconectar todas las fases; por ejemplo, un corte en una fase puede resultar en problemas de seguridad para sistemas con transformadores con devanados del primario conectados en delta y puede resultar en daños a motores trifásicos. También puede haber problemas de desbalance si sólo una fase es desconectada, por lo que muchas veces se prefiere aunque ocurra una falla en una fase desconectar todas las fases.

El algoritmo también asume que los dispositivos de protección operan adecuadamente, sin ninguna probabilidad de que fallen al operar. Sin embargo, se puede dar el caso de que un dispositivo de protección no opere cuando lo deba hacer, o que opere algún otro dispositivo cuando no lo tiene que hacer. Esta situación se puede implementar en el algoritmo pero se debe de conocer la probabilidad que tiene cada dispositivo de operar adecuadamente. En este trabajo, sin embargo, no se toma en cuenta debido a que esa información es muy difícil de obtener y a que la probabilidad de que opere mal un dispositivo es muy baja y en general no tiene gran impacto en el análisis de la confiabilidad.

2.3.2.4 RECONFIGURACIÓN DEL SISTEMA

La reconfiguración en una red de distribución se realiza mediante la apertura de cuchillas normalmente cerradas y el cierre de cuchillas normalmente abiertas. Se pueden realizar con varios fines. Cuando la red de distribución está operando en su estado normal, se realizan para mejorar sus condiciones de operación como liberar carga a algún alimentador, reducir pérdidas en líneas o incrementar la confiabilidad de la red; como se realiza en las referencias [61,62]. Cuando ocurre una falla sostenida en la red de distribución, se realizan para aislar la falla y restaurar energía a una o varias zonas que fueron afectadas, en general son referidas estas reconfiguraciones como restauraciones.

Las restauraciones se realizan cuando ocurre una falla sostenida y el tiempo de conmutación es menor al tiempo que dura la falla. Se pueden dividir en restauración aguas arriba y restauración aguas abajo. La primera realiza una búsqueda aguas arriba de una cuchilla normalmente cerrada a partir del componente afectado y hasta el dispositivo de protección que opere, si la encuentra, la abre para aislar la falla y restaurar todos los componentes que se encuentran aguas abajo de dispositivo de protección exceptuando los que se encuentran en el camino de la cuchilla que fue abierta [13,63,64]. La segunda realiza una búsqueda aguas abajo de una cuchilla normalmente cerrada a partir del componente que fue afectado, si la encuentra, la abre para aislar la falla, entonces realiza

otra búsqueda aguas abajo de una cuchilla normalmente abierta a partir de la cuchilla que fue abierta, si la encuentra, la cierra para realizar la conexión hacia otro alimentador y restaura todos los componentes que están aguas abajo de la cuchilla que fue abierta [13,63,64]. Esta última restauración es más complicada ya que puede haber varios caminos y por lo tanto varias cuchillas que deban ser abiertas para aislar la falla, al igual puede haber varias cuchillas normalmente abiertas para conectar a varios alimentadores. En la figura 2.8 se muestran estas dos restauraciones.

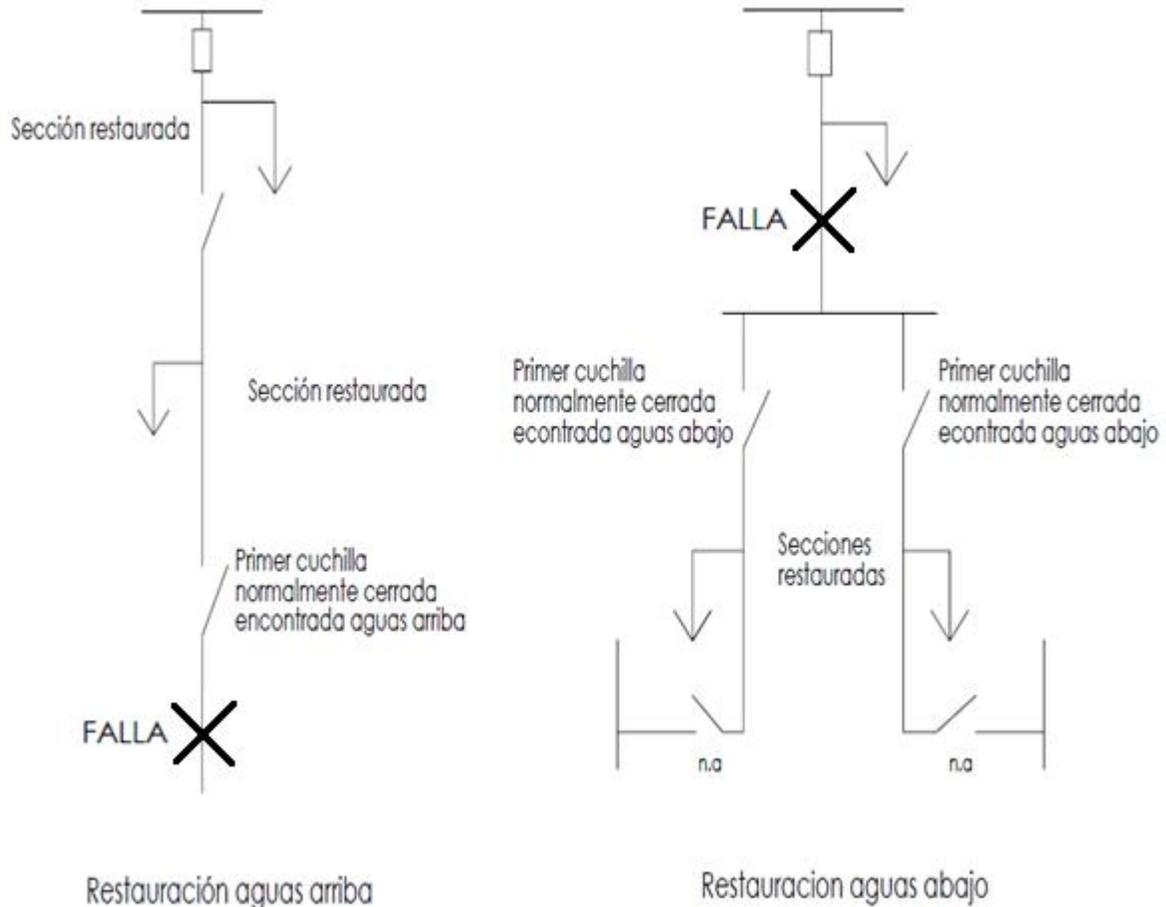


Figura 2.8. Reconfiguraciones de la red para restaurar secciones después de una falla.

El algoritmo para realizar la restauración aguas arriba es más sencillo desde que sólo se tiene que encontrar la primera cuchilla normalmente cerrada aguas arriba del componente fallado. Este algoritmo visualizado en el lado izquierdo de la figura 2.8 puede ser resumido con los siguientes pasos [13,63,64]:

1. Falla ocurre en el componente "C" con frecuencia λ_c y tiempo de reparación r_c .
2. Iniciar búsqueda aguas arriba de la primera cuchilla normalmente cerrada "Cnc" a partir de "C" y hasta el dispositivo de protección "P" que opere.
3. ¿Se encontró "Cnc"? No, ir al paso 9. Si, identificar su tiempo de conmutación r_s .

4. ¿Es r_s mayor que r_c ? Si, ir al paso 9.
5. ¿Es r_s más grande que la máxima duración de interrupción momentánea establecida? Si, ir al paso 8.
6. Disminuir interrupciones sostenidas de todos los componentes aguas abajo de "P" excepto los componentes que están aguas abajo de "Cnc" por λ_c .
7. Incrementar interrupciones momentáneas de todos los componentes aguas abajo de "P" excepto los componentes que están aguas abajo de "Cnc" por λ_c .
8. Disminuir duración de interrupciones sostenidas de todos los componentes aguas abajo de "P" excepto los componentes que están aguas abajo de "Cnc" por $\lambda_c \cdot (r_c - r_s)$.
9. Terminar.

El algoritmo para realizar la restauración aguas abajo visualizado en el lado derecho de la figura 2.8 puede ser resumido por los siguientes pasos [13,63,64]:

1. Falla ocurre en el componente "C" con frecuencia λ_c y tiempo de reparación r_c .
2. Iniciar búsqueda aguas abajo de la primera cuchilla normalmente cerrada "Cnc" a partir de "C".
3. ¿Se encontró cuchilla normalmente cerrada "Cnc"? No, ir al paso 16. Sí, identificar su tiempo de conmutación r_s .
4. Iniciar búsqueda aguas abajo de una cuchilla normalmente abierta "Cna" a partir de "Cnc".
5. ¿Se encontró cuchilla normalmente abierta "Cna"? No, ir al paso 16. Sí, identificar su tiempo de conmutación r_{SA} .
6. ¿Abriendo "Cnc" y cerrando "Cna" restaura los componentes aguas abajo de "Cnc" sin exceder valores de emergencia de equipos o violar restricciones de voltaje? No, ir al paso 14.
7. Hacer $r_t = r_s + r_{SA}$.
8. ¿Es r_t más grande que r_c ? Si, ir a paso 14.
9. ¿Es r_t más grande que la máxima duración de interrupción momentánea establecida? Si, ir al paso 12.
10. Disminuir interrupciones sostenidas de todos los componentes aguas abajo de "Cnc" por λ_c .
11. Incrementar interrupciones momentáneas de todos los componentes aguas abajo de "Cnc" por λ_c .
12. Disminuir duración de interrupciones de todos los componentes aguas debajo de "Cnc" por $\lambda_c \cdot (r_c - r_t)$.
13. Ir al paso 16.
14. ¿Hay otra cuchilla normalmente abierta aguas abajo de "Cnc"? Si, identificar su tiempo de conmutación r_{SA} e ir al paso 6.
15. ¿Hay otra cuchilla normalmente cerrada aguas abajo de "e" y está todavía en zona de corte? Si, identificar su tiempo de conmutación r_s e ir al paso 4.
16. Terminar.

El algoritmo de restauración aguas abajo no sólo es más complicado debido a que debe buscar varias cuchillas en varios caminos sino también porque se debe verificar que cuando se realice una restauración no viole algún valor nominal de algún componente de la red como podría ser la ampacidad de un alimentador, también debe verificar que no se viole alguna restricción de los voltajes en algún punto de la red debido a que cuando se realiza la reconfiguración los alimentadores se alargan lo que puede provocar caídas de voltaje más allá de las permitidas. Para realizar estas verificaciones se suele realizar un estudio de flujos de carga. Sin embargo, las redes de distribución suelen diseñarse sobredimensionando el calibre de los alimentadores para poder realizar las restauraciones sin ningún problema, también suelen tener bancos de capacitores y reguladores de voltaje estratégicamente colocados para que al momento de las reconfiguraciones no se tenga ninguna violación de voltaje. Por lo que a veces no es necesario utilizar el análisis de flujos de carga dentro del análisis de las restauraciones aguas abajo.

Los algoritmos descritos anteriormente sirven cuando todas las cuchillas o son automatizadas o no son automatizadas. Cuando en la red de distribución se tienen una mezcla de cuchillas no automatizadas y automatizadas, las restauraciones tanto aguas arriba como aguas abajo se realizan de una forma diferente. El tiempo medio de conmutación de las cuchillas automatizadas será mucho menor por lo que se puede intentar hacer una primera restauración por medio de éstas cuchillas y después (si es posible) hacer una segunda restauración por medio de las cuchillas no automatizadas. De esta forma se tendría una restauración a dos pasos [13,64,65]. En la figura 2.9 se muestran este tipo de restauraciones.

En la restauración aguas arriba a dos pasos se realiza una búsqueda de la primera cuchilla normalmente cerrada automatizada desde el componente fallado, si la encuentra la abre y restaura con el tiempo de conmutación de esta cuchilla a todos los componentes que están aguas abajo del dispositivo de protección que operó, sin tomar los que están en el camino de la cuchilla automatizada que abrió. Después se realiza una nueva búsqueda aguas arriba pero ahora de una cuchilla normalmente cerrada no automatizada a partir del componente afectado, si la encuentra restaura con el tiempo de conmutación de esta cuchilla no automatizada a todos los componentes que están aguas abajo o del dispositivo de protección que operó (si no se realizó la restauración con la cuchilla automatizada) o de la cuchilla automatizada que operó en el primer paso, sin tomar en cuenta los componentes que están en el camino de esta cuchilla no automatizada [13,64,65].

La restauración aguas abajo se realiza de una forma similar, se realiza primero una restauración con cuchillas automatizadas y después otra restauración con cuchillas no automatizadas [13,64,65]. Se debe tener en cuenta que para hacer la primera restauración, la cuchilla normalmente abierta que conecta a un alimentador vecino debe ser también automatizada.

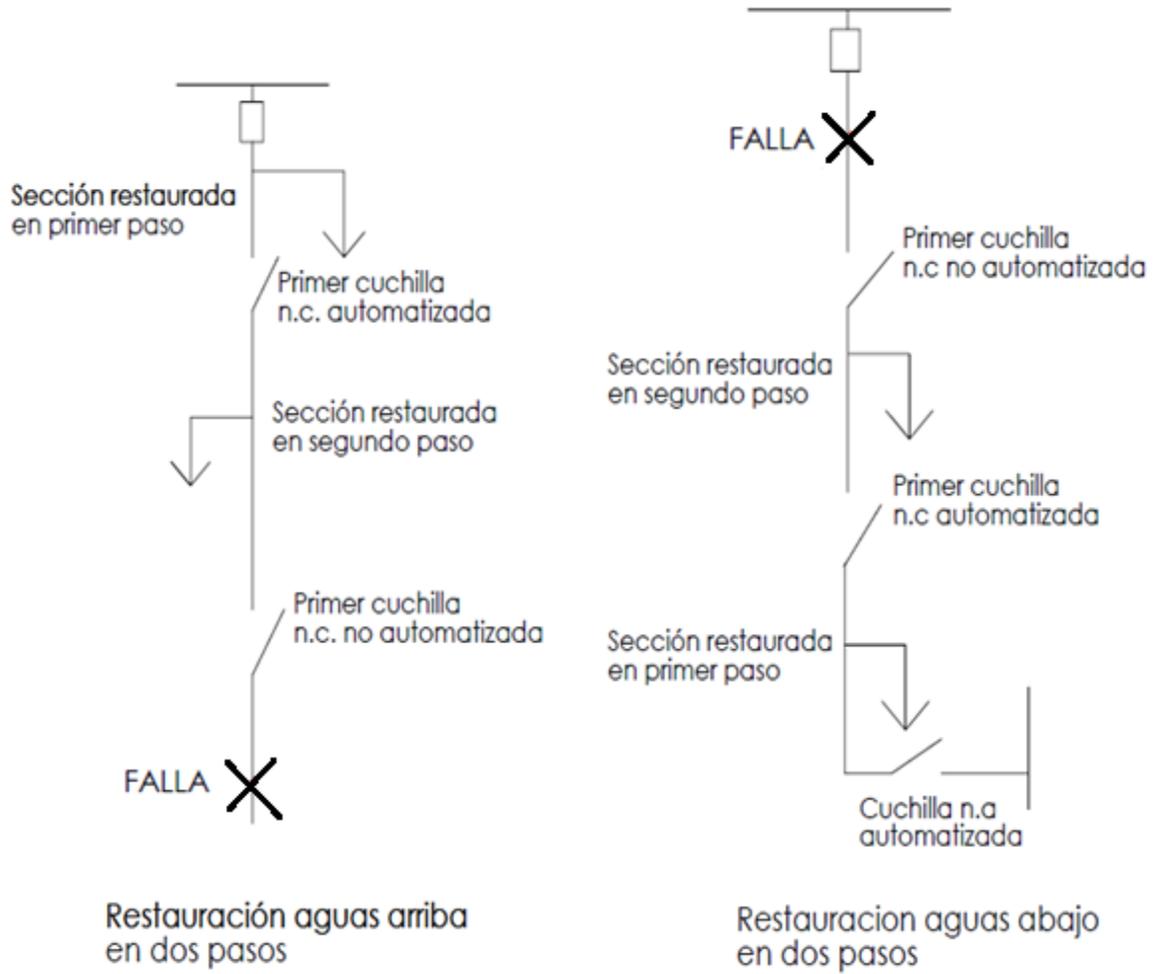


Figura 2.9. Reconfiguraciones de la red para restaurar secciones en dos pasos.

Los algoritmos para estas restauraciones a dos pasos no se muestran porque es de una forma muy similar a los que ya se describieron en esta sección. Solo se tiene que hacer el procedimiento dos veces.

2.4 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE REDES EN DISTRIBUCIÓN RADIALES

Para realizar la evaluación de la confiabilidad se propone realizar las dos simulaciones descritas en la sección 2.3. Con la simulación secuencial de Montecarlo generar fallas aleatoriamente a través del tiempo en base a datos de confiabilidad de los componentes. Con la simulación analítica evaluar el impacto que tiene cada una de estas fallas en la confiabilidad de la red de distribución.

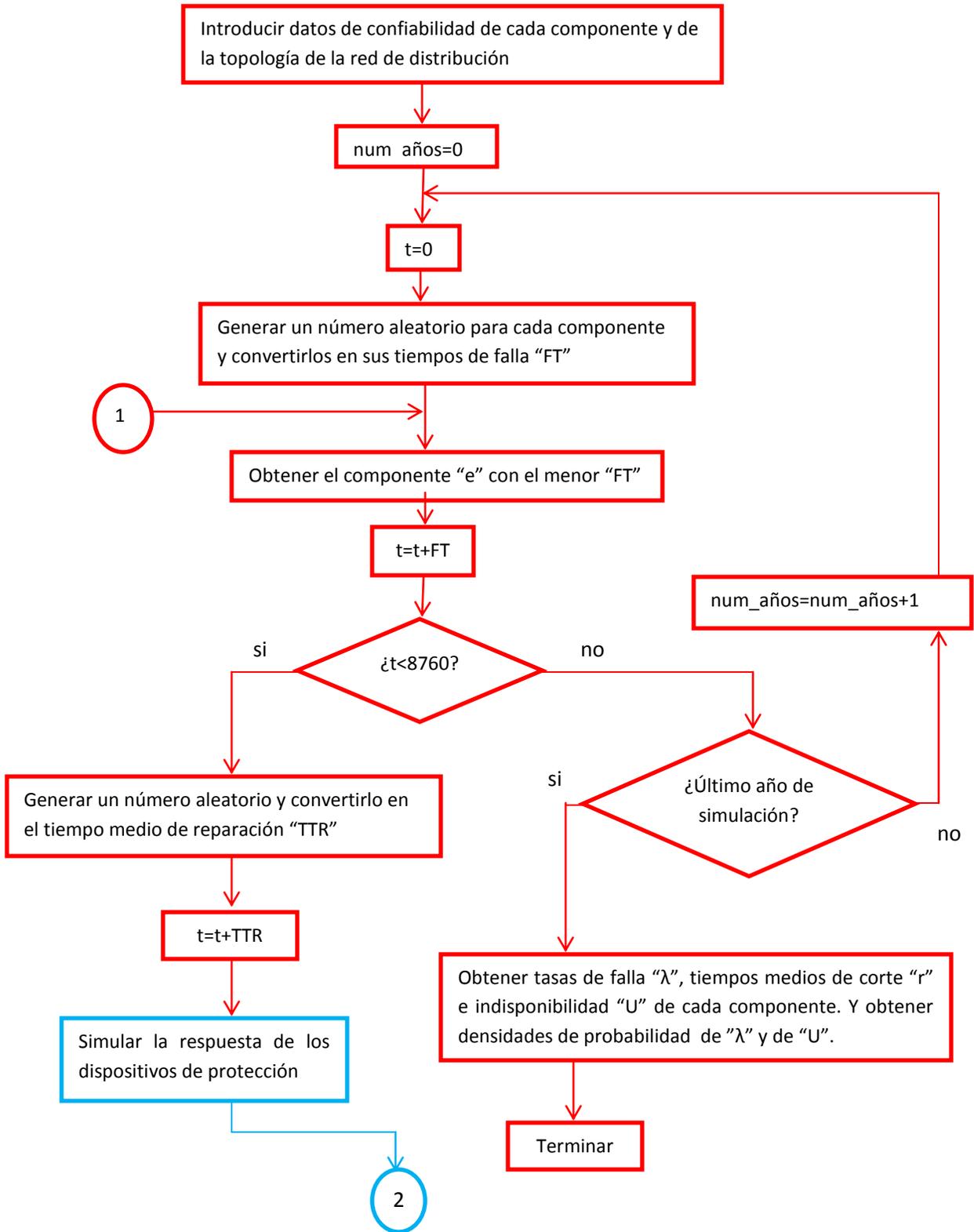


Figura 2.10. Primera parte del diagrama de flujo de la combinación de la simulación secuencial de Monte Carlo y la simulación analítica.

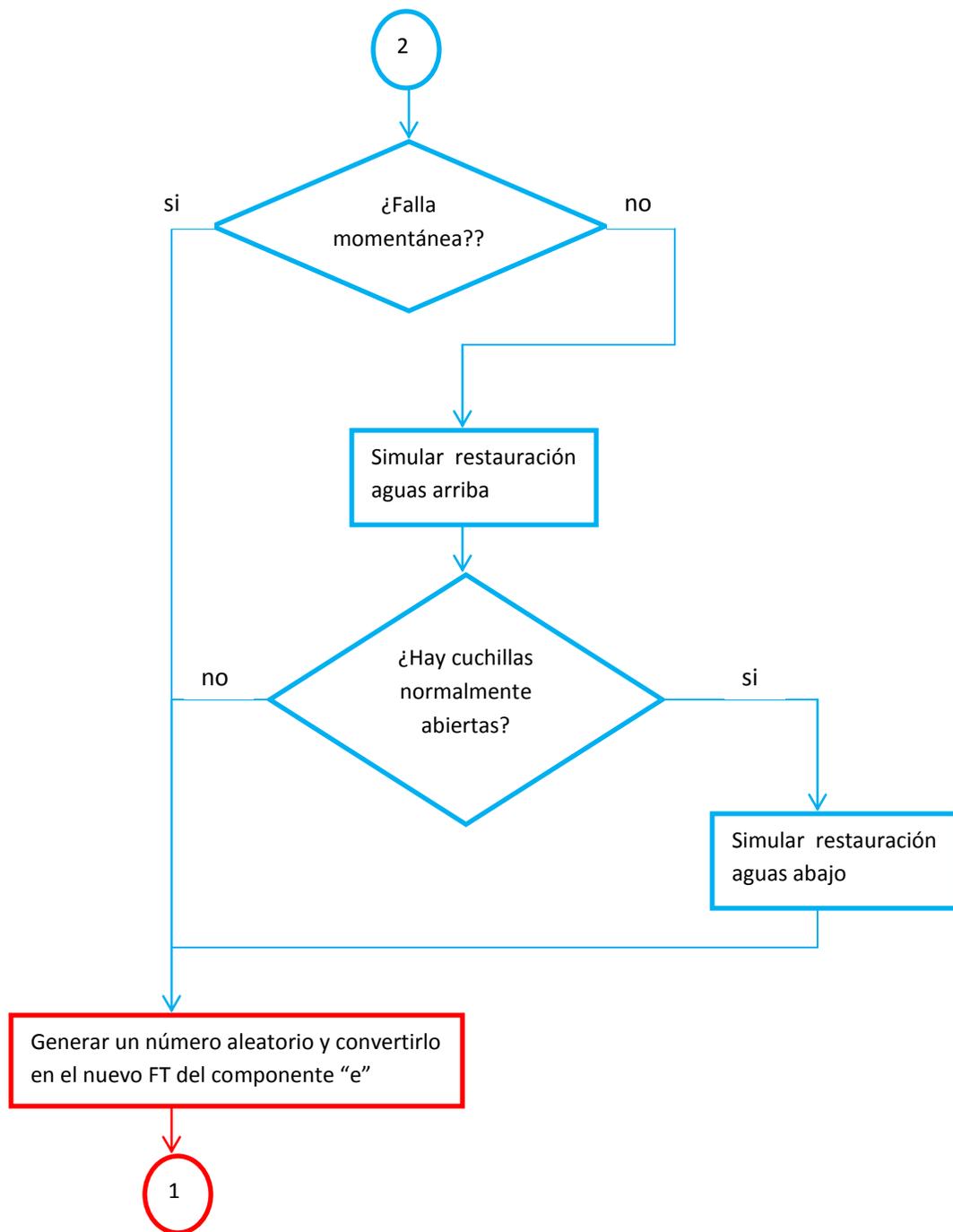


Figura 2.11. Segunda parte del diagrama de flujo de la combinación de la simulación secuencial de Monte Carlo y la simulación analítica.

En la figura 2.9 y 2.10 se muestran el diagrama de flujo de la conjunción de las dos simulaciones. De color rojo se muestra la parte de la simulación de Monte Carlo y de color azul la parte de la simulación analítica.

Las diferencias con los algoritmos descritos en las secciones anteriores son:

- Cuando se genera una falla en un componente se verifica primero que esté dentro del año de simulación antes de evaluar el impacto que tiene en la red de distribución.
- En la respuesta de los dispositivos de protección, cuando se encuentran los componentes afectados se aumenta +1 su número de fallas sostenidas o momentáneas (según sea el caso) y TTR su tiempo de corte.
- En los procesos de restauración, los tiempos medios de conmutación (TTS) de las cuchillas también se toman como variables aleatorias que siguen una densidad de probabilidad exponencial, por lo que se obtienen utilizando una fórmula similar a la 2.4.
- En los procesos de restauración, cuando se encuentran los componentes restaurados se aumenta +1 su número de fallas momentáneas y -1 su número de falla sostenidas (si es el caso) y + (TTS-TTR) su tiempo de corte.
- Antes de realizar la simulación de la restauración aguas abajo, se verifica primero si hay cuchillas normalmente abiertas en la red de distribución, si no la hay no tiene caso realizar esta restauración.
- En la respuesta de dispositivos de protección, cuando se encuentra un restaurador se utiliza un número aleatorio uniforme entre cero y uno para tomar la decisión de qué tipo de falla es. Por ejemplo, si el 60% de las veces las fallas son momentáneas, entonces, si el número generado está entre 0.0 y 0.4 se toma sostenida, si está entre 0.4 y 1 se toma como momentánea.

Este algoritmo fue utilizado para desarrollar un programa en lenguaje de programación Fortran, el cual es presentado en el anexo D y su validación así como otras pruebas de confiabilidad en sistemas de distribución se presentan en el anexo B. También, en este programa se realizan los ajustes necesarios para obtener la potencia y la energía no suministrada en cada uno de los puntos de carga, en el anexo A se describe como se obtienen estos resultados. Se realizó así porque como se verá en el capítulo 3, estos datos servirán para calcular costos debido a frecuencia y duración de los cortes.

CAPÍTULO 3: OPTIMIZACIÓN DEL COSTO DE LA CONFIABILIDAD

3.1 INTRODUCCIÓN

La planeación y el diseño de un alimentador de distribución va depender de dos factores: la confiabilidad y el costo. En general, como bien se explica en las referencias [43,66,67], se busca encontrar el punto de equilibrio entre ambos, esto llevará a tener el punto óptimo de costo-beneficio (desde el punto de vista social), como se muestra en la figura 3.1. Proporcionar un mayor nivel de confiabilidad llevará a las compañías a tener un mayor gasto de capital y operacional. Esta relación costo/confiabilidad de la compañía es mostrado en la curva con pendiente positiva de la figura 3.1. Este mayor nivel de confiabilidad, por el contrario, resultará en menores costos para los clientes debido a que será menor la frecuencia y la duración de las interrupciones. Esta relación costo/confiabilidad del cliente es mostrado en la curva con pendiente negativa de la figura 3.1. La suma de estas dos curvas es referida como el costo total de la confiabilidad.

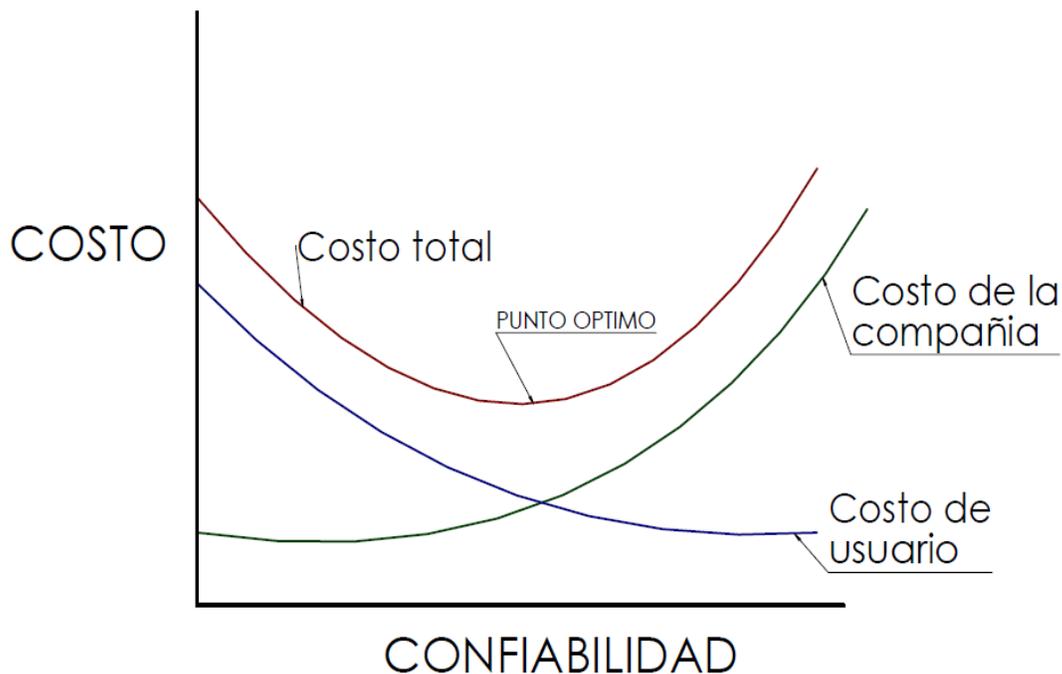


Figura 3.1 Curvas confiabilidad-costo [43].

En este capítulo se aborda el problema de ubicar y seleccionar los dispositivos de desconexión en un sistema de distribución de manera que minimicen los costos de inversión o los costos totales. Considere que se quiere obtener en un alimentador un SAIDI no mayor a 2, se pueden tener diversas combinaciones de dispositivos de desconexión que harán que se cumpla con este requisito, como se observa en la figura 3.2. Sin embargo, unas combinaciones resultarán más costosas que otras, al final se busca encontrar la combinación que minimiza los costos y que además proporciona la confiabilidad requerida. Por otra parte, también se puede buscar la combinación que proporciona la confiabilidad que hace que se reduzca el costo total (ver figura 3.1), no teniendo restricción de confiabilidad para este caso.

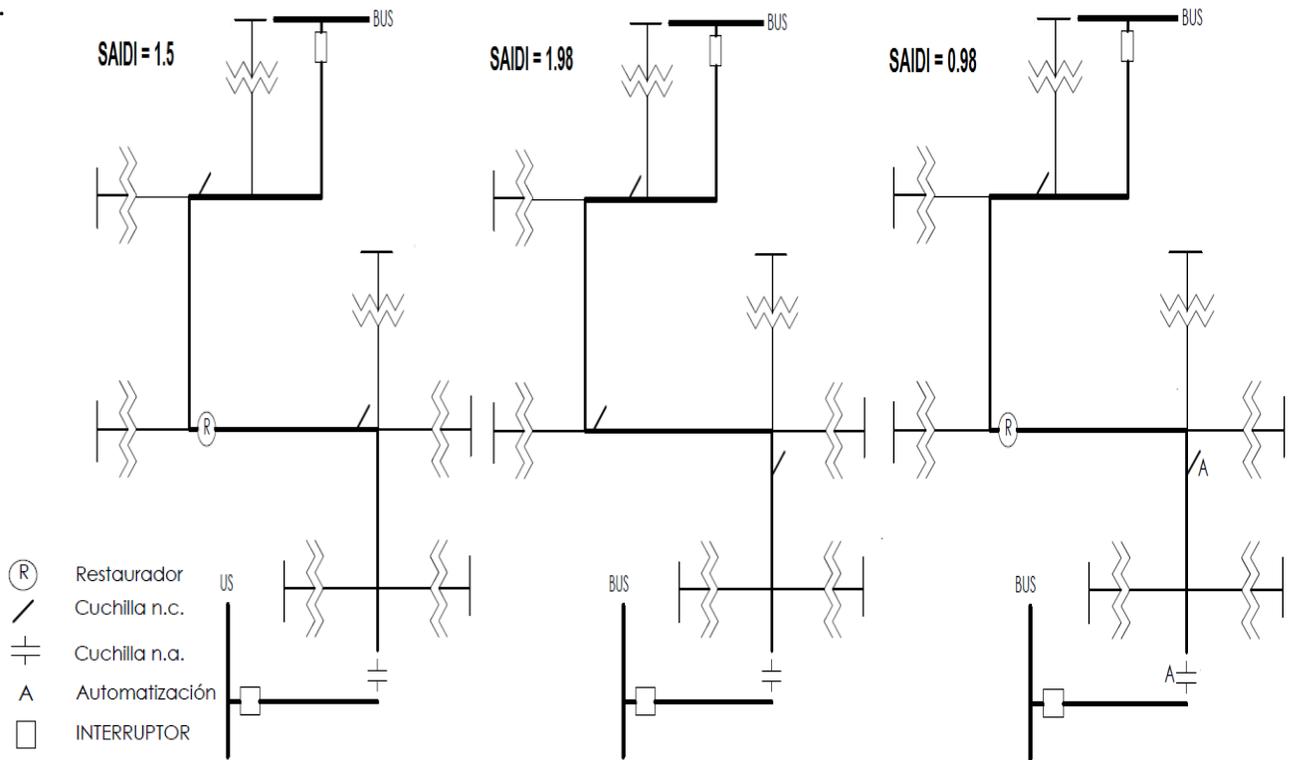


Figura 3.2 Combinaciones de dispositivos de desconexión para obtener diversos valores del SAIDI.

Estos planteamientos caen en el problema de optimización discreta. Si la confiabilidad y el costo de todas las posibles combinaciones fueran calculados, entonces se podría escoger aquella que cumpliera con la confiabilidad requerida y que tuviera el menor costo, de esta manera se aseguraría una solución óptima global. Sin embargo, como se verá en secciones posteriores, habrá una gigantesca cantidad de posibles combinaciones, por lo que no es posible ni factible evaluar todas, ya que llevaría a una enorme carga computacional y por lo mismo a tiempos de ejecución gigantescos. Para solucionar esto, se implementan algoritmos de optimización discretos, estos buscan obtener una solución óptima evaluando solo algunas de las posibles combinaciones, de esta forma reducen en gran

medida el tiempo y la carga computacional. Sin embargo, debido a que dejan de evaluar muchas de las posibles combinaciones no garantizan la solución óptima global, solo pueden garantizar una solución óptima local.

Los métodos que se han utilizado para resolver el problema de optimización discreta están:

Búsqueda local [68,69], entre los que se encuentran los métodos de búsqueda directa y de bisección, simulación templada [70], algoritmos Genéticos [71,72], métodos Híbridos [73].

En este trabajo se propone implementar un método híbrido, es decir, la combinación de dos algoritmos: una búsqueda local y un genético simple. El primero es más fácil de implementar y garantiza encontrar un óptimo local, sin embargo, para problemas de gran tamaño son deficientes [13], es decir, entregan óptimos locales muy alejados del óptimo global. El segundo es todo lo contrario, no garantiza encontrar un óptimo y es más difícil de implementar, sin embargo, suele entregar mejores resultados que un algoritmo de búsqueda local cuando el problema es de gran tamaño. Finalmente para encontrar mejores resultados suelen implementarse ambos algoritmos.

3.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La formulación del problema consiste de una función objetivo, un conjunto de restricciones y un conjunto de variables de optimización.

Para problemas de optimización discreta, definir la función objetivo es simple desde que no hay exigencia de linealidad, convexidad, diferenciabilidad, o continuidad [13]. La función objetivo puede ser definida sin saber cómo se calcula. Por ejemplo, algún índice de confiabilidad como SAIDI o SAIFI pueden ser seleccionados sin conocimiento preciso de cómo serán calculados, un beneficio que no se tiene en la mayoría de los algoritmos de optimización continuos.

Los problemas de optimización de confiabilidad de sistemas de distribución suelen ser formulados de las siguientes tres formas [13]:

- 1.- Optimizar la confiabilidad sujeta a restricciones de costos.
- 2.- Optimizar costos sujetos a restricciones de confiabilidad.
- 3.- Optimizar el costo total de la confiabilidad, incluyendo los costos para proporcionar la confiabilidad y los costos incurridos asociados con interrupciones.

El primer planteamiento es común para compañías con un presupuesto fijo para gastar en proyectos de mejora de la confiabilidad. Estas compañías desean alcanzar la mejor confiabilidad posible, usualmente medidas con índices de confiabilidad, teniendo una

cantidad fija de dinero. El segundo y tercer planteamiento son utilizados en este trabajo por lo que son descritos de manera amplia en las siguientes secciones.

3.2.1 OPTIMIZACIÓN DEL COSTO SUJETO A RESTRICCIONES DE CONFIABILIDAD

Este planteamiento se realiza cuando una compañía requiere cierta confiabilidad en un sistema o alimentador de distribución. Buscan alcanzar una confiabilidad con el menor costo de inversión posible.

En este trabajo se busca proporcionar cierta confiabilidad a un sistema de distribución mediante la ubicación y selección de dispositivos de desconexión. Si todos los dispositivos tuvieran un mismo costo, entonces el problema sería seleccionar y ubicar la **menor** cantidad de estos dispositivos para obtener la confiabilidad deseada. De esta forma se tiene el siguiente planteamiento:

Minimizar

$$C_{comp} = \sum_{i=1}^{ndd} Ca_i \quad 3.1$$

Sujeto a

$$\begin{aligned} SAIFI_O &\leq SAIFI_R \\ SAIDI_O &< SAIDI_R \\ MAIFI_O &< MAIFI_R \end{aligned} \quad 3.2$$

Dónde:

C_{comp} = Costo total de inversión de la compañía debido a la colocación de dispositivos de desconexión.

Ca_i = Costo anualizado del dispositivo de desconexión i .

ndd = Número de dispositivos de desconexión puestos en el sistema.

SAIFI, SAIDI y MAIFI son los índices de confiabilidad, donde el prefijo "O" hace referencia a los que tiene el sistema con la combinación de dispositivos que está siendo evaluada, mientras el prefijo "R" refiere a los índices de confiabilidad que se quieren obtener. Obviamente, combinaciones de dispositivos que arrojen índices de confiabilidad menores a los deseados será una solución factible porque proporcionará una mejor confiabilidad que la deseada.

Los índices de confiabilidad que son tomados como restricciones en este trabajo son el SAIDI, el SAFI y el MAIFI, estos son explicados a detalle en el anexo A. Se eligieron estos

índices ya que son los más utilizados en sistemas de distribución. Cabe mencionar que para la obtención de ellos se realiza en este trabajo una evaluación de confiabilidad con el método descrito en la sección 2.4.

3.2.1.1 COSTOS DE LOS DISPOSITIVOS DE DESCONEXIÓN

Los costos que se tendrán debido a la colocación de un dispositivo de desconexión serán:

- i.- Costos de compra.
- ii.- Costos de mantenimiento.
- iii.- Costos de operación.

El costo de compra es presente mientras los costos de mantenimiento y operación son recurrentes. Es decir, el colocar un dispositivo hará que se tenga un costo por su compra en un tiempo presente y un costo recurrente de mantenimiento y operación durante su tiempo de vida.

Para el análisis, en este trabajo el costo de los dispositivos será anualizado, se realiza así debido a que los dispositivos pueden tener diferentes tiempos de vida. Por ejemplo, una cuchilla puede tener un tiempo de vida de 25 años y un restaurador un tiempo de vida de 30 años, además, usar valores anualizados hará que los costos recurrentes sean un factor en el análisis. El costo anualizado de un dispositivo se calcula con la siguiente ecuación [13]:

$$Ca = Cr + Cp \frac{d(1 + d)^{tdv}}{(1 + d)^{tdv} - 1} \quad 3.3$$

Dónde:

Ca = Costo anualizado.

Cr = Costo recurrente anual.

Cp = Costo presente (costo de compra).

d = Tasa de descuento anual.

tdv = Tiempo de vida del dispositivo en años.

La tasa de descuento anual " d " indica la depreciación del costo de compra del componente. Por ejemplo, si el día de hoy una cuchilla tiene un precio de \$30,000 y en el siguiente año vale \$33,000, entonces la tasa de depreciación será del 10% por año.

3.2.2 OPTIMIZACIÓN DEL COSTO TOTAL DE LA CONFIABILIDAD

Este planteamiento busca encontrar el punto óptimo que hace que los costos de inversión de la compañía " C_{comp} " y los costos de los clientes " C_{client} " debidos a las interrupciones se equilibren, como se muestra en la figura 3.1. De esta forma se busca encontrar la confiabilidad que hace que el costo total se minimice. La formulación de este problema es:

Minimizar

$$C_{comp} + C_{client} \quad 3.4$$

El costo de la compañía en este trabajo será por la colocación de dispositivos de desconexión, su cálculo fue abordado en la sección 3.2.1.

El costo de clientes está asociado con la frecuencia y duración de interrupciones. Estos costos incurridos pueden incluir penalizaciones, reembolso a clientes, pérdida de ganancias, y una serie de otras posibilidades. Para calcularlo se utiliza la siguiente formula [43]:

$$C_{client} = P_p(C_{kW} + tC_{kWh}) \quad 3.5$$

Dónde:

C_{client} = Costo del cliente debido a la confiabilidad.

C_{kW} = Costo por kW interrumpido del cliente.

C_{kWh} = Costo por kWh interrumpido del cliente.

P_p = Potencia promedio del cliente.

Como se observa en la formula anterior, el costo del cliente será calculado mediante la obtención de la potencia y la energía que se deja de suministrar. En este trabajo para calcularlos se realiza una evaluación de confiabilidad utilizando el método descrito en sección 2.4.

3.3 REPRESENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN

La representación de la solución es una parte importante en la optimización discreta. Esto es simplemente un método de representar una solución de una manera que pueda ser usada en algoritmos de optimización discretos. La manera más popular para representar una solución es usando un mapa de enteros, el cual es una cadena de números enteros restringidos que representan una solución. Un tipo de mapa común de enteros que será utilizado en este trabajo restringe valores de enteros a ceros y unos, comúnmente llamado mapa binario.

Considere que una compañía trata de decidir dónde colocar cuchillas no automatizadas en el alimentador mostrado en la figura 3.3, como se observa, en este caso se tienen diez posibles localizaciones. Así, posibles soluciones pueden ser representadas por una cadena de diez números binarios. Un valor cero correspondiendo a no colocar una cuchilla y un valor uno correspondiendo a colocar una cuchilla. Por ejemplo, el siguiente mapa binario representa colocar cuchillas en las ubicaciones 2, 5, 8 y 10.

Ubicación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1

El mapa binario anterior es suficiente para representar una solución en la que sólo se tenga que decidir si se desea colocar o no un dispositivo específico. Sin embargo, si el problema fuera dónde ubicar cuchillas no automatizadas, cuchillas automatizadas y restauradores, entonces la representación anterior no sería suficiente. Se tiene que usar un mapa binario de dos bits. Así, cada número entero tendría cuatro posibles valores "00 01 10 11", cada uno de éstos representando alguna acción a tomar en la posible ubicación. En este trabajo se tendrá la siguiente relación:

No colocar dispositivo	00
Colocar una cuchilla no automatizada	01
Colocar una cuchilla automatizada	10
Colocar un restaurador	11

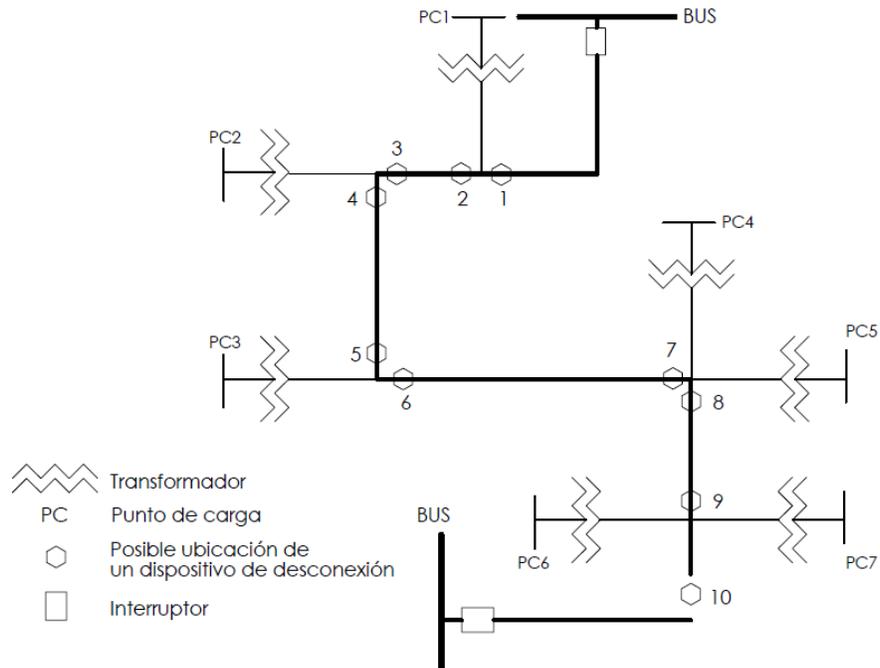


Figura 3.3 Posibles ubicaciones de los dispositivos de desconexión en un alimentador.

Como se observa en la figura 3.3, en la ubicación número 10 se trata de un lugar para conectar un suministro alterno. En este caso no se debe contemplar la posible colocación de un restaurador, por lo que cuando se trate de lugares para conectar suministro alterno un valor de “11” representará colocar una cuchilla automatizada. Por ejemplo, si se tiene una solución como la que se muestra en la figura 3.4 se tendría el siguiente mapa binario.

Ubicación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor	00	01	00	00	00	11	00	10	00	11

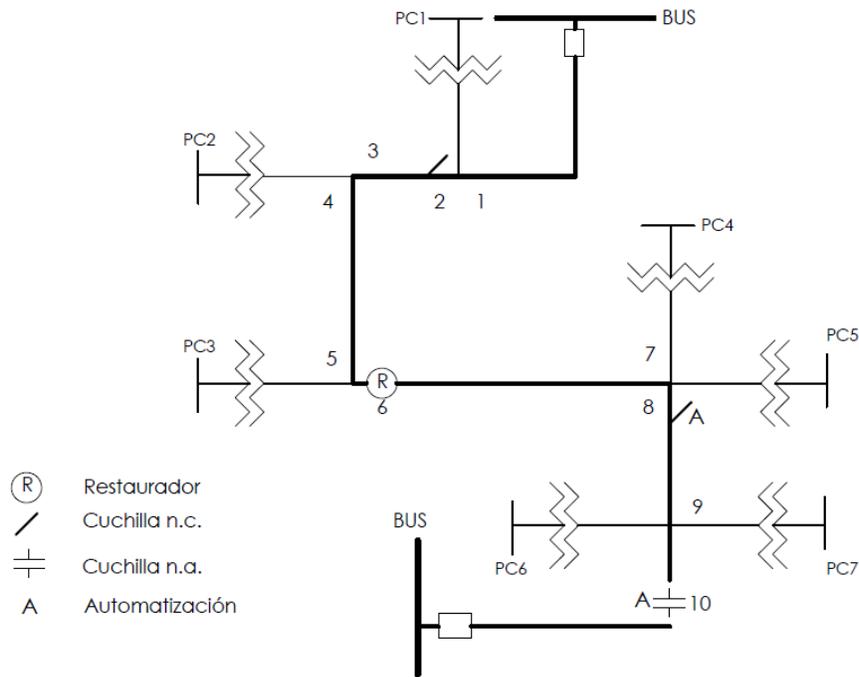


Figura 3.4 Ubicación de los dispositivos de desconexión en un alimentador.

Para una representación de la solución con un mapa binario de dos bits, el número de posibles combinaciones “nd” de dispositivos de desconexión en un sistema de distribución con “nc” posibles ubicaciones será [13]:

$$nd = 2^{2*nc} \quad 3.6$$

Para el caso del alimentador de la figura 3.3 se tendrían $2^{2*10} = 1,048,576$ posibles combinaciones. Aun con este alimentador chico con pocas posibles ubicaciones se tienen más de un millón de posibles soluciones. Obviamente para redes de tamaño real con alimentadores más largos se tendrá que aumentar el número de posibles ubicaciones y esto hará que aumente de manera gigantesca el número de posibles soluciones. Analizar cada una de estas inimaginables cantidades de combinaciones sería ineficaz, ya que

aumentaría enormemente el tiempo y la carga computacional. Para evitar esto se implementan algoritmos de optimización discretos, estos encuentran una solución óptima sin tener que evaluar todas las posibles combinaciones.

3.4 BÚSQUEDA LOCAL PARA SELECCIONAR Y UBICAR DISPOSITIVOS DE DESCONEXIÓN EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Las técnicas de búsqueda local son simples de implementar, son robustas, y no tienen un gran número de parámetros para sintonizar [13]. Ellos son en muchos casos suficientes para problemas de optimización. El método de búsqueda local que es utilizado en este trabajo es referido como “escalada simple”, quizá es el método más sencillo para implementar.

El método de “escalada simple”, esencialmente comienza con una solución que puede ser introducida u obtenida aleatoriamente, entonces realiza pequeños cambios hasta que un criterio es alcanzado. Como sólo garantiza encontrar un óptimo local, suele ser repetido muchas veces con muchas diferentes soluciones iniciales para encontrar diversos óptimos locales, de esta forma la solución final será el mejor de ellos, garantizando que el resultado esté más cerca del óptimo global. Este método no puede ser tan eficiente como lo son las técnicas de simulación templada y algoritmos genéticos, pero es rápido de implementar y puede proporcionar soluciones que aceptables. En el resto de la sección será explicada esta técnica para solucionar el problema de ubicar y seleccionar dispositivos de desconexión en sistemas de distribución, puede diferir de cómo se aplica para otros problemas, por lo que se recomienda para tener una información más general del algoritmo consultar las referencias [68,69].

Suponga que se quiere colocar dispositivos de desconexión en el alimentador mostrado en la figura 3.3 para minimizar costos totales. Como se observa, se tienen diez posibles lugares para colocar dichos dispositivos. El algoritmo de “escalada simple” inicia con una solución aleatoria, por ejemplo, suponga que se obtiene una solución inicial como la que se muestra en la figura 3.4. De esta forma se tendría el siguiente mapa binario (ver sección 3.3).

Ubicación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Valor	00	01	00	00	00	11	00	10	00	11

La forma en obtener una solución inicial puede realizarse mediante la utilización de generadores de números aleatorios (ver sección 2.3.1.1) entre cero y uno con densidad uniforme. Por ejemplo, para la obtención del mapa binario anterior se tendría que generar 20 números aleatorios, donde aquellos números que estuvieran entre 0 y 0.5 representarían colocar un cero, y números entre 0.5 y 1 representarían colocar un uno.

El segundo paso del algoritmo es calcular la función objetivo de la solución inicial, que para este caso es obtener el costo total. Para ello se utilizan las ecuaciones descritas en la sección 3.2, cabe mencionar que una de ellas involucra la potencia y la energía que no se suministra, por lo que para calcularlos se realiza una evaluación de confiabilidad con el método presentado en la sección 2.4. Al final se obtiene un costo para la primera solución.

El tercer paso del algoritmo es realizar todos los posibles cambios en el primer número de la solución inicial. En este caso, como se explicó en la sección 3.3 se realizan tres cambios, que son los siguientes:

Ubicación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Solución Inicial	00	01	00	00	00	11	00	10	00	11
Primer cambio	01	01	00	00	00	11	00	10	00	11
Segundo cambio	10	01	00	00	00	11	00	10	00	11
Tercer cambio	11	01	00	00	00	11	00	10	00	11

Es decir, en la ubicación uno donde inicialmente no se encuentra ningún dispositivo, se coloca en una primera instancia una cuchilla no automatizada, en una segunda instancia una cuchilla automatizada y en una tercera instancia un restaurador, dando tres nuevas soluciones.

El siguiente paso es calcular la función objetivo de las tres nuevas soluciones, que para este caso es calcular sus costos totales. Se realiza una comparación de costos de la solución inicial y de las tres nuevas soluciones, y se guarda como nueva solución aquella que tenga el menor costo. Por ejemplo, si con el primer cambio se obtuvo el menor costo, se tiene entonces el siguiente mapa binario como la nueva solución:

Ubicación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Nueva solución	01	01	00	00	00	11	00	10	00	11

El siguiente paso es colocarse en la segunda ubicación y realizar los siguientes tres cambios:

Ubicación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inicial	01	01	00	00	00	11	00	10	00	11
Primer cambio	01	00	00	00	00	11	00	10	00	11
Segundo cambio	01	10	00	00	00	11	00	10	00	11
Tercer cambio	01	11	00	00	00	11	00	10	00	11

Es decir, en la segunda ubicación donde se encuentra inicialmente una cuchilla no automatizada, en una primera instancia no se coloca dispositivo, en una segunda instancia se coloca una cuchilla automatizada y en una tercera instancia se coloca un restaurador. Entonces se evalúan las funciones objetivo de las tres nuevas soluciones, se comparan costos y se guarda como nueva solución aquella que tenga el menor costo.

El proceso se repite para el resto de las posibles ubicaciones, regresando otra vez a la primera ubicación. Si hubo un cambio de solución en el último recorrido de las ubicaciones, entonces el proceso se repite. Si no hubo ningún cambio entonces el algoritmo termina, ya que esto indicará que la solución ya no puede ser mejorada.

3.5 ALGORITMOS GENÉTICOS

Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda basados sobre los mecanismos de selección natural y genética natural. Combinan la supervivencia de las estructuras de cadenas más fuertes con un estructurado intercambio de información aleatorizado para formar un algoritmo de búsqueda con el estilo innovador de búsqueda humana [72]. Después de que una población de soluciones es creada, futuras generaciones son determinadas seleccionando probabilísticamente padres de alta calidad y combinándolos para crear hijos. Durante este proceso, una pequeña cantidad de mutación aleatoria es usada para asegurar la diversidad genética. Algoritmos genéticos han demostrado ser robustos y eficientes cuando son aplicados a problemas de optimización difíciles y han sido exitosamente aplicados en problemas de planeación de sistemas de distribución, como lo muestran las referencias [43,45,74,75].

En este trabajo se utiliza un algoritmo genético simple, ya que ha dado buenos resultados en muchos trabajos prácticos [72]. En el resto de la sección será explicado este algoritmo para solucionar el problema de ubicar y seleccionar dispositivos de desconexión en sistemas de distribución, puede diferir de cómo se aplica para otros problemas, por lo que se recomienda para tener una información más general del algoritmo consultar las referencias [71,72]. En ellas también se abordan operadores más avanzados de los que utiliza el simple.

3.5.1 ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE PARA SELECCIONAR Y UBICAR DISPOSITIVOS DE DESCONEXIÓN EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Los mecanismos de un algoritmo genético simple son asombrosamente sencillos, envolviendo nada más complejo que copias de cadenas e intercambio parcial de cadenas. La simplicidad de operación y la potencia de efecto son dos de las principales atracciones del enfoque de este algoritmo [72].

Considere el problema de seleccionar y ubicar dispositivos de desconexión en el alimentador mostrado en la figura 3.5 para minimizar costos totales. Para usar el algoritmo genético debemos primero codificar las variables de decisión de nuestro problema a alguna cadena de longitud finita. Para este problema, la codificación será aquella que se abordó en la sección 3.3, de esta forma al haber cuatro posibles ubicaciones las cadenas serán de cuatro números binarios de dos bits. Por ejemplo,

colocar cuchillas no automatizadas en todas las ubicaciones genera la cadena (01 01 01 01) y colocar restauradores en todas la ubicaciones genera la cadena (11 11 11 11). Estas cadenas de números enteros son referidas en algoritmos genéticos como cromosomas.

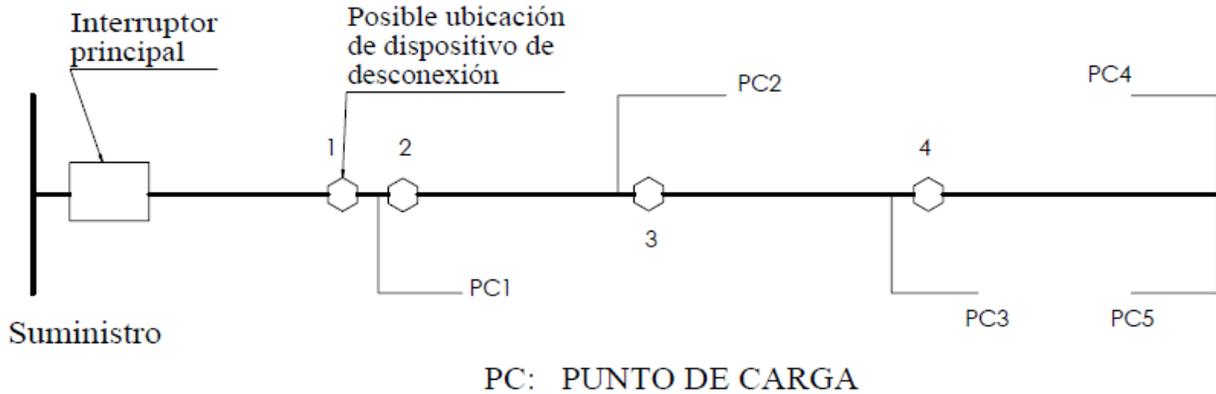


Figura 3.5 Alimentador para ejemplificar el algoritmo genético simple.

Inicia el algoritmo seleccionando un conjunto de cromosomas de forma aleatoria, referido este conjunto como población inicial. Considere que se fija una población de tamaño cuatro, así se tienen que generar cuatro cromosomas aleatoriamente. Para ello, en este trabajo se utilizan generadores de números aleatorios entre cero y uno con densidad uniforme (ver sección 2.3.1.1). Números que estén entre 0 y 0.5 harán que se coloquen ceros, y números que estén entre 0.5 y 1 harán que se coloquen unos. Para este caso, para crear cada cromosoma se tienen que generar ocho números aleatorios (uno para cada bit). Suponga que se generan los siguientes cuatro cromosomas:

Primer cromosoma	01 10 11 10
Segundo cromosoma	11 10 00 00
Tercer cromosoma	01 00 01 01
Cuarto cromosoma	11 01 10 11

Cada uno de estos cromosomas representa una combinación de dispositivos de desconexión en el alimentador de la figura 3.5. El siguiente paso en el algoritmo es calcular la función objetivo que proporcionan los cuatro cromosomas. Para este caso, la función objetivo es el costo total (ver sección 3.2), en el caso del cálculo del costo debido a frecuencia y duración de cortes (o costo de los usuarios) se realiza una evaluación de confiabilidad con los métodos abordados en el capítulo 2 y utilizando la fórmula 3.5, por lo que se tiene que realizar cuatro evaluaciones de confiabilidad, una para cada cromosoma. Sin embargo, para ejemplificar el procedimiento del algoritmo genético solo se tomará el costo debido a la colocación de los dispositivos, sin tener restricción de confiabilidad. Es obvio, que el menor costo se tendrá cuando no haya ningún dispositivo, es decir con la cadena binaria con puros ceros. Tomando costos para restauradores de \$8,000, para cuchillas automatizadas de \$5,000 y para cuchillas no automatizadas de \$2,000 se tiene los resultados mostrados en la tabla 3.1.

La función objetivo en algoritmos genéticos es referida como aptitud, un cromosoma será más apto que otro cuando su función objetivo sea mejor. En el caso de los cromosomas mostrados en la tabla 3.1, el tercero es el más apto (ya que proporciona el menor costo) y el último es el menos apto de los cuatro.

Tabla 3.1. Costos obtenidos de la población inicial.

No. de cadena	Cromosoma	Costo \$ (Función objetivo)
1	01 10 11 10	20,000
2	11 10 00 00	13,000
3	01 00 01 01	6,00
4	11 01 10 11	23,000
Suma		62,000
Promedio		15,000

El siguiente paso del algoritmo es crear una segunda población a partir de la primera. Para ello se utilizan los tres operadores que componen el algoritmo genético simple: reproducción, cruzamiento y mutación.

Reproducción es un proceso en el cual los cromosomas son copiados de acuerdo a sus valores de la función objetivo. Lo que significa que cromosomas más aptos tienen una mayor probabilidad de contribuir más veces a la creación de la siguiente población. El operador de reproducción puede ser implementado en forma algorítmica de varias maneras. En este trabajo se utiliza el método de la rueda de la ruleta, donde cada cromosoma de la actual población ocupa un porcentaje de la rueda de acuerdo a su función objetivo. En este trabajo se asignan cierta cantidad de lugares de la rueda a los cromosomas de acuerdo a su función objetivo. Para ello se utiliza la siguiente fórmula [13]:

$$Ndl = Bmin + (Bmax - Bmin) * \left(\frac{F - Fp}{Fm - Fp} \right) \quad 3.7$$

Dónde:

Ndl = Número de lugares que se le asignará al cromosoma que está siendo evaluado.

Bmax = Es el número máximo de lugares que se le asignará al cromosoma más apto.

Bmin = Es el número mínimo de lugares que se le asignará al cromosoma menos apto.

F = Es el valor de la función objetivo del cromosoma que está siendo evaluado.

Fm = Es el valor de la función objetivo del cromosoma más apto.

Fp = Es el valor de la función objetivo del cromosoma menos apto.

Para el caso que se está abordando, si se asignan diez lugares al cromosoma más apto y tres lugares al cromosoma menos apto, entonces utilizando la fórmula 3.7 se forma la rueda de la ruleta mostrada en la figura 3.6.

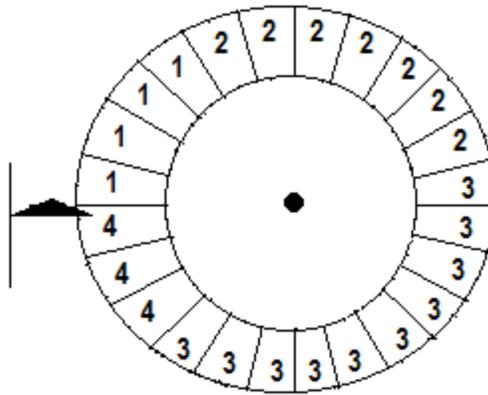


Figura 3.6. Rueda de la ruleta para la selección de cromosomas.

Se asignan cuatro lugares al primer cromosoma, siete al segundo, diez al tercero y tres al cuarto. Esta distribución cambia si se varía el número de lugares que se asignan al cromosoma más apto y al cromosoma menos apto.

Una vez formada la rueda de la ruleta, se procede a girarla dos veces (donde cada lugar que la conforma tiene la misma probabilidad de ser seleccionado) para obtener dos cromosomas llamados padres, son nombrados así ya que servirán para la creación de dos nuevos cromosoma de la siguiente población, llamados hijos. En este trabajo para realizar la simulación del giro de la rueda de la ruleta se apoya de generadores de números aleatorios entre cero y uno con densidad uniforme. Para ello, primero se obtienen las probabilidades de selección de cada cromosoma, para los del ejemplo serían:

Cromosoma 1	$4/24 = 0.1666$
Cromosoma 2	$7/24 = 0.2916$
Cromosoma 3	$10/24 = 0.4167$
Cromosoma 4	$3/24 = 0.125$

Así, el cromosoma más apto tiene una probabilidad de 41.67% de que si se gira la ruleta, sea elegido. Teniendo la información anterior se genera un número aleatorio " n_a " entre cero y uno con densidad uniforme, a partir de su valor se escoge un cromosoma de los cuatro con el siguiente criterio:

- Si $0 \leq n_a \leq 0.1666$, selecciona el primer cromosoma.
- Si $0.1666 < n_a \leq (0.1666+0.2916)$ seleccionar el segundo cromosoma.
- Si $(0.1666+0.2916) < n_a \leq (0.1666+0.2916+0.4167)$ selecciona el tercer cromosoma.
- Si $(0.1666+0.2916+0.4167) < n_a \leq 1$ selecciona el cuarto cromosoma.

Suponga que se generan dos números aleatorios y se obtienen los siguientes cromosomas:

CAPÍTULO 3: OPTIMIZACIÓN DEL COSTO DE LA CONFIABILIDAD

Padre 1 11 10 00 00
Padre 2 01 00 01 01

El siguiente paso es utilizar el operador de cruzamiento. La forma más simple de utilizar este operador es mediante un punto de cruce, sin embargo, en este trabajo se utilizan dos puntos de cruce. En este operador dos puntos de cruzamiento son elegidos aleatoriamente y los bits entre estos dos puntos son intercambiados para crear un hijo. Suponga, que se obtienen los puntos en dos y en tres, entonces se generan los siguientes cromosomas:

Padre 1	11 10 00 00	Hijo 1	11 10 11 00
Padre 2	01 00 11 01	Hijo 2	01 00 00 01

La forma en que se selecciona un punto es mediante la generación de un número aleatorio " n_a " entre cero y uno con densidad uniforme. Para este caso, donde el cromosoma está formado por cuatro números (ocho bits) se tienen tres posibles puntos de cruce (entre cada número), de esta forma si " n_a " esta entre 0 y 0.3334 se obtiene el punto de cruce en la primera posición, si está entre 0.33341 y 0.6667 se obtiene la segunda posición y si es mayor a 0.6667 se obtiene la tercera posición.

Finalmente se aplica el operador de mutación a los hijos. Cada bit que compone los nuevos cromosomas tendrá una probabilidad de ser mutado, esta probabilidad varia de trabajo a trabajo pero suele estar entre 0.05% y 1%. Altos valores de mutación pueden ser necesarios para poblaciones pequeñas sin una gran cantidad de información genética. Cada bit que resulte mutado cambiara su valor, cero por uno o uno por cero. Con este operador se logra la diversidad genética. Suponga que en quinto bit del primer hijo resultó mutado, entonces se tendrían finalmente los nuevos cromosomas:

Hijo 1	11 10 <u>0</u>1 00
Hijo 2	01 00 00 01

Estos cromosomas son agregados a la nueva población. Para completar el resto de la población se sigue el mismo proceso; seleccionar padres de la rueda de la ruleta, combinarlos con el operador de cruzamiento y mutarlos. Al realizar los pasos, suponga que se tiene la segunda población mostrada en la tabla 3.2. En esta tabla también se muestran los nuevos valores de sus funciones objetivo.

Comparando las tablas 3.1 y 3.2 se observa que la segunda población es más apta que la primera, ya que el cromosoma más apto tomando ambas poblaciones se encuentra en la segunda, además tomando el promedio de la función objetivo de cada población se tienen mejores resultados en la segunda. De esta forma es cómo funciona el algoritmo genético, va creando poblaciones con cromosomas más aptos.

Tabla 3.2. Costos obtenidos de la segunda población.

No. de cadena	Cromosoma	Costo \$ (Función objetivo)
1	11 10 01 00	15,000
2	01 00 00 01	4,000
3	01 00 11 10	15,00
4	01 10 01 01	11,000
Suma		45,000
Promedio		11,250

Finalmente el algoritmo se termina cuando un criterio se cumple. En este trabajo se utilizan dos criterios. El primero consiste en detener el programa cuando la mejor solución no ha cambiado en un valor determinado de poblaciones. El segundo criterio detiene el programa cuando el valor de la función objetivo del cromosoma más apto es prácticamente igual al promedio del valor de la función objetivo de toda la población, en [13] se ha demostrado que cuando ambos valores son casi iguales el algoritmo genético ya no encontrará mejores soluciones, esto es importante porque este criterio puede evitar tiempo computacional. Así, en este trabajo el algoritmo se detendrá cuando el primero de ambos criterios se haya cumplido.

Aunque no se mencionó en el ejemplo que se abordó en esta sección, se utiliza en este trabajo un tercer operador para crear una nueva población, elitismo. Este operador simplemente agrega los cromosomas más aptos directamente a la nueva población, sin hacerles ningún cambio. El número de cromosomas que se elijan dependerá del tamaño de la población.

3.6 ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTO

A lo largo del capítulo se abordó el problema de la selección y la ubicación óptima de dispositivos de desconexión en un sistema de distribución. Se formuló en una primera instancia el problema de optimización (sección 3.2), donde se mostró claramente los dos planteamientos que se abordan en este trabajo. El primero, minimizar costos de inversión sujeto a restricciones de confiabilidad, y el segundo, minimizar el costo total de la confiabilidad, incluyendo los costos para proporcionar la confiabilidad y los costos incurridos asociados con interrupciones. Para ambos casos es necesario utilizar el método de confiabilidad de la sección 2.4, en el primer planteamiento para obtener los índices de confiabilidad y en el segundo planteamiento para obtener los costos debido a la frecuencia y duración de las fallas. En la sección 3.3 se abordó la representación de la solución mediante un mapa binario, esto es necesario ya que a partir de esto se pueden implementar los algoritmos de optimización discretos. En la sección 3.4 se abordó la técnica de búsqueda local, se ejemplificó como es el procedimiento del algoritmo llamado “escalada simple” para resolver el problema que se aborda en este trabajo. Finalmente en

la sección 3.5 se abordó los algoritmos genéticos, en este trabajo se utiliza un algoritmo genético simple, éste fue explicado para resolver el problema de selección y ubicación de dispositivos de desconexión.

En esta sección se presenta la conjunción de lo que se abordó en el capítulo dos y lo que se abordó en este capítulo. Se propone para formar el algoritmo de optimización utilizar primero el algoritmo genético simple y después el algoritmo de búsqueda local, llamado “escalada simple”. Se propone esto, ya que en la referencia [41] se comprueba que se obtienen mejores resultados cuando se abordan juntos que cuando se abordan separadamente. El diagrama de flujo del programa de optimización se muestra en la figura 3.7. Se puede observar que la metodología para analizar la confiabilidad en sistemas de distribución que fue presentada en la sección 2.4 se utiliza dentro del algoritmo genético para obtener la función objetivo y las restricciones de cada uno de los cromosomas. También, aunque no se muestra en el diagrama, este método de confiabilidad sirve para el mismo fin en el algoritmo de “escalada simple”.

Retomando lo que se abordó en la sección 3.4, el algoritmo de “escalada simple” inicia con una solución aleatoria. Sin embargo, en el algoritmo propuesto, en su lugar inicia con el resultado que arroja el algoritmo genético simple. Teniendo así como resultado final la solución que entregue el algoritmo de “escalada simple”. Este método de optimización fue desarrollado en lenguaje de programación Fortran y se presenta en el anexo C.

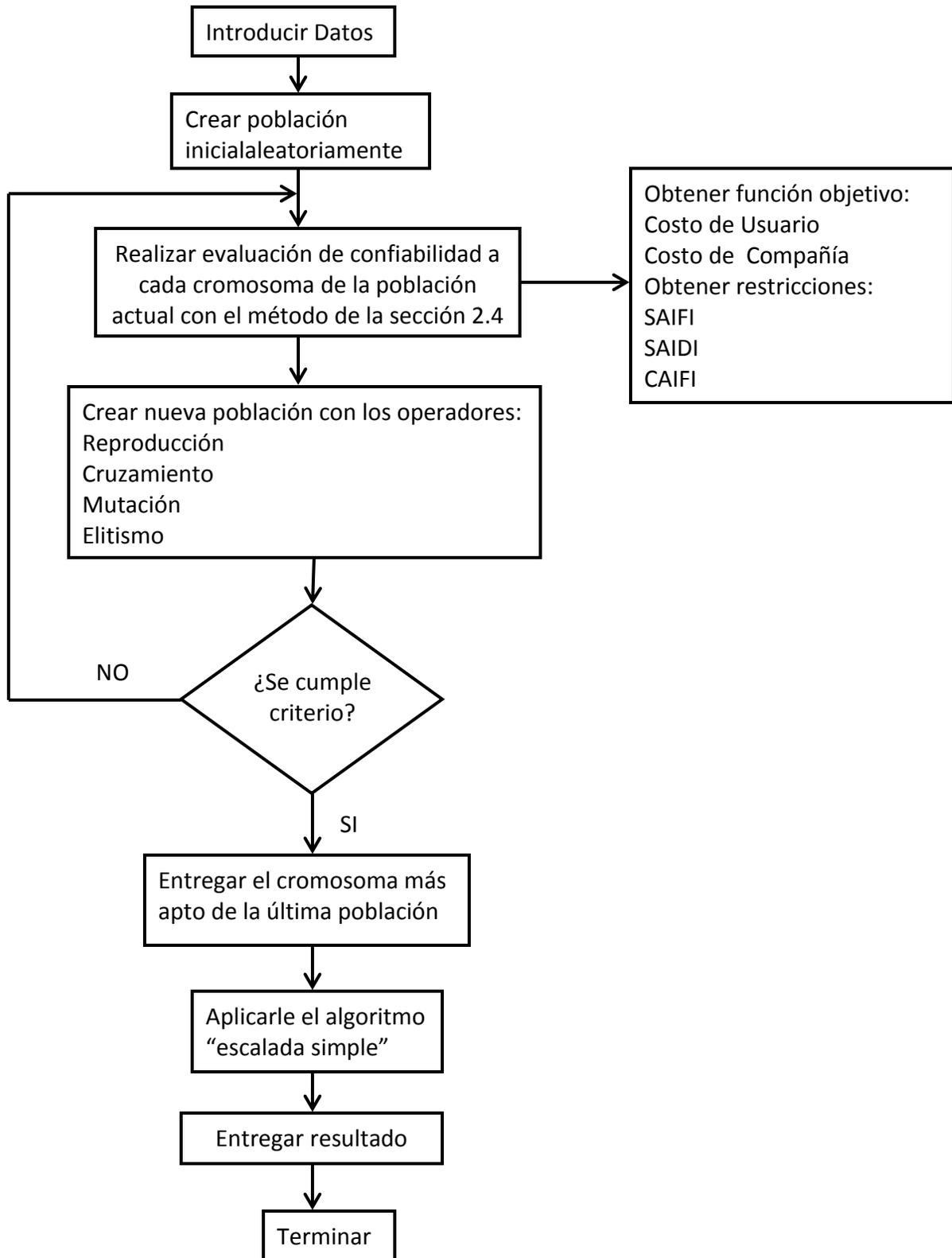


Figura 3.7. Diagrama de flujo del algoritmo de optimización propuesto.

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las pruebas y los resultados obtenidos de la optimización del costo de la confiabilidad que fue abordado en el capítulo 3. Se utilizaron dos alimentadores para la realización de las simulaciones, el primero es parte de una red de distribución prueba de la IEEE [1] y el segundo es un alimentador real de 23kV [2].

Para la realización de todas las pruebas que son presentadas en este capítulo se desarrolló un programa en Fortran, este se describe en el anexo D.

También se realizaron pruebas de confiabilidad con el algoritmo de la sección 2.4, los resultados son presentados en el anexo C.

4.2 PRUEBAS EN UN ALIMENTADOR DE LA IEEE

En esta sección se presentan las pruebas realizadas en el alimentador mostrado en la figura 4.1, este fue obtenido de la red de distribución prueba de la IEEE [1]. Como se observa en la figura, el alimentador está integrado por 12 secciones de líneas señaladas con el prefijo "L", 5 para formar el troncal y 7 para formar las laterales. En la tabla 4.1 se presentan sus longitudes, son importantes estos datos ya que las tasas de falla de las líneas se dan por kilómetro.

4.1. Longitud de las secciones de línea del alimentador prueba.

Longitud (km)	Número de sección del alimentador
0.60	2,6,10
0.75	1,4,7,9,12
0.80	3,5,8,11

Los datos de los siete puntos de carga que se encuentran en el alimentador se muestran en la tabla 4.2. Los puntos 1-5 son clientes residenciales mientras los puntos 6 y 7 son clientes comerciales, es importante tomara en cuenta esto ya que se toman diferentes costos por kWh y por kW no suministrados para clientes comerciales que para clientes residenciales.

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

Tabla 4.2. Datos de clientes del alimentador prueba.

Puntos de Carga	Tipo de cliente	Nivel de carga promedio (MW)	Nivel de carga pico (MW)	Número de clientes
1-4	Residencial	0.545	0.8869	220
5	Residencial	0.500	0.8137	200
6, 7	Comercial	0.415	0.6714	10

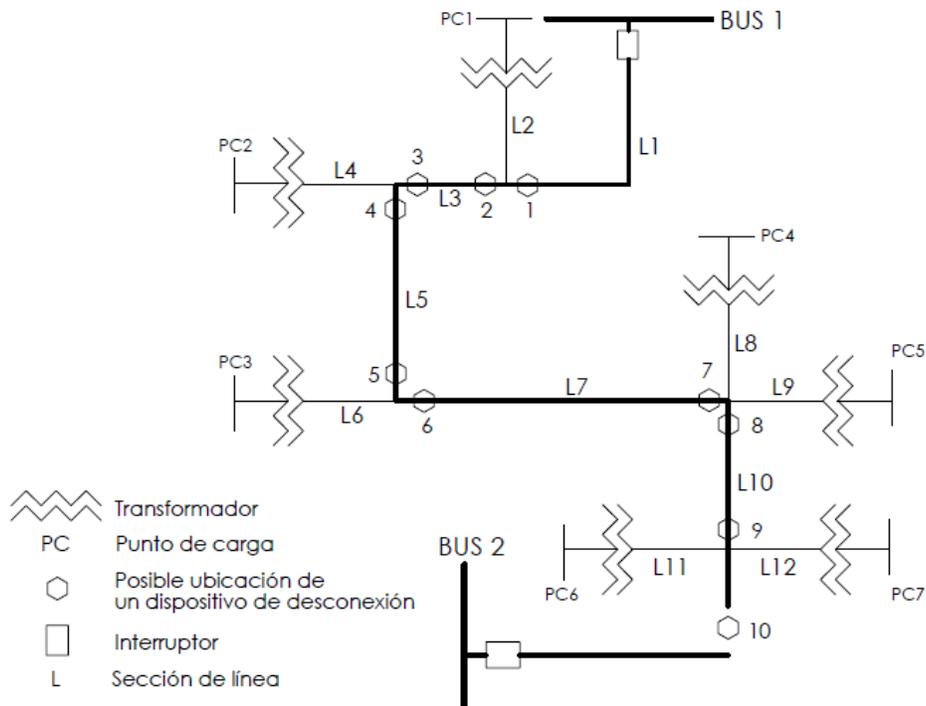


Figura 4.1 Alimentador prueba de la IEEE [1].

Tabla 4.3. Datos de confiabilidad de los componentes del alimentador prueba.

Componente	Tasa de falla permanente	Tiempo de reparación (Hrs)	Tiempo de recierre (Hrs)	Tiempo de conmutación (Hrs)
Transformadores de 11/0.45 kV	0.015	200		1
Interrupción	0.006	4	0.083	1
Líneas	0.065 (por km)	5		1
Bus	0.001	2	0.083	1

Los datos de confiabilidad de los componentes del alimentador prueba se muestran en la tabla 4.3, éstos servirán para realizar las evaluaciones de confiabilidad y a partir de ello

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

obtener los costos por frecuencia y duración de interrupciones (costos del cliente). Aunque no se señala en la tabla, se toma un 60% de probabilidad de que cuando ocurra una falla, ésta sea momentánea.

Se tienen diez posibles ubicaciones para la colocación de dispositivos de desconexión, como se muestra en la figura 4.1. En la ubicación diez, donde se trata de un lugar para la conexión a otro alimentador, se contempla la colocación de una cuchilla normalmente abierta (automatizada o no automatizada) para tener un suministro alterno, en las demás ubicaciones se contempla la colocación de cuchillas normalmente cerradas (automatizadas y no automatizadas) y de restauradores. Para el análisis se considera que hay un fusible al inicio de cada lateral.

Los costos que se toman por la colocación de los dispositivos se muestran en la tabla 4.4, estos fueron obtenidos de la referencia [43]. Estos costos son anualizados por lo que no es necesario utilizar la fórmula 3.3. Los costos por kWh y por kW no suministrados se muestran en la tabla 4.5, ellos también fueron obtenidos de dicha referencia, se toman diferentes costos para clientes comerciales que para clientes residenciales. Los costos que se presentan en ambas tablas están dados en dólares.

Tabla 4.4 Costos anualizados de los dispositivos de desconexión.

Dispositivo	Costo anualizado (dólares)
Cuchilla n.c. no automatizada	1,358
Cuchilla n.c. automatizada	6,297
Cuchilla n.a. no automatizada	1,358
Cuchilla n.a. automatizada	3,846
Restaurador	6,842

Tabla 4.5 Costos por energía y potencia no suministrada.

Tipo de cliente	Costo por kW (dólares)	Costo por kWh (dólares)
Residencial	0.01	2.68
Comercial	1.19	25.61

En esta sección sólo se aborda el problema de optimizar costos totales, los que se tienen debido a la frecuencia y duración de interrupciones, y los que se tienen debido a la colocación de dispositivos de desconexión en el alimentador. De esta forma se tiene el siguiente problema (ver sección 3.2):

Minimizar

$$C_{comp} + C_{client}$$

Dónde:

C_{client} = Costo del cliente debido a interrupciones de energía.

C_{comp} = Costo total de inversión de la compañía debido a la colocación de dispositivos de desconexión.

En el planteamiento anterior no se tiene restricción de la confiabilidad. Los resultados del problema de minimizar costos de inversión sujeto a los índices de confiabilidad se presenta en la sección 4.3.

El resto de la sección se divide en tres partes. En la primera se presentan pruebas realizadas con el algoritmo genético simple variando el tamaño de la población (ver sección 3.5), en esta parte también se presenta resultados obtenidos cuando se utilizan ambos algoritmos (genético simple y escalada simple). En la segunda parte se presentan pruebas realizadas con el algoritmo genético simple variando la tasa de mutación (ver sección 3.5), de igual forma se presentan resultados obtenidos cuando se utilizan ambos algoritmos. Finalmente, en la tercera parte se presentan pruebas utilizando únicamente el algoritmo “escalada simple”. Todas las pruebas se realizan al alimentador prueba de la IEEE que se muestra en la figura 4.1, con los datos que fueron presentados previamente. Para las pruebas se utilizó un procesador Intel (R) Core (TM) i5-2500 3.30 GHz, con memoria instalada (RAM) de 8.00 GB.

4.2.1 PRUEBAS CON EL ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE: VARIACIÓN DEL TAMAÑO DE LA POBLACIÓN

En esta sección se presentan las pruebas realizadas con el algoritmo genético simple que fue descrito en la sección 3.5.1, como se explicó, se tienen diversos parámetros, como el tamaño de la población y la tasa de mutación, que influyen directamente en el comportamiento del algoritmo. En estas pruebas se busca encontrar como influye el primero de estos dos parámetros, para ello se realizan diversas pruebas variando el tamaño de la población y dejando fijos los demás parámetros. Se toma para las simulaciones una tasa de mutación de 0.1% y un tamaño de población elite de uno, esto último refiere a que cuando se crea una nueva población se agrega directamente el cromosoma más apto de la última población. En cuanto al tamaño de la población se refiere al número de los cromosomas que se toman para su constitución. Los resultados son mostrados en la tabla 4.6.

Al haber diez posibles ubicaciones para colocar dispositivos de desconexión en el alimentador (ver figura 4.1) se tienen como resultados cadenas de diez números enteros, en la tabla 4.6 se muestran estos resultados en escala decimal, no se presentan en escala binaria para evitar poner cadenas más largas. De acuerdo a lo que se abordó en la sección 3.3, un “0” indica no colocar dispositivo, un “1” colocar una cuchilla no automatizada, un “2” colocar una cuchilla automatizada y un “3” colocar un restaurador. Así por ejemplo, la representación “0033032012” indica colocar restauradores en las ubicaciones 3, 4 y 6, colocar cuchillas automatizadas en las ubicaciones 7 y 10, y una cuchilla no automatizada en la ubicación 9.

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

Tabla 4.6 Resultados obtenidos variando el tamaño de la población para la ejecución del algoritmo genético.

Tamaño de la Población	Algoritmo Genético		Algoritmo Genético + "Escalada simple"		Generación de convergencia	Tiempo de ejecución (seg)
	Cadena	Costo total (dólares)	Cadena	Costo total (dólares)		
5	0033032012	66,133.79	0111011011	47,485.07	17	7
10	0021001102	50,178.93	0011001101	47,639.05	18	15
15	0011011101	49,178.57	0010011001	42,746.96	21	26
20	0012011002	48,652.74	0020011002	45,103.64	37	61
25	0000010101	42,569.12	0000010001	41,762.72	48	100
30	0120010101	49,078.96	0101010101	43,546.83	25	62
35	0001001001	40,096.94	0000001001	39,925.94	48	140
40	0000001101	43,378.79	0000001001	39,925.56	47	156
45	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	59	221
50	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	50	208
60	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	50	250
70	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	71	414

La generación de convergencia que se muestra en la tabla 4.6 se refiere al número de poblaciones que se tuvieron que crear para que el algoritmo genético entregará el resultado. Así por ejemplo, con un tamaño de población de 15 se crearon 21 poblaciones para obtener el resultado final. Para los resultados obtenidos en dicha tabla, el criterio de convergencia fue cuando el cromosoma más apto no mejoraba en diez generaciones o cuando la división entre costo del cromosoma más apto y el costo promedio de la población era superior a 0.98.

De la tabla 4.6 se tienen los siguientes tres análisis:

1. El tamaño de la población influye directamente en el resultado final del algoritmo genético. Con poblaciones chicas se obtienen costos mayores de los que se obtienen con poblaciones grandes. Sin embargo, llega un punto en que no mejora la solución aunque aumente el tamaño de la población. Como se observa en la tabla, este punto fue en "45", ya que con tamaños de población igual o mayor a él se obtiene el mismo resultado. El comportamiento del costo total en relación al tamaño de la población para el caso de análisis puede ser visualizado en la gráfica de la figura 4.2.
2. El utilizar ambos algoritmos (genético y escalada simple) es benéfico con tamaños de población chicos. Como se observa en la tabla, con un tamaño de población de 10 se obtuvo sólo con el algoritmo genético un costo de 66,133.79, este fue reducido a 47,485.07 cuando se utilizaron ambos algoritmos. Algo similar pasa con poblaciones de hasta 40. Sin embargo, con tamaños de población de 45 o más no se tuvo ningún beneficio cuando se utilizaron ambos algoritmo, ya que entregaba el mismo costo del que arroja el algoritmo genético.

3. El tamaño de la población influye directamente en la generación de convergencia. En general, entre mayor sea el tamaño de la población, mayor será la generación en que convergerá el algoritmo genético. Por ejemplo, para este caso de análisis, para un tamaño de población de 10 la generación de convergencia fue en 18, esta aumentó a 71 con un tamaño de población de 70. Esto obviamente tiene un impacto en el tiempo de ejecución del algoritmo genético, ya que se tendrán que evaluar más poblaciones que son de mayor tamaño. Esta relación tiempo-tamaño de población se puede visualizar en la gráfica que se muestra en la figura 4.3.

El decir cuando una población es chica o grande va depender del caso particular que se esté analizando, por ello es conveniente realizar varias simulaciones con diferentes tamaños de población, para asegurar un mejor resultado. También aunque aquí se mostró que el algoritmo de búsqueda local (escalada simple) no representa ningún beneficio cuando se utiliza con un algoritmo genético con poblaciones grandes, si tiene un beneficio con tamaños de población chicos. Por ello, para asegurar un mejor resultado es conveniente utilizar ambos algoritmos. También esto último es benéfico, ya que se pueden tomar tamaños de población menores y tener buenos resultados, reduciendo además el tiempo de ejecución.

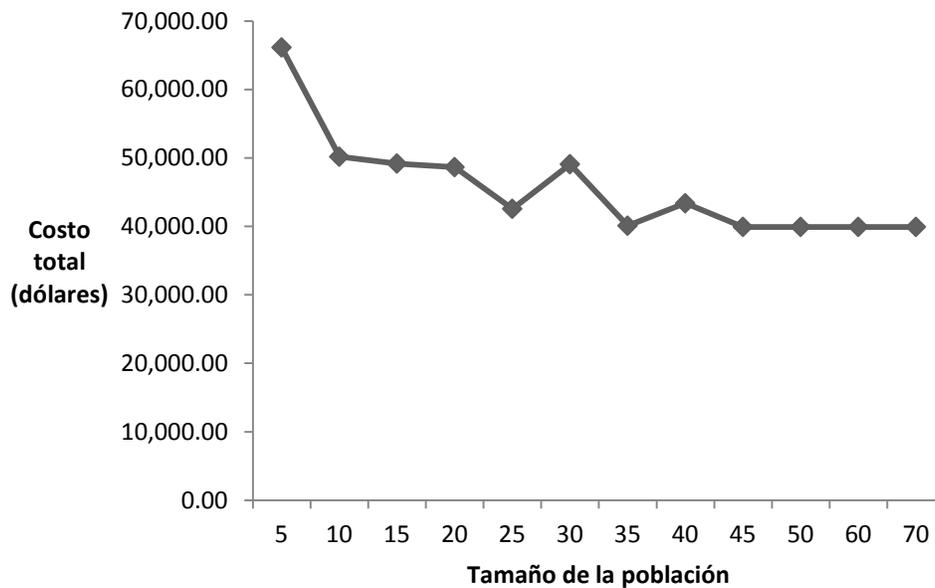


Figura 4.2 Costo total en relación al tamaño de la población.

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

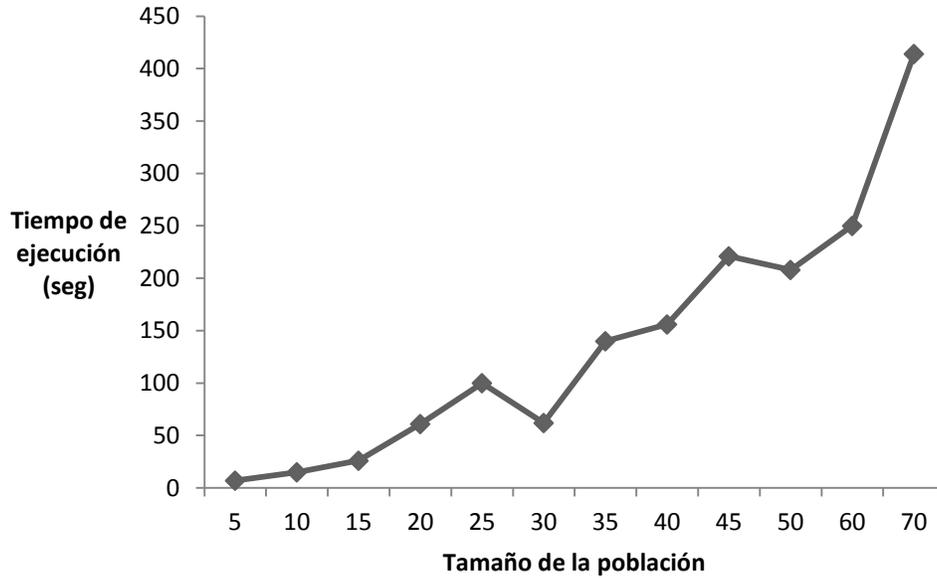


Figura 4.3 Tiempo de ejecución en relación al tamaño de la población.

En las figuras 4.4 y 4.5 se muestra el comportamiento del algoritmo genético a lo largo de su ejecución cuando se utilizan tamaños de población de 10 y 70, respectivamente. Como se observa, en la primera generación se tiene un costo total promedio de la población alto, cuando va creando nuevas poblaciones van mejorando estos costos, hasta que llega un punto en que no pueden mejorarse, de acuerdo a los criterios de convergencia que se utilizaron.

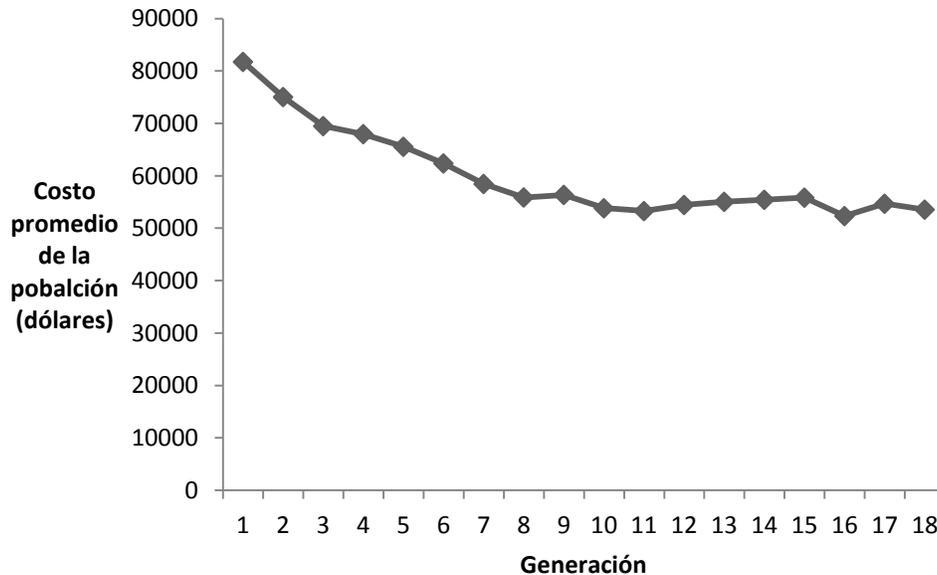


Figura 4.4. Comportamiento del algoritmo genético con un tamaño de la población de 10.

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

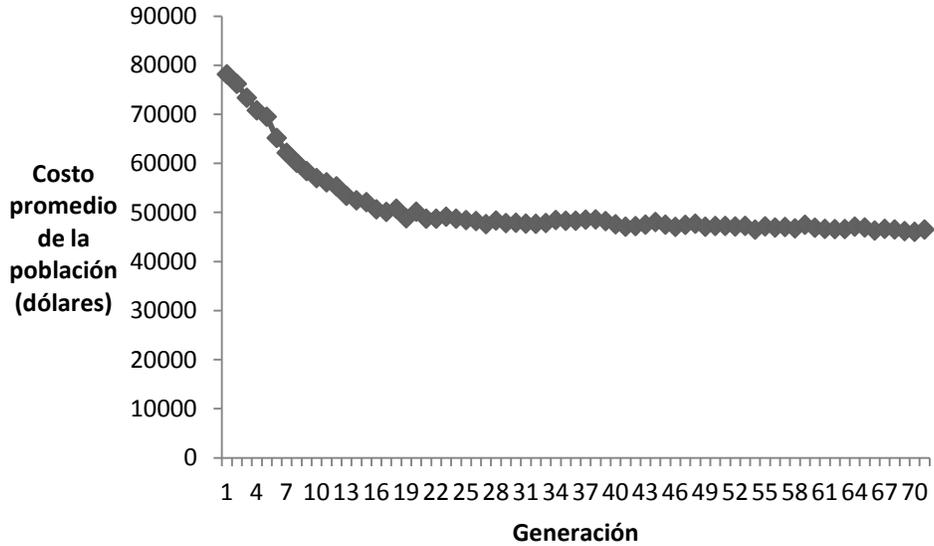


Figura 4.5. Comportamiento del algoritmo genético con un tamaño de la población de 70.

Para analizar lo que se planteó en un principio de la tesis, donde se dijo que puede haber dispositivos de más o mal ubicados que tengan poco o ningún efecto sobre la confiabilidad, se toman algunas cadenas de las que se obtuvieron en la tabla 4.6 y se obtienen sus índices de confiabilidad. El resultado es el siguiente:

Cadena	SAIFI	SAIDI	MAIFI
0111011011	0.126	1.43	0.407
0011001101	0.122	1.42	0.406
0120010101	0.126	1.43	0.409
0000001001	0.127	1.52	0.406

Como se observa en los resultados anteriores, se puede tener confiabilidades similares o mejores con menos dispositivos pero en ubicaciones diferentes. Por ejemplo, en la primera cadena se tienen 7 cuchillas no automatizadas y se tienen índices de confiabilidad similares y en algunos casos peores que con la segunda cadena que sólo tiene 5 cuchillas automatizadas. Comparando la segunda y tercera cadena se observa que tienen en ambos casos 5 dispositivos de desconexión puestos en el alimentador, sin embargo se tienen una mejor confiabilidad con la segunda combinación que con la tercera, además, la tercera combinación es más costosa ya que tiene una cuchilla automatizada. Así, la selección y la ubicación de los dispositivos de desconexión juegan un papel importante en la confiabilidad y una correcta elección hará que se tengan confiabilidades mejores o similares con menores costos de inversión.

De acuerdo a todos los resultados que se obtuvieron en estas pruebas, el mejor resultado se obtiene con la cadena "0000001001", es decir, con una cuchilla no automatizada en las posiciones 7 y 10, como se muestra en la figura 4.6. Como se mencionó antes, en el alimentador se consideró la ubicación de fusibles al inicio de las siete laterales.

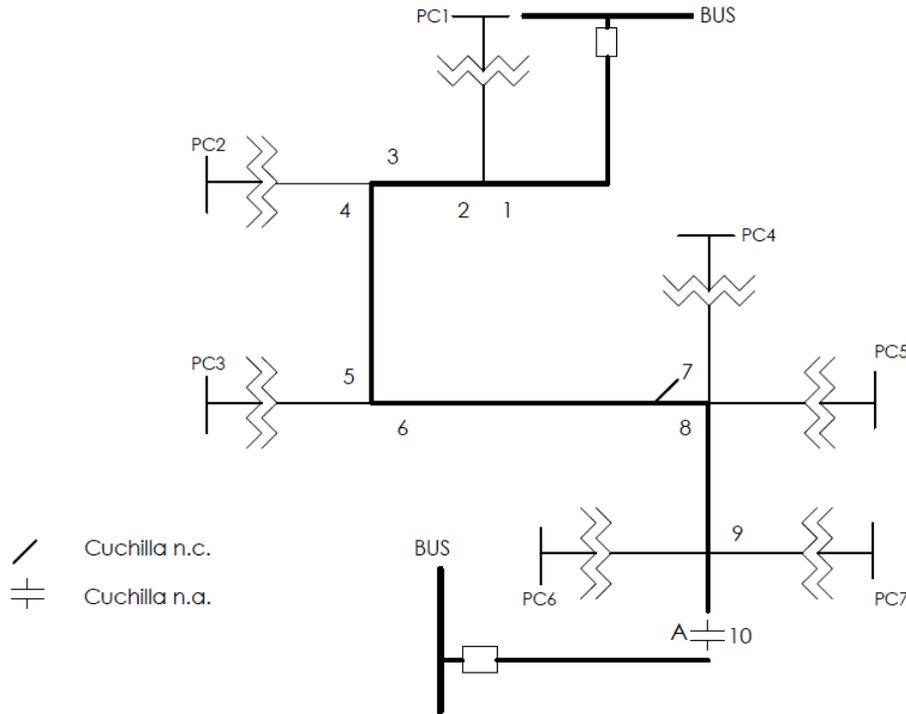


Figura 4.6. Ubicación final de los dispositivos de desconexión en el alimentador prueba utilizando un algoritmo genético simple.

4.2.2 PRUEBAS CON EL ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE: VARIACIÓN DE LA TASA DE MUTACIÓN

Se realizaron pruebas variando la tasa de mutación, dejando fijo los demás parámetros que se utilizan en el algoritmo genético simple. Como se explicó en el capítulo 3, la tasa de mutación es la probabilidad de que cada bit de cada cromosoma que integra una nueva población sea cambiado, en representación binaria, es cambiar cero por uno o viceversa. En estas pruebas se realizaron también simulaciones para diferentes tamaños de población, los resultados son mostrados en las tablas 4.7-4.11, para tasas de mutación de 0.01%, 0.05%, 0.1%, 0.5% y 1% respectivamente.

Tabla 4.7 Resultados obtenidos variando el tamaño de la población y con tasa de mutación de 0.01%.

Tamaño de la Población	Algoritmo Genético		Algoritmo Genético + "Escalada simple"		Generación de convergencia	Tiempo de ejecución (seg)
	Cadena	Costo total (dólares)	Cadena	Costo total (dólares)		
5	0033032012	66,133.79	0111011011	47,485.07	17	7
10	0021000112	54,677.66	0010000111	44,322.65	28	23
20	0010100101	45,218.55	0020100101	45,115.98	36	60
35	0010001001	40,451.42	0000001001	39,925.56	37	107
60	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	46	230

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

Tabla 4.8 Resultados obtenidos variando el tamaño de la población y con tasa de mutación de 0.05%.

Tamaño de la Población	Algoritmo Genético		Algoritmo Genético + "Escalada simple"		Generación de convergencia	Tiempo de ejecución (seg)
	Cadena	Costo total (dólares)	Cadena	Costo total (dólares)		
5	0033032012	66,133.79	0111011011	47,485.07	17	7
10	0021001102	50,178.93	0011001101	47,639.05	18	15
20	0110010011	47,997.64	0110011011	45,193.68	34	56
35	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	40	116
60	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	37	185

Tabla 4.9 Resultados obtenidos variando el tamaño de la población y con tasa de mutación de 0.1%.

Tamaño de la Población	Algoritmo Genético		Algoritmo Genético + "Escalada simple"		Generación de convergencia	Tiempo de ejecución (seg)
	Cadena	Costo total (dólares)	Cadena	Costo total (dólares)		
5	0033032012	66,133.79	0111011011	47,485.07	17	7
10	0021001102	50,178.93	0011001101	47,639.05	18	15
20	0012011002	48,652.74	0020011002	45,103.64	37	61
35	0001001001	40,096.94	0000001001	39,925.56	48	140
60	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	50	250

Tabla 4.10 Resultados obtenidos variando el tamaño de la población y con tasa de mutación de 0.5%.

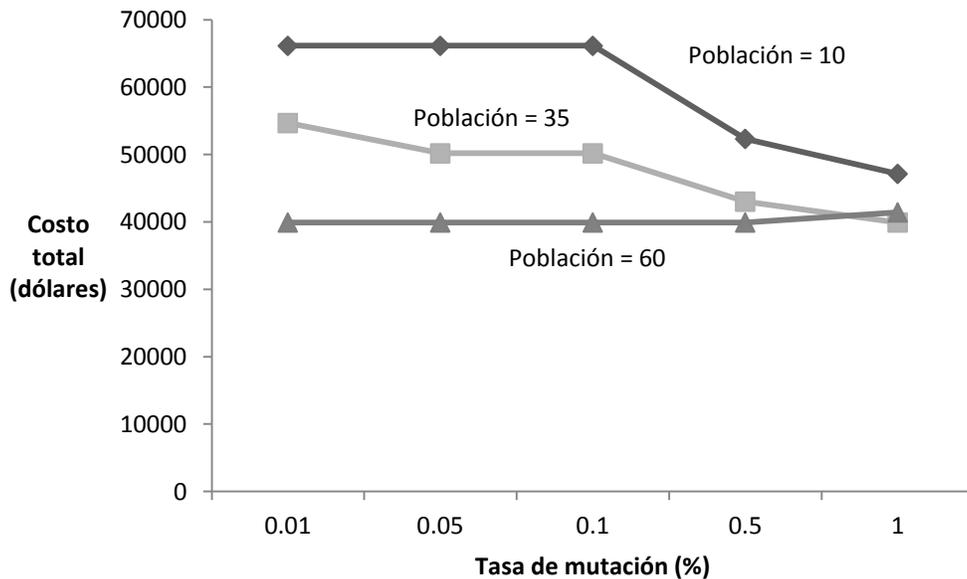
Tamaño de la Población	Algoritmo Genético		Algoritmo Genético + "Escalada simple"		Generación de convergencia	Tiempo de ejecución (seg)
	Cadena	Costo total (dólares)	Cadena	Costo total (dólares)		
5	0011100011	52,330.46	0011110011	49,049.52	54	22
10	0001001011	43,011.48	0001001011	43,011.48	49	40
20	0000010101	40,921.10	0000010101	40,921.10	63	105
35	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	70	204
60	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	91	455

Tabla 4.11 Resultados obtenidos variando el tamaño de la población y con tasa de mutación de 1%.

Tamaño de la Población	Algoritmo Genético		Algoritmo Genético + "Escalada simple"		Generación de convergencia	Tiempo de ejecución (seg)
	Cadena	Costo total (dólares)	Cadena	Costo total (dólares)		
5	0000100101	47,137.54	1000100101	44,661.68	82	34
10	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	43	35
20	0000001001	39,925.56	0000001001	39,925.56	101	168
35	0010001001	40,451.42	0000001001	39,925.56	107	312
60	0000001101	41,423.38	0000001001	39,925.56	197	960

En las cinco tablas se observa que el tiempo de ejecución aumenta cuando el tamaño de población aumenta, sin importar la tasa de mutación. Además se tienen los siguientes dos análisis:

1. La tasa de mutación tiene un mayor impacto en el resultado cuando menor es el tamaño de la población. Como se observa en las tablas, una menor tasa de mutación hará que se tenga un mayor costo o un peor resultado con poblaciones chicas. Por ejemplo, con una población de 10 se tiene un costo de 54,677.66 cuando la tasa de mutación es de 0.01%, sin embargo, este resultado se va reduciendo conforme se aumenta la tasa de mutación, este comportamiento puede ser visualizado en la figura 4.7. En cambio con una población de 60 o más el costo o el resultado final no varía en gran medida cuando se varía la tasa de mutación. Así, se puede decir que cuando se utilizan tamaños de población chicos se pueden utilizar tasas de mutación grandes para obtener mejores resultados. Obviamente, hay un punto en que ya no se reducirá el costo aunque se tomen tasas más grandes.
2. En general, con tasas de mutación más grandes se tendrán tiempos de ejecución mayores. Como se muestra en las cinco tablas, la generación de convergencia aumenta cuando aumenta la tasa de mutación. Por ejemplo, con una tasa de 0.01% y un tamaño de población de 60, se tiene una generación de convergencia en 46, esta aumenta a 197 cuando se aumenta la tasa de mutación a 1%. Esto obviamente hace que aumente el tiempo de ejecución, ya que se tienen que evaluar más generaciones. Esta relación tiempo de ejecución-tasa de mutación se muestra en las figuras 4.8 y 4.9.



CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

Figura 4.7. Variación del costo con diferentes tasas de mutación y diferentes tamaños de población.

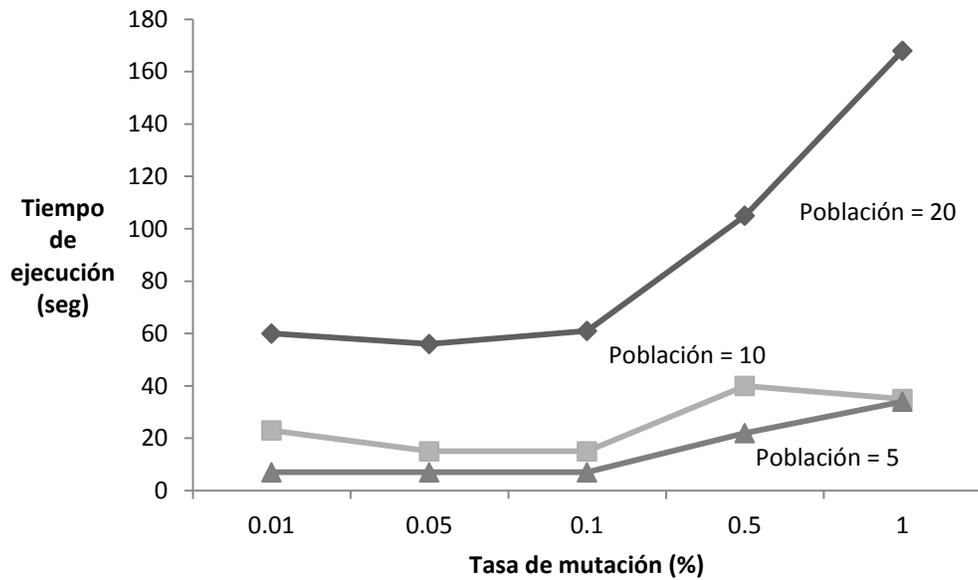


Figura 4.8. Variación del tiempo de ejecución con diferentes tasas de mutación y con tamaños de población de 5, 10 y 20.

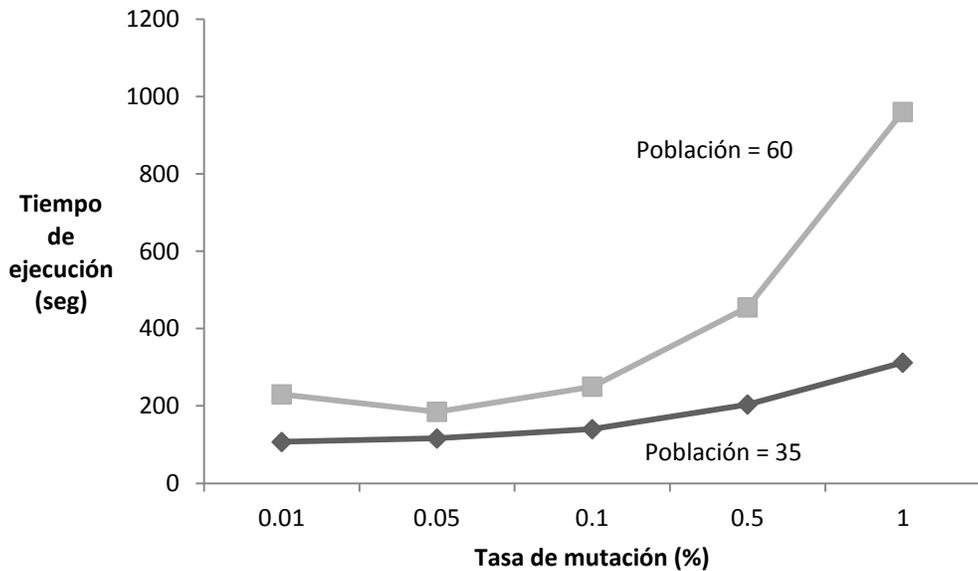


Figura 4.9. Variación del tiempo de ejecución con diferentes tasas de mutación y con tamaños de población de 35 y 60.

Se puede con lo visto en las cinco tablas y en las tres figuras concluir que cuando se utilizan tamaños de población chicos se tienen que usar tasas de mutación grandes para

obtener mejores resultados, con el conocimiento que hay un límite en que ya no mejora la solución aunque se aumente la tasa de mutación. En caso de que se utilicen poblaciones grandes, se tienen que tomar tasas de mutación chicas, ya que con ellas se tienen buenos resultados y los tiempos de ejecución se reducen. Sin embargo, como ya se mencionó anteriormente, el decir cuando una población es chica o grande va depender del caso particular que se esté analizando, por lo que es muy difícil saber qué tamaño de población y qué tasa de mutación es la ideal para un caso particular, por lo que para obtener mejores resultados se tienen que realizar diversas simulaciones variando estos parámetros. En este caso, de acuerdo a lo obtenido, el mejor resultado se obtiene con la cadena "0000001001", es decir, con una cuchilla no automatizada en las posiciones 7 y 10, como se muestra en la figura 4.6.

4.2.3 PRUEBAS CON EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA LOCAL (ESCALADA SIMPLE)

En esta sección se presentan los resultados de optimizar los costos totales utilizando el algoritmo "escalada simple", sin utilizar el algoritmo genético simple. En la tabla 4.12 se muestran las soluciones obtenidas a partir de generar soluciones iniciales aleatorias. Como se observa, el costo de las soluciones iniciales varían de forma amplia, los costos van desde 69,107.70 hasta 104,169.13, sin embargo, los costos de las soluciones finales varían pero en un rango menor, la solución menos costosa fue de 42,484.07 y la más costosa fue de 49,117.24. No se tienen ninguna relación del costo final con el costo inicial, es decir, que costos altos de soluciones iniciales no llevaran, en general, a obtener costos mayores de los que se tendría con costos iniciales menores.

Estos costos obtenidos en la tabla 4.12 comparados con los que se obtuvieron en las secciones 4.2.1 y 4.2.2 en donde se utilizó el algoritmo genético no son muy superiores. En algunos de los casos son mejores, por ejemplo, cuando se utilizaban tamaños de población chicos con tasas de mutación chicos, sólo con el algoritmo genético se obtenían costos superiores a los 50,000, estos costos fueron mayores a los que se obtuvieron sólo con el algoritmo de "escalada simple". Sin embargo, los costos de la tabla 4.12 no fueron mejores de aquellos que se obtuvieron con el algoritmo genético con poblaciones grandes o con tasas de mutación grande. De esta forma, el algoritmo de "escalada simple" presenta una buena alternativa para resolver un problema de optimización, aunque en general no presenta mejores resultados que el algoritmo genético, si entrega soluciones que tienen costos cercanos a los del algoritmo genético con un tiempo de ejecución menor. Hay que tener en cuenta, que se deben realizar diversas simulaciones con diversas soluciones aleatorias iniciales para garantizar mejores resultados, además, estas pruebas y análisis que se obtuvieron son para un caso particular donde las posibles ubicaciones para colocar los dispositivos fueron 10, tal vez con sistemas de distribución más grandes donde se tengan cientos de posibles ubicaciones los costos que arroje el algoritmo de "escalada simple" sean mucho mayores o más alejados de aquellos que se puedan obtener con el algoritmo genético.

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

Tabla 4.12. Resultados obtenidos utilizando el algoritmo de "escalada simple".

Solución Inicial	Costo Inicial (dólares)	Solución Final (dólares)	Costo Final	Tiempo de ejecución (s)
0023303102	69,107.70	0000100101	44,661.50	7
0223232323	98,289.50	0001000001	43,127.67	15
0023231330	97,987.82	0100001101	45,043.52	11
3112133331	93,746.43	0000101011	45,270.07	13
3023121113	82,345.09	1101101111	47,371.23	8
1033210032	82,048.12	0001000101	43,915.37	13
3021011010	66,355.90	1000001011	42,484.07	12
3033013000	88,927.14	1011010000	49,117.24	13
3303232211	104,169.13	0000012111	47,457.79	18
3221010032	89,248.40	0100010011	45,640.98	8

De acuerdo a lo obtenido con las simulaciones que se realizaron en esta sección, la solución que se tomaría como la final sería "1000001011", es decir con cuchillas no automatizadas en las ubicaciones 1, 7, 9 y 10, como se muestra en la figura 4.10, teniendo un costo total de 42,484.07.

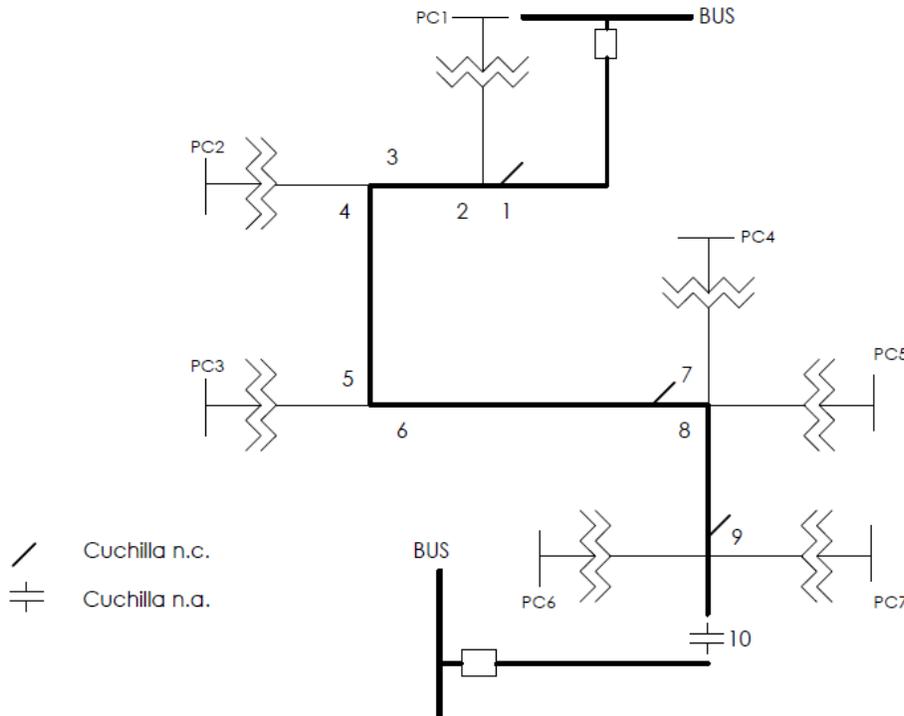


Figura 4.10. Ubicación final de los dispositivos de protección en el alimentador prueba utilizando un algoritmo de búsqueda local (escalada simple).

4.3 PRUEBAS EN UN ALIMENTADOR REAL

En esta sección se presentan algunos casos prácticos y algunos beneficios de utilizar el algoritmo de optimización descrito en el capítulo 3. No se pretende analizar a fondo las características del algoritmo genético y del algoritmo de búsqueda directa, estas fueron ya abordadas en la sección 4.2. Para las pruebas se utiliza el alimentador de 23kV [2] mostrado en la figura 4.11. Los datos detallados de cada una de las secciones de línea que integran el alimentador, así como los puntos dónde se encuentran las cargas y sus características se presentan en el anexo D.

La ubicación de los dispositivos de desconexión que se tiene hasta la fecha en el alimentador se muestra en la figura 4.12. Como se observa, se encuentran 33 fusibles, un restaurador, el interruptor de la subestación, 15 cuchillas normalmente cerradas (ninguna automatizada) y cuatro cuchillas normalmente abiertas (ninguna automatizada), tres de las cuales están conectadas a alimentadores vecinos.

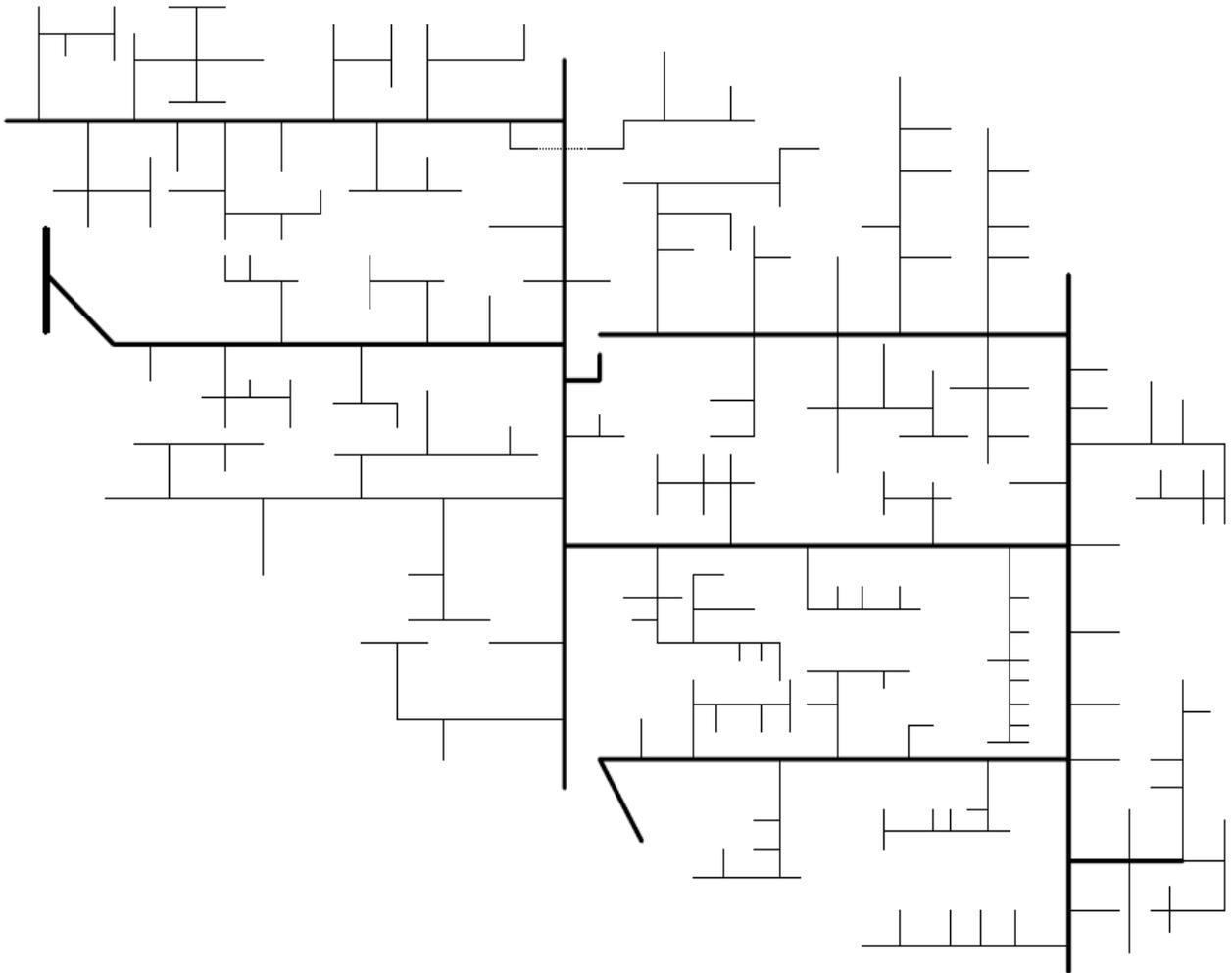


Figura 4.11. Alimentador real de 23kV.

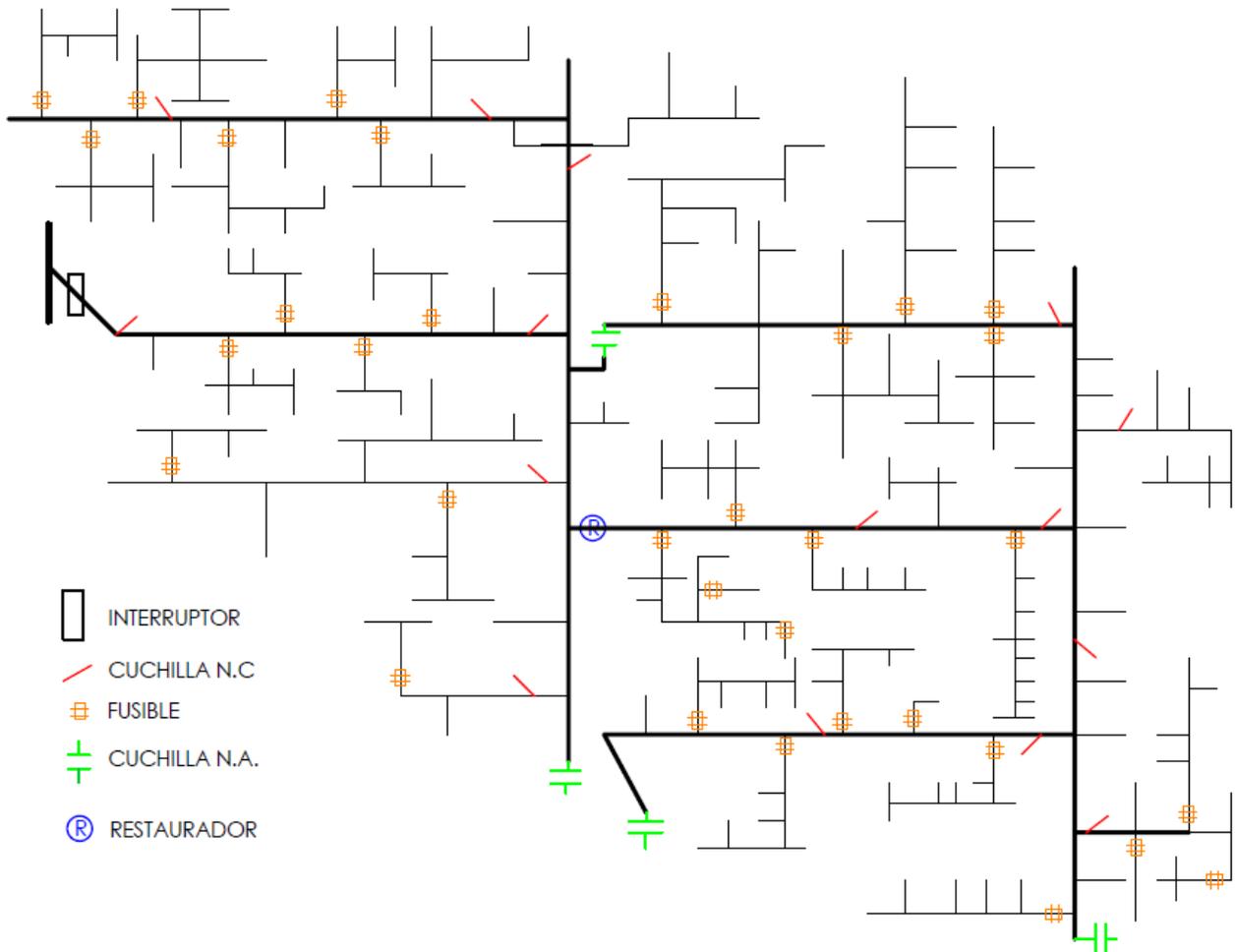


Figura 4.12. Alimentador con sus dispositivos de desconexión actuales.

Para realizar las pruebas se utilizaron los datos de confiabilidad de los componentes que se proporcionan en las referencias [1,52], no se tomaron datos reales ya que no fue posible obtenerlos. En la tabla 4.13 se presentan estos datos.

Como se observa en la tabla 4.13, se utilizarán tasas de fallas momentáneas en los componentes, por lo que será utilizado el esquema “Restaurador-Fusible” que se describe en la sección 2.3.2.3y cuyos resultados son presentados en la sección B.2.4 (anexo B).

El tiempo de apertura y cierre para cuchillas no automatizadas se toma de hora y media, y para cuchillas automatizadas se toma de cinco minutos.

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

4.13. Datos de confiabilidad utilizados en el alimentador real.

Componente	Tasa de falla permanente (fallas/año)	Tasa de falla momentánea (fallas/año)	Tiempo de reparación de falla (horas)
Bus	0.001	0.01	2
Línea	0.046 (por km)	0.06 (por km)	8
Transformadores	0.005	0.01	10
Cuchillas	0.002		5
Fusibles	0.003		3
Restaurador e Interruptor	0.022		6

Lo primero que se realizó fue evaluar la confiabilidad del alimentador con sus actuales dispositivos de desconexión, como se muestra en la figura 4.12, para ello se utilizó el algoritmo de confiabilidad presentado en la sección 2.4. Se considera la presencia de un transformador en todos los puntos de carga, por lo que en ellos se realizó las adecuaciones necesarias. Los índices de confiabilidad obtenidos se muestran en la tabla 4.14.

Tabla 4.14. Índices de confiabilidad del alimentador con los dispositivos de desconexión actuales.

SAIFI	SAIDI	MAIFI	ENS*
0.896006	2.411097	2.856647	24357.02

*La energía no suministrada está dada en kWh.

A partir de este análisis previo se realizan tres pruebas que serán presentadas en las siguientes secciones. En la primera se busca una selección y ubicación de los dispositivos de desconexión diferente a la que se tiene actualmente, pero que proporcione una confiabilidad similar, minimizando costos de inversión de la compañía. En la segunda prueba se busca la ubicación de nuevos dispositivos de desconexión a partir de los actuales, para mejorar la confiabilidad del alimentador, minimizando costos de inversión de la compañía. Y en la tercera prueba se busca una nueva ubicación de los dispositivos de desconexión, de tal forma que minimice los costos totales de la compañía. Los tres casos serán abordados más afondo en las siguientes tres secciones.

En estas pruebas se va realizar una modificación de lo que se realizó en la sección 4.2 y se explicó en la sección 3.3. En estas pruebas se va tomar también en cuenta la colocación de fusibles y de cuchillas no automatizadas o automatizadas en las laterales del alimentador, a diferencia de lo que se hizo en la sección 4.2, dónde sólo se consideró la ubicación de restauradores o de cuchillas en el trocal, sin tomar en cuenta las laterales. Para ello, cuando se tenga una posible ubicación se debe de especificar si está sobre el trocal o

sobre una lateral. De esta forma se tienen las siguientes dos representaciones de soluciones.

En laterales:

Representación decimal	Representación binaria	Acción a tomar
0	00	No colocar dispositivo
1	01	Colocar cuchilla no automatizada
2	10	Colocar cuchilla automatizada
3	11	Colocar fusible

En el troncal:

Representación decimal	Representación binaria	Acción a tomar
0	00	No colocar dispositivo
1	01	Colocar cuchilla no automatizada
2	10	Colocar cuchilla automatizada
3	11	Colocar Restaurador

Así por ejemplo, en un alimentador con 15 posibles ubicaciones de dispositivos de desconexión, donde las primeras diez se encuentran sobre el troncal y las últimas cinco sobre laterales. Una cadena de números decimales como “0010030010333303” representará colocar cuchillas no automatizadas en las ubicaciones 3 y 9, un restaurador en la ubicación 5 y un fusible en las ubicaciones 11, 12, 13 y 15.

4.3.1 PRUEBA UNO: MISMA CONFIABILIDAD

En esta prueba se busca encontrar una nueva ubicación de los dispositivos de desconexión con el programa de optimización descrito en el capítulo 3, de tal forma que proporcionen la misma confiabilidad de la que tiene el alimentador con sus dispositivos actuales. Para ello se partirá del alimentador sin ningún dispositivo puesto en él, como se muestra en la figura 4.11.

En la figura 4.13 se muestra las posibles ubicaciones en donde se pueden colocar los dispositivos de desconexión. Como se observa, hay 43 posibles ubicaciones sobre el troncal, 64 sobre laterales y 4 para la posible conexión a otros alimentadores o hacia otro punto del troncal. De esta forma, las representaciones de las soluciones serán mediante cadenas de 111 números binarios, cada uno de dos bits. En el caso de la colocación de cuchillas normalmente abiertas para la conexión a otros alimentadores, sólo se proponen ubicaciones como las que se muestran en la figura 4.12, ya que no se tiene conocimiento de que sea posible otra posible colocación de estos dispositivos.

Los precios de los dispositivos de desconexión se tomaron de las referencias [76,77]. Éstos fueron anualizados de acuerdo a la fórmula 3.3 que se presenta en la sección 3.2.1.1, para ello se tomó un tiempo de vida de 30 años en caso de cuchillas y restauradores, y de un

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

año en caso de fusibles. También se tomó el 1% del precio del dispositivo para costos de mantenimiento y operación anual, y una tasa de descuento (tasa de depreciación) del 1%. Estos costos se muestran en la tabla 4.15.

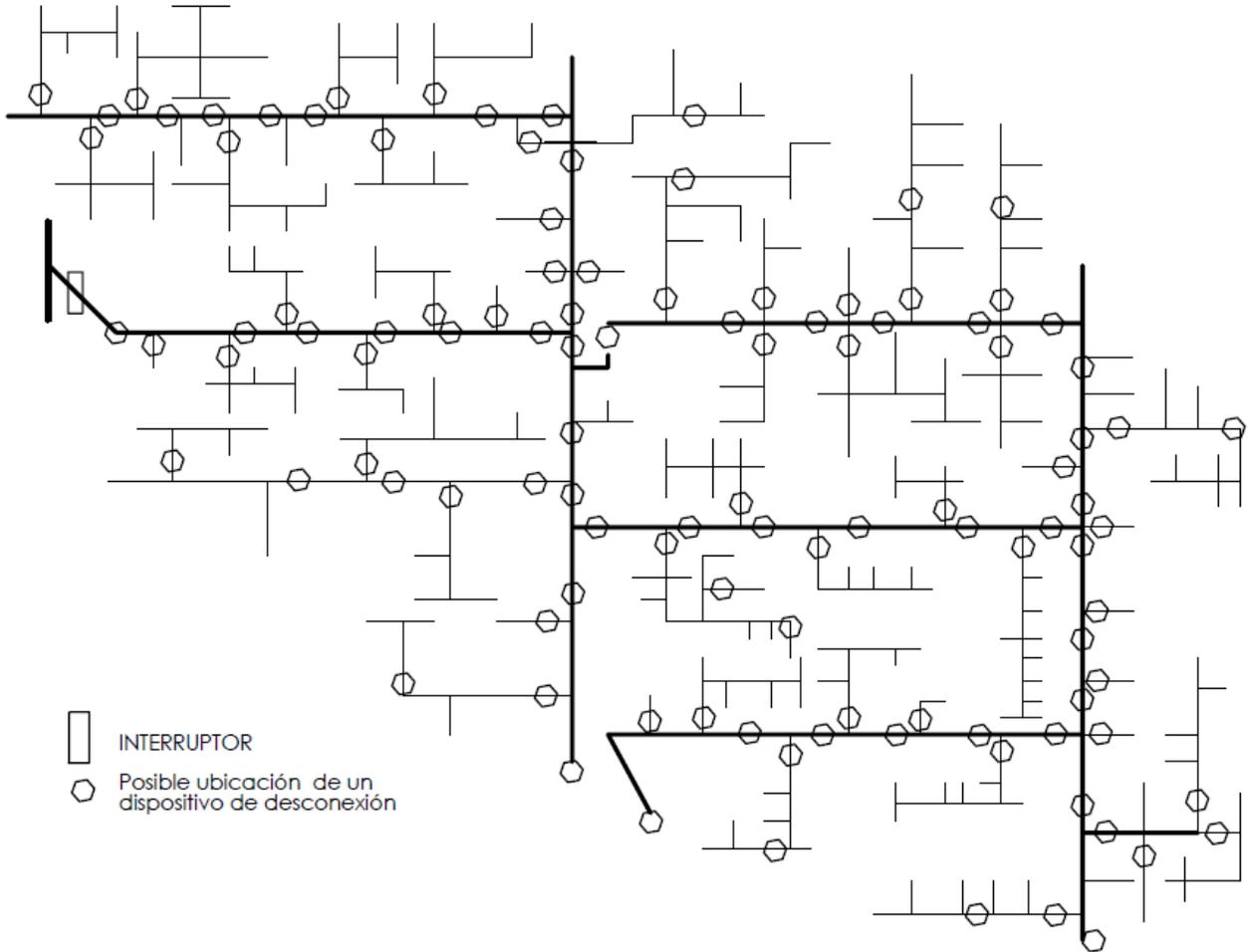


Figura 4.13. Posible ubicación de los dispositivos de desconexión en el alimentador real.

Tabla 4.15. Costos de los dispositivos de desconexión para la colocación en el alimentador real.

Dispositivo	Costo Normal (\$)	Costo anualizado (\$)
Fusible	2,208.78	2,252.94
Cuchilla no automatizada	68,613.00	3,344.75
Cuchilla automatizada	194,500.8	9,481.61
Restaurador	290,160.90	14,144.78

Como se quiere obtener la misma confiabilidad a la actual (ver tabla 4.14), el problema de optimización que se aborda en esta prueba es el siguiente:

Minimizar

$$C_{comp} = \sum_{i=1}^{nd} Ca_i$$

Sujeto a

$$\begin{aligned} SAIFI_o &\leq 0.896 \\ SAIDI_o &\leq 2.411 \\ MAIFI_o &\leq 2.85 \end{aligned}$$

Dónde:

C_{comp} = Costo total de inversión de la compañía debido a la colocación de dispositivos de desconexión.

Ca_i = Costo anualizado del dispositivo de desconexión i .

nd = Número de dispositivos de desconexión puestos en el sistema.

De esta forma se busca colocar dispositivos de protección de tal forma que proporcione menos de 0.897 fallas sostenidas al año por usuario, menos de 2.412 horas de interrupción al año por usuario y menos de 2.851 fallas momentáneas al año por usuario.

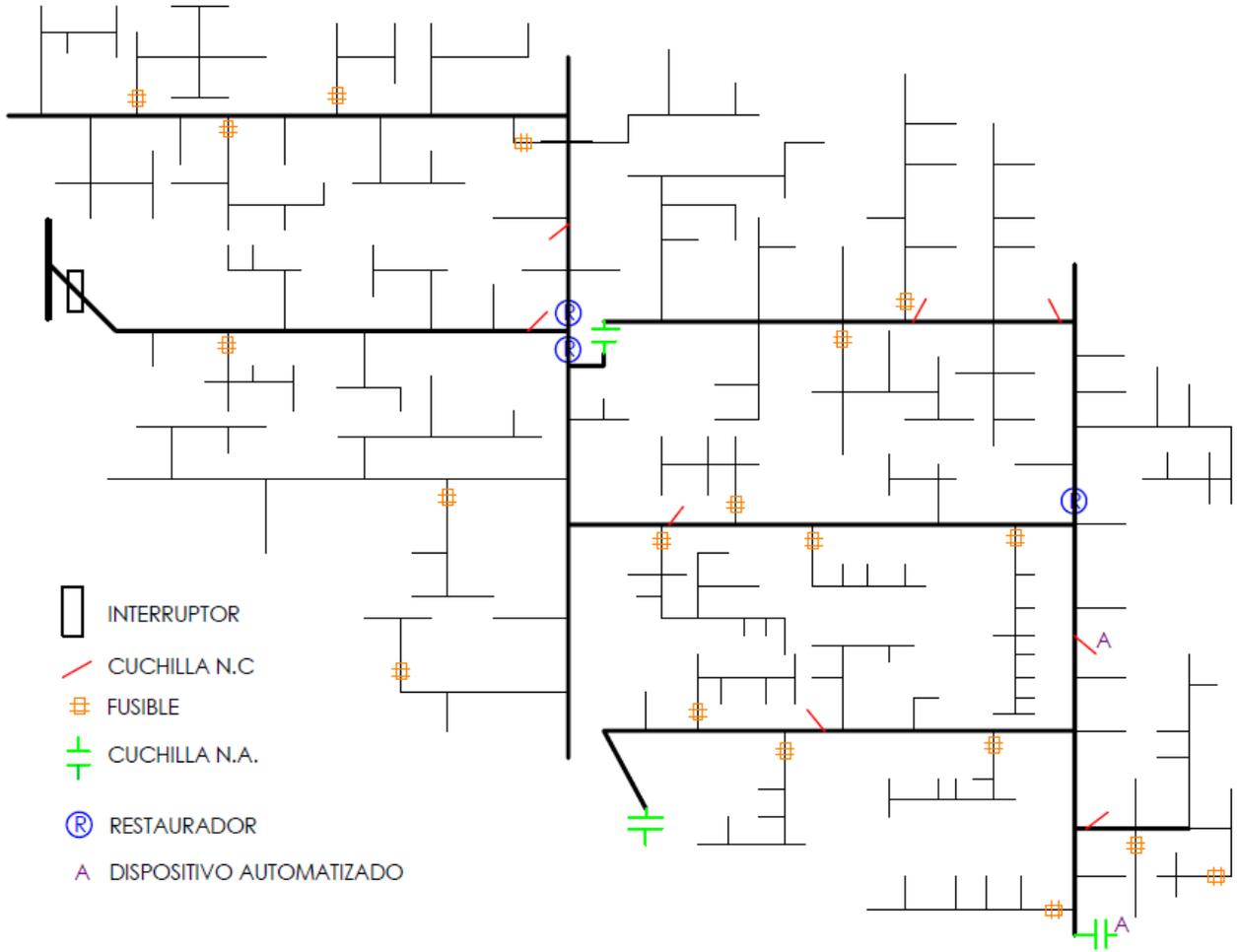
Para la ejecución del algoritmo genético simple se utilizaron los datos que se muestran en la tabla 4.16. Estos datos, el alimentador con sus posibles ubicaciones, las restricciones de confiabilidad y los datos de las tablas 4.13 y 4.15 fueron introducidos al programa de optimización. El resultado de la simulación es mostrado en la figura 4.14.

Tabla 4.16. Datos utilizados en la primera prueba para la ejecución del algoritmo genético.

Número de Genes en un cromosoma	Número de cromosomas en la población	Número de cromosomas elite	Tasa de mutación
111	90	2	0.005 (0.5%)

La comparación de los índices de confiabilidad del alimentador con los dispositivos actuales y con los dispositivos obtenidos es mostrada en la tabla 4.17. Como se observa, los índices obtenidos son muy cercanos a los actuales, sin embargo están por debajo, por lo que la nueva colocación de dispositivos desde el punto de vista de la confiabilidad proporciona mayor beneficio.

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS



4.14. Ubicación final de los dispositivos de desconexión en la primera prueba, obtenido con el programa de optimización.

Tabla 4.17. Comparación de los índices de confiabilidad de la primera prueba.

Confiabilidad	SAIFI	SAIDI	MAIFI	ENS*
Actual	0.896	2.41	2.85	24357.02
Obtenida	0.8094	2.37	2.00	24076.06

*La energía no suministrada está dada en kWh

Otras características como los costos anualizados y la cantidad de dispositivos en ambos casos son mostradas en la tabla 4.18. Como se observa, el resultado que se obtuvo tiene un menor costo de inversión anualizado, alrededor de \$18,000. En cuanto a los dispositivos, se reduce el número de cuchillas tanto normalmente abiertas como normalmente cerradas, a cambio se automatiza una de cada tipo. También se reduce en gran medida el número de fusibles, a cambio aumenta el número de restauradores.

Con el resultado obtenido, se observa que el algoritmo de optimización encontró un mayor beneficio al aumentar el número de restauradores, esto porque las tasas de fallas

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

momentáneas de los componentes son grandes y por lo tanto, el tener este tipo de dispositivos hará que reduzca en gran medida el SAIDI y el SAIFI.

Tabla 4.18. Comparación de algunas características de la primera prueba.

Características	Número de Cuchillas N.C.	Número de Cuchillas N.A.	Número de Fusibles	Número de Restauradores	Costo de inversión anualizado (\$)
Actual	15 normales	4 normales	33	2 (incluyendo el interruptor)	166,186.83
Obtenida	7 normales 1 automatizada	2 normales 1 automatizada	19	4 (incluyendo el interruptor)	148,450.95

Se debe de tener en cuenta que no se consideró zonas más importantes que otras por lo que la ubicación de los dispositivos no dependió de este factor. Si se huera tomado en cuenta esto, seguramente se tendría un resultado diferente, uno donde habría mucho más dispositivos en las zonas más importantes.

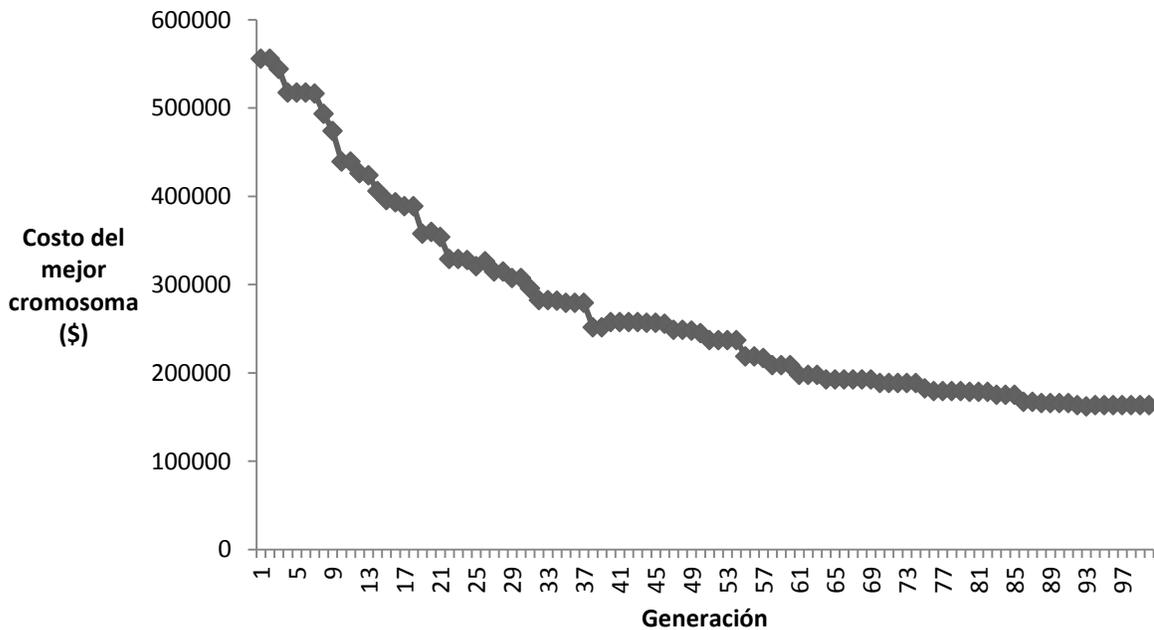


Figura 4.15. Comportamiento del algoritmo genético con la primera prueba.

Como se explicó en el capítulo 3, el algoritmo de optimización es una combinación de dos algoritmos: genético y búsqueda local. El comportamiento del primero a lo largo de su ejecución se muestra en la figura 4.15. Como se observa, el cromosoma más factible de la

primera generación tiene un costo anual de alrededor de los \$555,00, conforme avanza de generación va reduciendo los precios del mejor cromosoma por lo que se van obteniendo mejores resultados. Finalmente, por la generación 90 ya no empieza a mejorar el costo, se estabiliza y entrega un resultado con un costo de \$163,649.71. Sin embargo, al introducirlo al algoritmo de búsqueda directa se logra obtener un costo final de \$148,450.95, es decir, con el algoritmo de búsqueda local se mejoró el resultado que entrego el algoritmo genético. El tiempo de ejecución en esta prueba fue de alrededor de 8 horas.

Con la realización de esta prueba se logró seleccionar y ubicar los dispositivos de desconexión en el alimentador, logrando mejores índices de confiabilidad y menores costos anuales que los que se tiene con los dispositivos actuales.

4.3.2 PRUEBA DOS: MAYOR CONFIABILIDAD

En esta prueba se pretende ubicar y seleccionar con el programa de optimización nuevos dispositivos de desconexión a partir de los que se encuentran actualmente, para lograr una mejor confiabilidad de la que se tiene. Para ello se partirá del alimentador con sus dispositivos actuales, como se observa en la figura 4.12.

Las posibles ubicaciones de los dispositivos es la misma de la primera prueba, la que se muestra en la figura 4.13. Sin embargo, como en esta prueba se parte de los dispositivos actuales, en caso de los fusibles y restauradores actuales no se considera ninguna acción a tomar, pero en caso de cuchillas actuales se considera sólo la acción de automatizar. De esta forma, en lugar de tener 111 posibles ubicaciones para colocar los dispositivos de desconexión, se tienen 77, ya que se descuentan las ubicaciones de los fusibles y restauradores actuales.

Los datos de confiabilidad y de costos son los mismos que se utilizaron en la primera prueba. En el caso de las cuchillas actuales, no se toma ningún costo por su colocación a menos que se tenga que automatizar, en tal caso se toma el costo establecido en la tabla 4.15.

Los índices de confiabilidad a los que se quiere llegar y los cuales representaran nuestras restricciones se presentan en la tabla 4.19.

Tabla 4.19, Índices de confiabilidad requeridos.

SAIFI	SAIDI	MAIFI
0.5	1.0	1.9

De esta forma el problema de optimización que se aborda en esta prueba es el siguiente:

Minimizar

$$C_{comp} = \sum_{i=1}^{nd} Ca_i$$

Sujeto a

$$\begin{aligned} SAIFI_0 &\leq 0.5 \\ SAIDI_0 &\leq 1.0 \\ MAIFI_0 &\leq 1.9 \end{aligned}$$

Dónde:

C_{comp} = Costo total de inversión de la compañía debido a la colocación de dispositivos de desconexión.

Ca_i = Costo anualizado del dispositivo de desconexión i .

nd = Número de dispositivos de desconexión puestos en el sistema.

Para la ejecución del algoritmo genético simple se utilizaron los datos que se muestran en la tabla 4.20. Estos datos, el alimentador con sus posibles ubicaciones, las restricciones de confiabilidad y los datos de las tablas 4.13 y 4.15 fueron introducidos al programa de optimización.

Tabla 4.20. Datos utilizados en la segunda prueba para la ejecución del algoritmo genético.

Número de Genes en un cromosoma	Número de cromosomas en la población	Número de cromosomas elite	Tasa de mutación
77	70	2	0.005 (0.5%)

El resultado obtenido se muestra en la figura 4.16, como se observa se tiene la incursión de 25 nuevos dispositivos: 4 restauradores, 16 fusibles y 5 cuchillas normalmente cerradas (una automatizada). Además, se tienen que automatizar dos cuchillas de las ya existentes: una normalmente abierta y otra normalmente cerrada.

La comparación de los índices de confiabilidad del alimentador con sus dispositivos actuales y con los dispositivos obtenidos es mostrada en la tabla 4.21. Como se observa, con los nuevos dispositivos se logra tener índices de confiabilidad por debajo de los fijados y en el caso de la energía no suministrada se logra reducir más de 13,000 kWh.

El costo final de inversión anualizado fue de \$134,448.19. Al igual que en el primer caso, se consideró sólo el costo de inversión, no se tomaron en cuenta los costos por energía no suministrada.

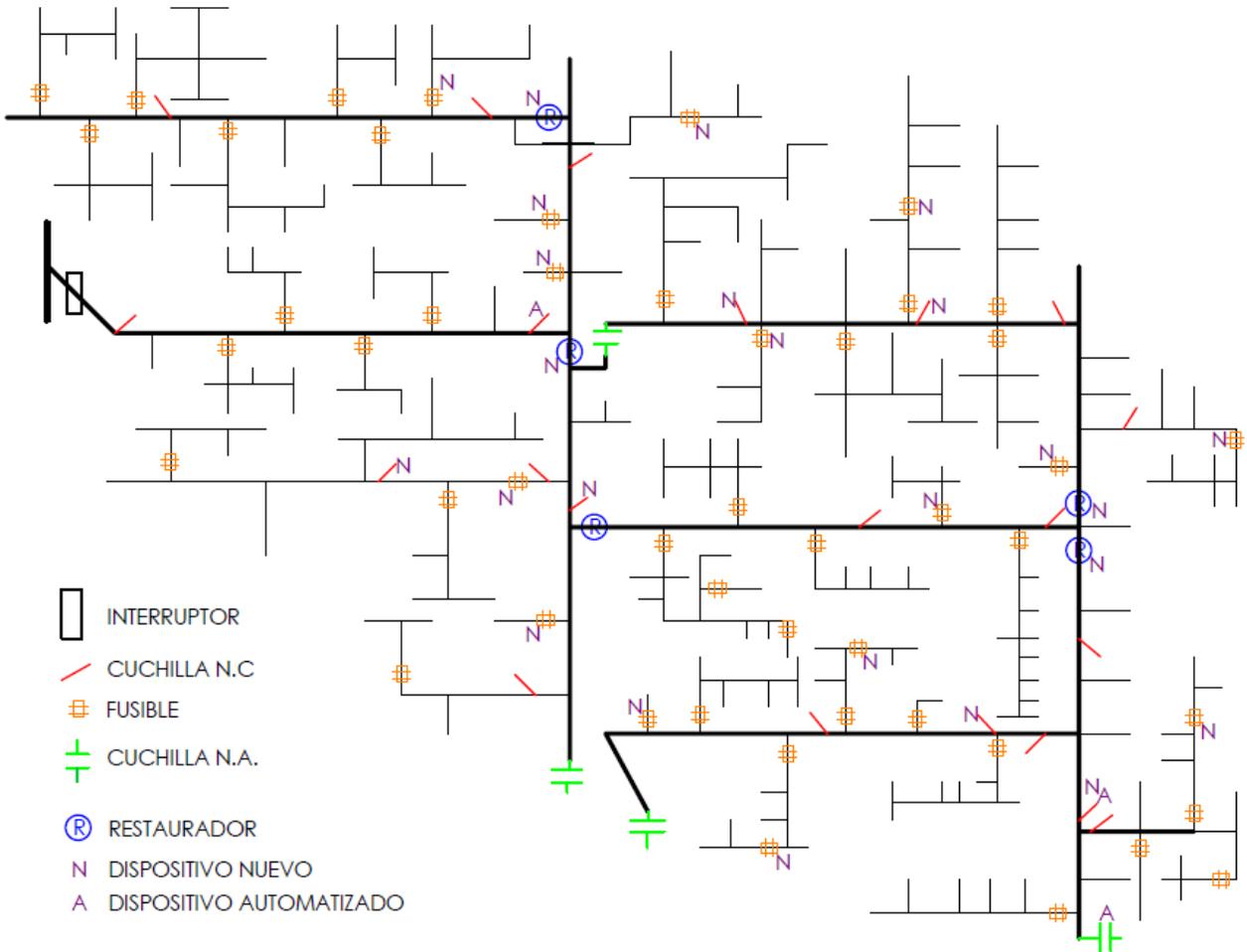


Figura 4.16. Ubicación final de los dispositivos de desconexión en la segunda prueba, obtenido con el programa de optimización.

Tabla 4.21. Comparación de los índices de confiabilidad de la segunda prueba.

Confiabilidad	SAIFI	SAIDI	MAIFI	ENS*
Diseño actual	0.896	2.411	2.856	24357.02
Diseño obtenido	0.387	0.987	1.596	10782.21

*La energía no suministrada está dada en kWh

El comportamiento para este caso del algoritmo genético a lo largo de su ejecución se muestra en la figura 4.17. Como se observa, el resultado más factible de la primera generación tiene un costo anual de alrededor de los 480,000 pesos, conforme avanza de generación va reduciendo los precios del mejor diseño por lo que se van obteniendo

mejores resultados. Finalmente, por la generación 93 (casi la misma generación que en el primer caso) ya no empieza a mejorar el costo del diseño, se estabiliza y entrega un resultado de \$153,019.08. Sin embargo, al introducir este resultado que entrega el algoritmo genético al de búsqueda local se logra obtener un con costo final de \$134,448.19, es decir que se obtuvo un mejor resultado cuando se utilizaron ambos algoritmos. El tiempo de ejecución para esta simulación fue de alrededor de 6 horas.

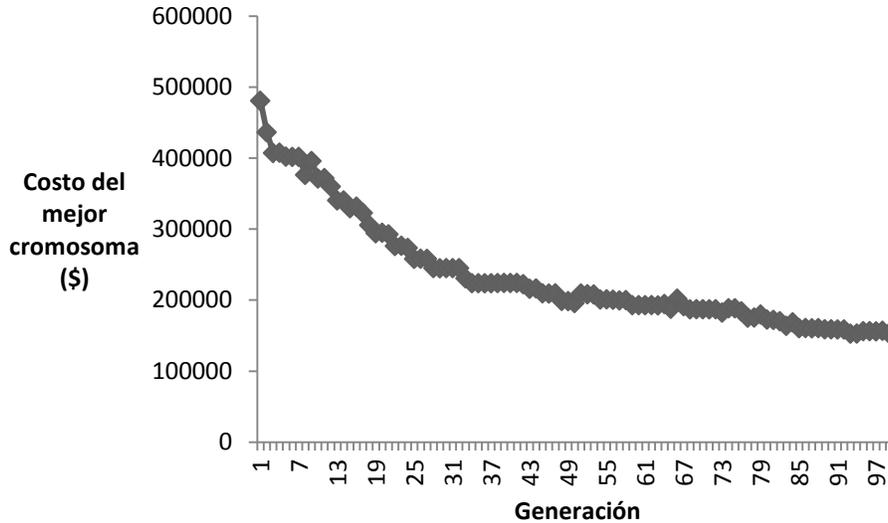


Figura 4.17. Comportamiento del algoritmo genético con la segunda prueba.

Aunque hasta aquí sólo se han realizado dos pruebas, hay que tener en cuenta que si se cambian los datos para la ejecución del algoritmo genético se obtendrán diferentes diseños, tal vez con menor precio o con mayor precio. Sin embargo, en estas secciones se lograron obtener resultados que reducen costos de inversión para alcanzar ciertos índices de confiabilidad, por lo que el programa de optimización realizado es de gran ayuda para ubicar y seleccionar los dispositivos de desconexión en una red de distribución.

4.3.3 PRUEBA TRES: CONFIABILIDAD PARA REDUCIR COSTOS TOTALES DE LA COMPAÑÍA

En esta prueba se parte del alimentador sin ningún dispositivo puesto, como se muestra en la figura 4.11, a partir de ello se busca colocar los dispositivos de desconexión para minimizar costos totales. Sin embargo, a diferencia de lo que se realizó en la sección 4.2, dónde para los costos de los clientes se tomó un costo por energía no servida y un costo por potencia no servida, en esta prueba sólo se va tomar el primero de estos dos costos, y

será la tarifa que la compañía pone a los clientes. Por lo que en sí, esta prueba busca el beneficio óptimo de la compañía.

Las posibles ubicaciones de los dispositivos se muestran en la figura 4.13, ésta es la misma que se utilizó en la primera prueba. Los datos de confiabilidad y de costos de los dispositivos son los mismos que se utilizaron en las dos primeras pruebas. Sin embargo, para este caso se debe de tomar un costo por kWh no servido, el cual servirá para calcular los costos que tiene la compañía debido a la energía no suministrada (la energía que deja de vender). Se toma un tarifa doméstica de consumo intermedio, que en la página de CFE indica que es de \$0.945, sin embargo, para facilidad del cálculo se toma de \$1.00.

No habrá índices de confiabilidad como restricción, ya que se quiere encontrar la confiabilidad que minimice costos. Los datos para la ejecución del algoritmo genético son los mismos que se utilizaron en la primera prueba y que se presentan en la tabla 4.16.

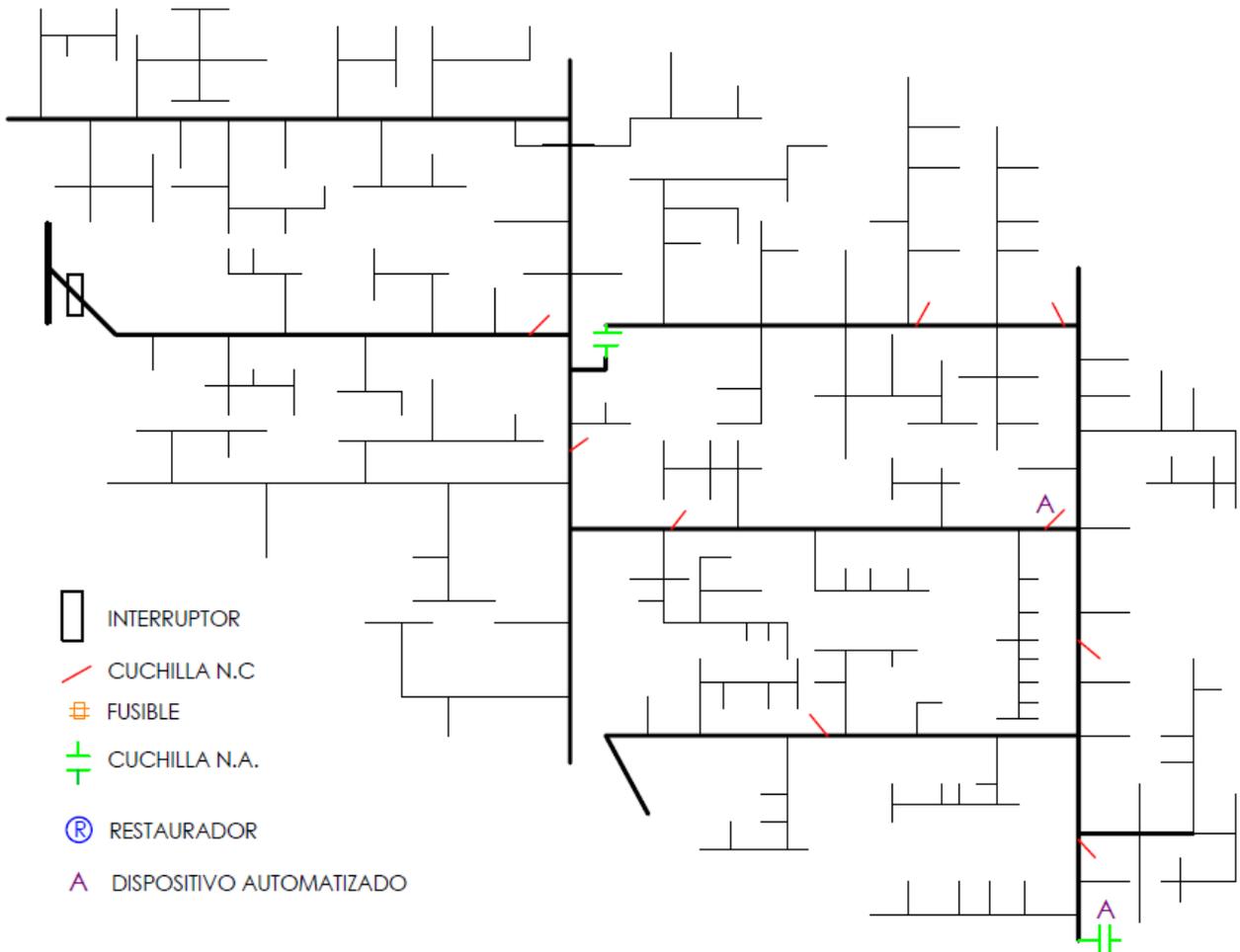


Figura 4.18. Ubicación final de los dispositivos de desconexión en la tercera prueba, obtenido con el programa de optimización.

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

Todos los datos son introducidos al programa y en la figura 4.18 se muestra la ubicación de los dispositivos que se obtuvo en el alimentador. Como se observa, se tienen muy pocos dispositivos, el interruptor al principio del alimentador, nueve cuchillas normalmente cerradas (una automatizada) y tres cuchillas normalmente abiertas (una automatizada). El resultado final no arroja el colocar ningún fusible y ningún restaurador. Con estos dispositivos, la confiabilidad del alimentador es la que se muestra en la tabla 4.22. Como se observa, es una confiabilidad bastante mala comparada con las que se obtuvieron en las primeras dos pruebas. Se tiene casi dos y media fallas sostenidas por usuario, casi cuatro fallas momentáneas por usuario y casi cuatro horas sin suministro por usuario. Pero... ¿Es este resultado con índices de confiabilidad tan malos los que minimiza los costos totales de la compañía?, para ello se tiene que realizar una comparación de las tres pruebas y del alimentador con sus dispositivos actuales.

Tabla 4.22. Índices de confiabilidad obtenidos en la tercera prueba.

Confiabilidad	SAIFI	SAIDI	MAIFI	ENS*
Obtenida	2.31	3.85	3.94	38801.63

*La energía no suministrada está dada en kWh

En la tabla 4.23 se muestra los costos desglosados de los resultados obtenidos en las tres pruebas y el que representan los dispositivos actuales. En el caso de la segunda prueba se toman los costos de los dispositivos actuales sumados a los de los nuevos dispositivos. Como se observa en la tabla, es precisamente con el resultado de la tercera prueba con la que se tiene mucho menor costo total de la compañía, se ve que los costos de inversión y los costos por energía no servida se acercan más. En cambio, para los demás casos los costos de inversión son mucho mayores a los de la ENS.

Tabla 4.23. Comparación de los costos actuales y de los costos de las tres pruebas.

COSTOS	Inversión (\$)	ENS (\$)	TOTAL (\$)
Actual	166,186.83	24,357.02	190,543.85
Primera prueba	148,450.95	24,076.06	172,527.01
Segunda prueba	300,635.02	10,782.21	311,417.23
Tercera prueba	52,410.75	38,801.63	91,212.35

En las figuras 4.19-4.21 se muestra la relación costo-confiabilidad, se puede observar que cuando mayores son los índices de confiabilidad (peor confiabilidad) el costo total de la compañía disminuye.

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

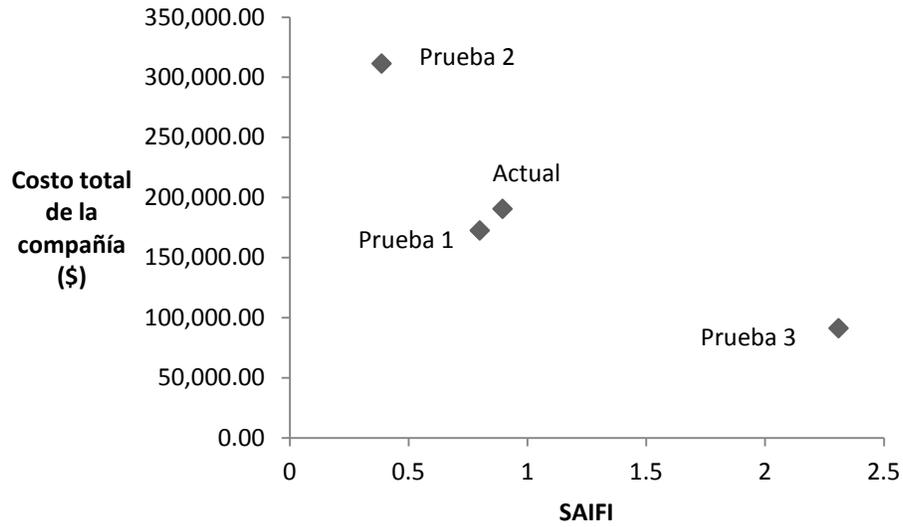


Figura 4.19. Relación SAIFI-Costo total.

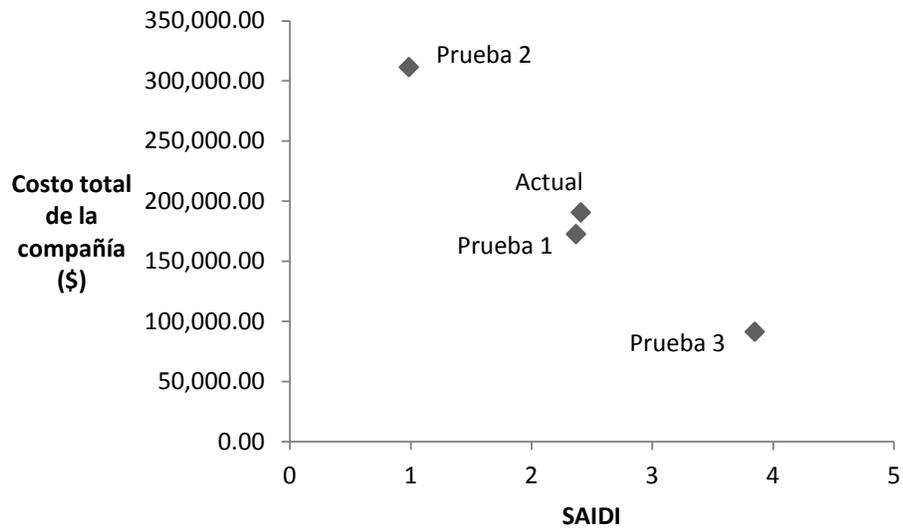


Figura 4.20. Relación SAIDI-Costo total.

CAPITULO 4: PRUEBAS Y RESULTADOS

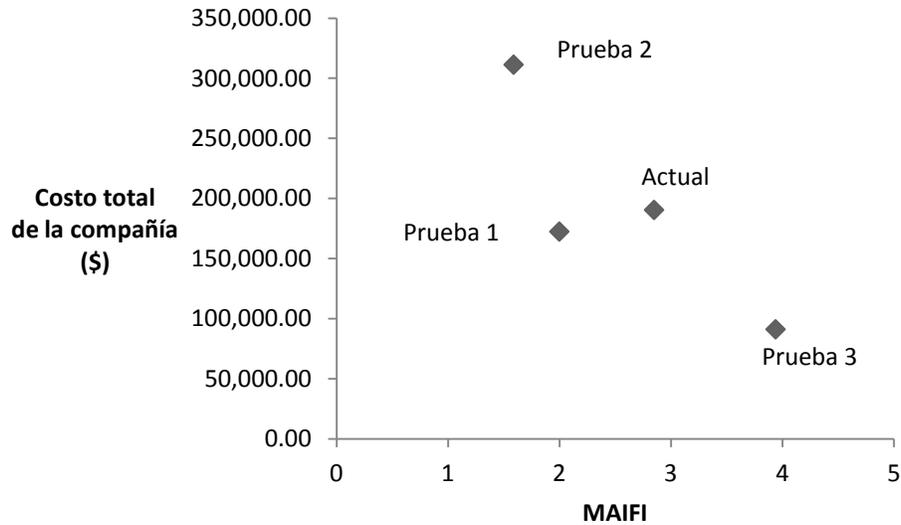


Figura 4.21. Relación MAIFI-Costo total.

En esta prueba se logró ubicar los dispositivos de desconexión para minimizar costos totales, para este caso se planteó el problema visto desde el beneficio de la compañía. Como resultado se obtuvo poca confiabilidad en el alimentador, esto se debió a que el tarifa por kWh que se tomo es muy chica en relación a los costos anualizados que se tiene por los dispositivos. Si se toman tarifas mayores o se le diera un mayor peso a la energía no servida entonces el resultado para minimizar costos totales sería con mayor cantidad de dispositivos y por lo tanto con mayor confiabilidad.

Finalmente se logró con las pruebas realizadas en estas secciones obtener varias combinaciones de los dispositivos de desconexión en el alimentador real para obtener diversos niveles de confiabilidad, logrando en todos los casos optimizar costos.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las conclusiones a las que se llegaron. Se presentan primero las que se obtuvieron concernientes a la evaluación de la confiabilidad y posteriormente las concernientes a la optimización del costo de la confiabilidad. En la última sección se presentan las sugerencias para trabajos futuros.

5.2 CONCLUSIONES SOBRE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

- Se logra realizar evaluaciones de confiabilidad con la combinación de una simulación secuencial de Monte Carlo y una simulación analítica, estas simulaciones fueron implementadas exitosamente y el programa realizado fue validado.
- La implementación de la simulación de Monte Carlo es fácil en comparación con la analítica. Ya que en esta última se tienen que realizar simulaciones complicadas como respuesta de los dispositivos de protección y procesos de restauración.
- En el caso de redes radiales, la simulación analítica resulta atractiva de implementar, ya que aunque tiene su complejidad, se pueden simular restauraciones a dos pasos y así analizar el impacto que tienen las cuchillas automatizadas en la confiabilidad del sistema.
- Con la simulación de Monte Carlo se obtienen resultados que no son posibles lograr con otras metodologías, como son las densidades de probabilidad de los principales índices de confiabilidad.
- El número de veces que se simula un año es un factor importante para los resultados que entrega el Monte Carlo. Se logró demostrar que si se simulan pocas veces un año se puede llegar a obtener resultados con un error grande, en cambio sí se simulan muchas veces un año se logra obtener resultados con poco error o sin error, pero el tiempo de ejecución aumenta. Por ello, es necesario escoger una cantidad de años adecuados para obtener buenos resultados y lograr que el tiempo de ejecución no se eleve.

- Colocar cuchillas no automatizadas en los sistemas de distribución produce una disminución en los tiempos de corte y por lo tanto en la energía no suministrada, éstas no tiene ninguna influencia sobre el número de cortes sostenidos. Sin embargo, cuando se introducen cuchillas automatizadas se tiene una reducción de cortes sostenidos y un aumento de cortes momentáneos, además de tener mayor disminución en los tiempos de corte y en la ENS.
- Se lograron analizar dos esquemas cuando se ocupan restauradores en el sistema de distribución (Ver sección 2.3.2.3), “Restaurador-Fusible” y “Fusible-Restaurador”. El primer esquema logra disminuir en gran medida las fallas sostenidas, los tiempos de reparación, los tiempos de corte y la energía no suministrada, a cambio aumenta en gran medida las fallas momentáneas. El segundo tiene un impacto parecido pero en mucho menor medida.

5.3 CONCLUSIONES SOBRE LA OPTIMIZACIÓN DEL COSTO DE LA CONFIABILIDAD

- El algoritmo genético y el algoritmo de búsqueda local (“escalada simple”) pueden ser utilizados para ubicar los dispositivos de desconexión en un sistema de distribución de forma que minimicen los costos de la confiabilidad o para obtener cierta confiabilidad en el sistema minimizando los costos de inversión.
- Los parámetros como el tamaño de la población y la tasa de mutación son un factor importante para el comportamiento y el resultado final que entrega el algoritmo genético simple. De estos parámetros se tienen las siguientes conclusiones:
 - En general, entre mayor sea el tamaño de la población (hasta cierto punto), mejor será el resultado que entregue el algoritmo genético.
 - Entre mayor sea el tamaño de la población, mayor será el tiempo de ejecución. Ya que el número de generaciones que se tienen que crear para que el algoritmo genético entregue un resultado aumenta.
 - Entre mayor sea la tasa de mutación mayor será el tiempo de ejecución. Sin importar el tamaño de la población.
 - La tasa de mutación no tendrá ningún impacto en el resultado que entregue el algoritmo genético si el tamaño de la población que sea utilizado es grande. Sin embargo, sí tendrá un impacto en el tiempo de ejecución, como se mencionó en la conclusión anterior. El saber cuándo una población es grande variará de acuerdo al problema que se esté abordando.

CAPITULO 5: CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS

- Cuando el tamaño de la población que se utilice sea chico, la tasa de mutación tendrá gran impacto en el resultado final que entrega el algoritmo genético. Entre mayor sea la tasa de mutación (hasta cierto punto) mejor será el resultado final. El saber cuándo una población es chica dependerá del problema que se esté abordando.
- El resultado final puede variar dependiendo que algoritmos sean usados. En este trabajo se analizaron los resultados cuando se utiliza el genético simple, el de búsqueda local (“escalada simple”) y/o ambos. Las conclusiones fueron las siguientes:
 - Se obtienen mejores resultados cuando se utilizan ambos algoritmos que cuando se utiliza sólo el algoritmo genético o sólo el algoritmo de “escalada simple”. El genético puede entregar los mismos resultados si se utilizan tamaños de población grandes o tasas de mutación grandes.
 - El resultado que entrega el algoritmo de búsqueda local depende de la solución inicial. Cuando se utiliza este método con diversas soluciones iniciales se obtiene un mejor resultado.
 - Cuando el tamaño del problema es chico, es decir con alimentadores donde el número de posibles ubicaciones para colocar los dispositivos de desconexión es chico, entonces el algoritmo de búsqueda local puede entregar mejores resultados de los que entrega el algoritmo genético con tamaños de población y tasa de mutación chicos. No entrega mejores resultados si en el algoritmo genético se utilizan tamaños de población o tasas de mutación grandes.
- El tiempo de ejecución del programa de optimización depende del tamaño del sistema o alimentador que se está analizando y del procesador que sea utilizado para las simulaciones. Con un alimentador chico donde hay 10 posibles ubicaciones para colocar los dispositivos, el tiempo de ejecución fue de segundos o de minutos (entre 1 y 4), con un alimentador real con 111 posibles ubicaciones el tiempo aumento a horas (entre 6 y 8).
- El costo debido a los cortes de energía y el costo de inversión son un factor importante en la ubicación y selección de los dispositivos de desconexión en los sistemas de distribución. Cuando el costo de los dispositivos es demasiado grande en relación a los costos por energía y potencia no servida, entonces el mayor beneficio se obtendrá colocando pocos de estos dispositivos en el sistema de distribución.
- La ubicación de los dispositivos de desconexión es un factor importante en la confiabilidad del sistema. Se pueden obtener mejores confiabilidades con menores dispositivos, pero puestos en lugares donde tienen una mayor influencia en la confiabilidad del sistema de distribución. De esta forma se pueden tener menores costos con un mayor nivel de confiabilidad.

5.4 SUGERENCIAS PARA FUTUROS TRABAJOS

- Realizar un trabajo similar a éste pero a nivel transmisión. Para ello se sugiere desarrollar un programa de confiabilidad que no contemple simulación analítica, y para el desarrollo del programa de optimización se pueden contemplar los mismos algoritmos utilizados en este trabajo u otros algoritmos como son la simulación templada.
- Realizar un trabajo donde se contemple en el problema de optimización la restricción del número de veces en que pueden operar los dispositivos de protección. Para obtener el número que se espera operen al año estos componentes se puede realizar con las dos simulaciones que se utilizaron en este trabajo, la simulación secuencial de Monte Carlo y la analítica.
- Modelar la confiabilidad de los componentes que conforman el sistema de distribución. Este modelado se puede realizar a partir de estadística donde se pueden obtener las densidades de probabilidad de las tasas de falla y los tiempo de reparación de los componentes, ver [36,37].
- Tomar en cuenta en el análisis de confiabilidad de un sistema de distribución factores como son: ocurrencias de fallas mutuas, probabilidades de que un dispositivo de protección no opere cuando deba, fallas dependientes y generación distribuida.
- Abordar más a fondo los costos que tienen los usuarios debido a la confiabilidad o a los cortes de energía.
- Tomar en cuenta para realizar la evaluación de la confiabilidad, caídas de voltaje en los nodos y valores nominales de operación de los componentes.
- Considerar en la evaluación de confiabilidad de sistemas de distribución fallas trifásicas, bifásicas y monofásicas, donde se tome en cuenta la operación de los dispositivos de protección por fase.
- Analizar cómo influye el mantenimiento en la confiabilidad de los componentes que conforman la red de distribución. Esto también se puede realizar a partir de estadística y tiene que ver directamente con el modelado de la confiabilidad de los componentes.
- Se sugiere utilizar en algún problema de optimización discreta, algoritmos genéticos que utilicen operadores más avanzados del que utiliza el simple y realizar una comparación para observar que tanta influencia tiene el utilizar estos operadores.

REFERENCIAS

- [1] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarieg, L. Goel and K. S. So, "A Reliability Test System for Educational Purposes – Basic Distribution System Data and Results", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. , May 199.
- [2] Alimentador de la ciudad de México, 2013, Comisión Federal de Electricidad.
- [3] Nisha R. Godha, Surekha R. Deshmukh and Rahul V. Dagade, "Application of Monte Carlo Simulation for Reliability Cost/Worth Analysis of Distribution System", 4th International Conference on Power and Energy Systems (ICPS), 22-24 December 2011, IIT Madras, Chennai, India.
- [4] R. Billinton and M. S. Grover, "Reliability evaluation in distribution and transmission systems", PROC. IEEE, Vol. 122, No. 5, MAY 1975.
- [5] Dan Zhu, "ELECTRIC Distribution Reliability Analysis Considering Time-varying Load, Weather Conditions and Reconfiguration with Distributed Generation" Thesis of Doctorate of Philosophy in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, March 27, 2007.
- [6] R. Billinton, R. N. Allan, "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press New York, 1996.
- [7] A. M. Lite da Silva, A. M. Cassula, R. Billinton and L. A. F. Manso, "Integrated reliability of generation, transmission and distribution systems", IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 149, No. 1, January 2002.
- [8] Melo A. C. G., Pereira M. V. and Leite Da Silva A. M., "A conditional probability approach to the calculation of frequency and duration indices in composite reliability evaluations", IEEE Trans. Power Syst., 1993 pp. 1118-1125.
- [9] Goel L. and Billinton R., "Utilization of interrupted energy assessment rates to evaluate reliability worth in electrical power systems", IEEE Trans. Power Syst., 1993, pp. 929-936.
- [10] Billinton R. and Allan R. N., "Reliability evaluation of power systems", second edition, Plenum. NY, 1994.
- [11] Dixon, G. F. L. and Hammersley H., "Reliability and its cost on distribution systems", International conference on Reliability of power systems, 1977, pp. 81-84 (IEEE Conference Publication 148).

REFERENCIAS

- [12] Canadian Electrical Association, Equipment reliability information systems, "1990 Annual Service Continuity Report on Distribution system performance in Canadian electrical utilities", Final Report, 1991.
- [13] R. E. Brown, "Electric Power Distribution Reliability", USA: CRC Press, 2009.
- [14] Roy Billinton and Satish Jonnavithula, "Optimal Switching Device Placement in Radial Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996.
- [15] Billinton R, and Allan R. N., "Reliability Evaluation of Power Systems", New York and London, 1984.
- [16] Westinghouse Electric Corporation, "Electric Utility Reference Book Distribution Systems", Vol. 3, East Pittsburgh, 1965.
- [17] Miranda V., "Using Fuzzy Reliability in a Decision Aid Environment for Establishing Interconnection and Switching Location Policies", Proceedings of CIRED, 1991.
- [18] Levitin, G., Mazal-Tov S. and Elmakis D., "Optimal Sectionalizer Allocation in Electric Distribution Systems by Genetic Algorithm", Electric Power Systems Research, 1994, pp 97-102.
- [19] Graver, D. P., Montmeat F. E. and Patton A. D., "Power System Reliability Calculation Measures of Reliability and Methods of Calculations", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-83, 1964, pag. 727-737.
- [20] Todd Z. G., "A Probability Method for Transmission and Distribution Outage Calculations", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-83, 1964, pag 695.701.
- [21] A. M. Leite da Silva, J. Endreny and L. Wang, "Integrated Treatment of Adequacy and Security in Bulk Power System Reliability Evaluations", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No.1, March 1993, pp. 275-285.
- [22] A. Sankar Krishnan and R. Billinton, "Effective techniques for reliability worth assessment in composite power system network using Monte Carlo Simulation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No. 3, Aug. 1996, pp. 1255-1261.
- [23] R. Billinton and G. Lian, "Composite Power System Health Analysis Using a Security Constrained Adequacy Evaluation Procedure", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 2, May 1994, pp. 936-941.

REFERENCIAS

- [24] Billinton R. and Goel L., "Overall Adequacy Assessment of an Electric Power System", IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, Vol. 139, Issue 1, pp. 57-63, Jan. 1992.
- [25] Billinton R. and Bollinger K., "Transmission Systems Reliability Evaluation Using Markov Processes", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, 1968, pp. 538-547.
- [26] Billinton R. and Grover M. S., "Reliability assessment of Transmission and Distribution Systems", IEEE Transaction on Power Apparatus an Systems, Vol. PAS-94, 1975, pp. 724-732.
- [27] Allan R. N., Billinton R. and De Oliveira M. F., "Reliability Evaluation of Electrical Systems with Switching Actions" Proceedings of the IEEE, Vol. 123, No. 5, April 1976, pp. 325-330.
- [28] A. Sankarakrishnan and R. Billinton, "Sequential Monte Carlo Simulation for Composite Power System Reliability Analysis wit Time Varying Loads", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995.
- [29] R. Billinton and A. Jonnavithula, "Application of sequential Monte Carlo simulation to evaluation of distribution of composite system indices" IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 144, No. 2, March 1997.
- [30] Roy Billinton and Peng Wang, "Teaching Distribution System Reliability Evaluation Using Monte Carlo Simulation", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, May 1999.
- [31] Y. Ou and L. Goel, "Using Monte Carlo simulation for overall distribution system reliability worth assessment", IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. Vol. 146, No. 5, September 1999.
- [32] Nisha R. Godha, Surekha R. Deshmukh and Rahul V. Dagade, "Application of Monte Carlo Simulation for Reliability Cost/Worth Analysis of Distribution System", 4th International Conference on Power and Energy Systems (ICPS), 22-24 December 2011, IIT Madras, Chennai, India.
- [33] Moein Manbachi, Faezeh Mahdloo and Mahmood-Reza Haghifam, "A New Solution for Maintenance Scheduling in Deregulated Environment Applying Genetic Algorithm and Monte-Carlo Simulation", IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010.
- [34] J. Endrenyi, "Reliability Modeling in Electric Power System", John Wiley & Sons, 1978.

REFERENCIAS

- [35] Ali A. Chowdhury and Don O. Koval, "Power Distribution System Reliability Practical Methods and Applications", IEEE press series on Power Engineering, 2009.
- [36] Xiang Zhang and Ernst Gockenbach, "Component Reliability Modeling of Distribution Systems Based on the Evaluation of Failure Statistics", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 14, No. 5, October 2007.
- [37] Jian He, Lin Cheng and Yuanzhang Sun, "Analysis of Component's Reliability Modeling Based On Real-time Operating Conditions", International Conference on Power System Technology, 2006.
- [38] Yuanzhang Sun, Lin Cheng, Haitao Liu and Shan He, "Power System Operational Reliability Evaluation Based On Real-time Operating State", The 7th International Conference on Power Engineering, IPEC 2005.
- [39] Xun Du and Wenying Liu, "Evaluation of power reliability based on the maintenance state", Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2011, 4th International Conference.
- [40] Luth J., "Four Rules to Help Locate Protective Devices", Electrical World, Aug., 1991, PP. 36-37.
- [41] Hong L., Yueh W. H. and ALLEN D. J., "Auto Loop Improvement", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994, pp. 828-832.
- [42] Kjolle G. and Sand K., "RELAD- An Analytical Approach to Distribution Reliability Assessment", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No.2, April 1992, pp. 809-814.
- [43] R.E. Brown, S. Gupta, R. D. Christie, S. S. Venkata ad R. Fletcher, "Automated Primary Distribution System Design: Reliability and Cost Optimization", Transmission and Distribution Conference, IEEE, 1996.
- [44] Vladimiro Miranda, J. V. Ranito and L. M. Proenca, "Genetic Algorithms in Optimal Multistage Distribution Network Planning", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 4, November 1994.
- [45] Ignacio J. Ramírez Rosado and José L. Bernal Agustín, "Reliability and Costs Optimization for Distribution Networks Expansion Using an Evolutionary Algorithm", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 1, February 2001.
- [46] Gómez Hernández J. A., "Optimización de la Confiabilidad en la Transmisión en Sistemas Eléctricos de Potencia Utilizando Algoritmos Genéticos", Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, 1997.

REFERENCIAS

- [47] Gómez Hernández J. A., "Optimización de la Confiabilidad en Sistemas Eléctricos de Potencia Compuestos Utilizando Algoritmos Evolucionarios", Tesis de doctorado, Instituto Politécnico Nacional, Noviembre del 2001.
- [48] Torres Ruiz C. R., "Metodología para la Evaluación del Costo Esperado por Fallas en Redes de Transmisión", Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Abril del 2002.
- [49] Díaz Flores R., "Selección y Localización óptima de Dispositivos de Desconexión en la Planeación de Sistemas de Distribución Radiales", Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Diciembre 2003.
- [50] Trujillo Hernández A. D., "Técnica de Enumeración para la Planeación en Sistemas de Distribución para la Localización Óptima de Dispositivos de Seccionamiento", Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Agosto 2004.
- [51] Trujillo Hernández R. A., "Algoritmo Genético para analizar la confiabilidad de redes de distribución", Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Mayo 2007.
- [52] Leyva Alvares Octavio Jesús., "Metodología para el Reforzamiento de Redes de Distribución en Base a la Confiabilidad", Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, 2011.
- [53] R.E. Barlow and F. Proschan, "Statistical theory of reliability and life testing: probability models", Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1975.
- [54] N. R. Maann, R. E. Schafer and N.D. Singpurwalla, "Methods for statistical analysis of reliability and life data", John Wiley and Sons, 1977.
- [55] Billinton R. and Wang P., "Distribution System Reliability Cost/Worth Anaysis using Analytical and Sequential Simulation Techniques", IEEE Transactions Power Systems, vol. 13, no.4, November 1998, pp. 1245-1250.
- [56] Billinton R. and Allan R. N., "Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques", Pitman Advanced Publishing Program, 1983.
- [57] T. Solver and M. Amelin, "State Duration Based Monte Carlo Simulation model with independent failures for Distribution System Reliability Analysis", 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH, Stockholm, Sweden- June 11-15, 2006.
- [58] L. Devroye, "Non-Uniform Random Variate Generation", Springer-Verlag New York Inc, 1986.

REFERENCIAS

- [59] Youman Deng, Ying He and Boming Zhag, "Branch-estimation-based state estimation for radial distribution systems", IEEE Power engineering Society, Vol. 4, 2000, pp. 2351-2356.
- [60] C. M. Warren, "The effect of Reducing Momentary Outages on Distribution Reliability Indices", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No.3, July, 1992, pp. 1610-1615.
- [61] Sarfi R. J., Salama M. M. A. and Chikhani A. Y., "Distribution system reconfiguration for loss reduction: a new algorithm based on a set of quantified heuristic", Electrical and Computer Engineering, Proceedings Canadian Conference, 1994.
- [62] Fei Ding and Loparo K. A., "A simple heuristic method for smart distribution system reconfiguration", Energytech, 2012 IEEE.
- [63] D. Shirmohammadi, "Service Restoration in Distribution Networks Via Network Reconfiguration", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, April 1992, pp.952-958.
- [64] C. Ucak and A. Pahwa, "An analytical Approach for Step-by-Step Restoration of Distribution Systems Following Extended Outages", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994, pp. 1717-1723.
- [65] R. E. Brown and A. P. Hanson, "Impact of Two Stage Service Restoration on Distribution Reliability", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 4, Nov. 2001, pp. 624-629
- [66] Ching-Tzong Su and Guor-Rung Lii, "Reliability Optimization Design of Distribution Systems Via Multi-Level Hierarchical Procedures and Generalized Reduced Gradient Method", IEEE Energy Management and Power Delivery, 1995
- [67] K. K. Kariuki and R. N. Allan, "Assessment of customer outage costs due to electric service interruptions: residential sector", IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 143, No. 2, March 1996.
- [68] Hillier S. F. and Lieberman J. G., "Introduction to Operations Research, McGrawHill 1991.
- [69] G. L. Nemhauser and L. A. Wolsey, "Integer Programming and Combinatorial Optimization", Wiley, 1988.
- [70] L. Davis, "Genetic Algorithms and Simulated Annealing", Morgan Kauffmann Publishers, Inc., 1987.

REFERENCIAS

[71] H. Holland, "Adaptation in Natural and Artificial Systems", The University of Michigan, 1995.

[72] D. E. Golberg, "Genetic Algorithms in Search Optimization, and Machine Learning", Addison Wesley 1989.

[73] R. E. Brown, S. S. Venkata, and R. D. Christie, "Hybrid Reliability Optimization Methods for Electric Power Distribution Systems", International Conference on Intelligent Systems Applications to Power Systems, Seoul, Korea, IEEE, July 1997.

[74] R. Brown, S. Gupta, S. S. Venkata and R. D. Christie, "A Genetic Algorithm for Reliable Distribution System Design", Proceedings of the International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, ISPAP-96, Orlando, FL. January, 1996.

[75] Ignacio J. Ramírez-Rosado and José L. Bernal-Agustín, "Genetic Algorithms Applied to The Design of Large Power Distribution Systems", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, 1998

[76]<http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/OTROS/Aportaciones/concuotK016.asp?radio=1&Anio=2013&Mes=10>, última visita el 14 de Octubre del 2013.

[77]<http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/OTROS/Aportaciones/concuotM01.asp?radio=1&Anio=2013&Mes=1>, última visita el 14 de Octubre del 2013.

ANEXO A: ÍNDICES DE CONFIABILIDAD

A.1 INTRODUCCIÓN

Los índices de confiabilidad son en la mayoría de los casos valores promedios de una particular característica de confiabilidad para un sistema completo, región de operación, territorio del servicio de la subestación, o alimentador. Estos índices pueden ser obtenidos de estudios estadísticos directos que realizan las compañías, también se pueden obtener algunos de ellos mediante un programa que evalué la confiabilidad. Al final estos índices ayudaran a la compañía a visualizar donde se encuentran los problemas concernientes a la confiabilidad dentro del área analizada.

En el análisis de confiabilidad de los sistemas de potencia se utilizan tres índices generales que son los más utilizados, ellos son:

- **Tasa de falla (λ).**- Indica el número de veces al año que un componente, alimentador, sistema, etc., sufrirá una falla o corte.
- **Tiempo medio de reparación (r).**- Indica el número de horas que permanecerá fuera de operación algún componente, alimentador, sistema, etc., si es que sufre alguna falla o corte.
- **Indisponibilidad (U).**- Indica el número de horas al año que estará indisponible algún componente, alimentador, sistema, etc.

En el resto de la sección se presentan los índices más utilizados en el área de distribución, así como algunos que son de gran interés en este trabajo. Estos fueron obtenidos de las referencias [11,48.49].

A.2 ÍNDICES DE CONFIABILIDAD BASADOS EN EL CLIENTE

Los índices basados en el cliente más utilizados por sus siglas en ingles son:

SAIFI, System Average Interruption Frequency Index (*Índice Promedio de la Frecuencia de Interrupción del Sistema*).- Es una medida de cuantas interrupciones sostenidas en promedio experimentará un cliente a lo largo de un año. Para calcular este índice se utilizan las formulas A.1 y A.2, donde NdC representa el número total de clientes servidos.

ANEXO A: ÍNDICES DE CONFIABILIDAD

$$SAIFI = \frac{\text{Número total de interrupciones a los clientes}}{\text{Número total de clientes servidos}} \text{ [/año]} \quad A.1$$

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i * NdC_i}{\sum NdC_i} \text{ [/año]} \quad A.2$$

SAIDI, System Average Interruption Duration Index (*Índice Promedio de la Duración de Interrupción del sistema*).- Es una medida de cuantas horas de interrupción en promedio experimentará un cliente a lo largo de un año. Para calcular este índice se utilizan las formulas A.3 y A.4.

$$SAIDI = \frac{\sum \text{Duraciones de interrupciones a los clientes}}{\text{Número total de clientes servidos}} \text{ [hrs/año]} \quad A.3$$

$$SAIDI = \frac{\sum U_i * NdC_i}{\sum NdC_i} \text{ [hrs/año]} \quad A.4$$

CAIDI, Customer Average Interruption Duration Index (*Índice Promedio de la Duración de Interrupción de los Clientes*).-Es una medida de cuantas horas de interrupción en promedio experimentará un cliente si es sujeto a un corte de energía. Para calcular este índice se utilizan las formulas A.5 y A.6.

$$CAIDI = \frac{\sum \text{Duraciones de interrupciones a los clientes}}{\text{Número total de interrupciones a los clientes}} \text{ [hrs]} \quad A.5$$

$$CAIDI = \frac{\sum U_i * NdC_i}{\sum \lambda_i * NdC_i} \text{ [hrs]} \quad A.6$$

ASAI, Average Service Availability Index (*Índice Promedio de la Disponibilidad del Servicio*).-Es la disponibilidad ponderada del cliente del sistema, y proporciona la misma información que el SAIDI. Para calcular este índice se utilizan las formulas A.7 y A.8.

$$ASAI = \frac{\text{Horas de disponibilidad del servicio a los clientes}}{\text{Horas de demanda de Servicio a los Clientes}} \quad pu \quad A.7$$

$$ASAI = \frac{\sum 8760 * NdC_i - \sum U_i * NdC_i}{\sum 8760 * NdC_i} \quad pu \quad A.8$$

CAIFI, Customer Average Interruption Frequency Index (*Índice Promedio de la Frecuencia de Interrupción de los Clientes*).- Es una medida está basada sobre el número de clientes que han experimentado una o más interrupciones al año. Para calcular este índice se utilizan la formula A.9.

$$CAIFI = \frac{\text{Número total de interrupciones a los clientes}}{\text{Clientes que experimentan una o mas interrupciones}} [/\text{año}] \quad A.9$$

MAIFI, System Average Interruption Frequency Index (*Índice Promedio de la Frecuencia de Interrupción Momentánea*).- Es una medida de cuantas interrupciones momentáneas en promedio experimentará un cliente a lo largo de un año. Para calcular este índice se utilizan las formulas A.10.

$$MAIFI = \frac{\text{Número total de interrupciones momentaneas a los clientes}}{\text{Número total de clientes servidos}} [/\text{año}] \quad A.10$$

Hay dos índices de confiabilidad que corresponden a puntos en las funciones de distribución acumulativas. Estos índices tienen un subíndice que definen el nivel más alto de confiabilidad que un cliente debe exceder antes de ser contados. El primero considera a interrupciones sostenidas y el segundo considera ambas interrupciones sostenidas momentáneas:

CEMI_n, Customers Experiencing Multiple Interruptions (*Interrupciones Múltiples que Experimentan los Clientes*):

$$CEMI_n = \frac{\text{Clientes que experimentan mas de n interrupciones}}{\text{Número total de clientes servidos}} [/\text{año}] \quad A.11$$

CEMSMI_n, Customers Experiencing Multiple Sustained and Momentary Interruptions (*Interrupciones Sostenidas y Momentáneas Múltiples que Experimentan los Clientes*)

$$CEMSMI_n = \frac{\text{Clientes que experimentan mas de n interrupciones combinadas, sostenidas y momentaneas}}{\text{Número total de clientes servidos}} [/\text{año}] \quad A.12$$

A.3 ÍNDICES DE CONFIABILIDAD BASADOS EN LA CARGA

Los índices basados en la carga más utilizados por sus siglas en inglés son:

ENS, Energy Not Supplied index (*Índice de la Energía no Suministrada*).- Es una medida de cuantos kWh no se suministran en el sistema a lo largo de un año.

$$ENS = \sum Pp_i U_i [kWh] \quad A.13$$

Donde Pp_i es la potencia media en el punto de carga i . La potencia no servida debido a cortes se calcula con la siguiente fórmula.

$$PNS = \sum Pp_i \lambda_i [kWh] \quad A.14$$

AENS, Average Energy not supplied (*Índice promedio de la Energía no Suministrada*).- Es una medida de cuantos kWh no se suministran en promedio por cliente. . Para calcular este índice se utilizan las fórmulas A.15 y A.16.

$$AENS = \frac{\text{Número total de energía no servida}}{\text{Número total de clientes servidos}} \quad A.15$$

$$AENS = \frac{\sum Pp_i U_i}{\sum NdC_i} \quad A.16$$

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

B.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las pruebas y los resultados que se obtuvieron con el algoritmo para evaluar la confiabilidad en redes de distribución radiales presentado en la sección 2.4 y cuyo programa se presenta en el anexo D. Para la realización de las pruebas se utiliza una red de la IEEE [1], los resultados son comparados para validar el programa de confiabilidad desarrollado.

B.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

Para estas pruebas se utilizó la red de distribución de la IEEE [1] mostrada en la figura B.1. Esta red de distribución cuenta con 7 alimentadores señalados con el prefijo “Fe” y 38 puntos de carga señalados con el prefijo “PC”. Además, se tiene conexiones entre alimentadores mediante cuchillas normalmente abiertas como se muestra en la figura.

B.1. Longitud de las secciones de línea de los alimentadores.

Longitud (km)	Número de sección del alimentador
0.60	2-6-10-14-17-21-25-28-30-34-38-41-43-46-49-51-55-58-61-64-67
0.75	1-4-7-9-12-16-19-22-24-27-29-32-35-37-40-42-45-48-50-53-56-60-63-65
0.80	3-5-8 11-13-15-18-20-23-26-31-33-36-39-44-47-52-54-57-59-62-66

Los datos utilizados para el análisis fueron tomados de la referencia anteriormente citada y se muestran en las tablas B.1, B.2 y B.3. En la primera tabla se muestra la longitud que tiene cada una de las secciones de línea que se muestran enumeradas en la figura B.1, es necesario saber la longitud ya que la tasa de falla de las líneas se da por km. La segunda tabla muestra los datos que se tienen en cada punto de carga, se da el número de clientes para obtener los índices de confiabilidad como son SAIFI, SAIDI, etc., también se proporciona información como la carga promedio para obtener la Energía no suministrada anual. La tercera tabla proporciona los datos de confiabilidad de los componentes.

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

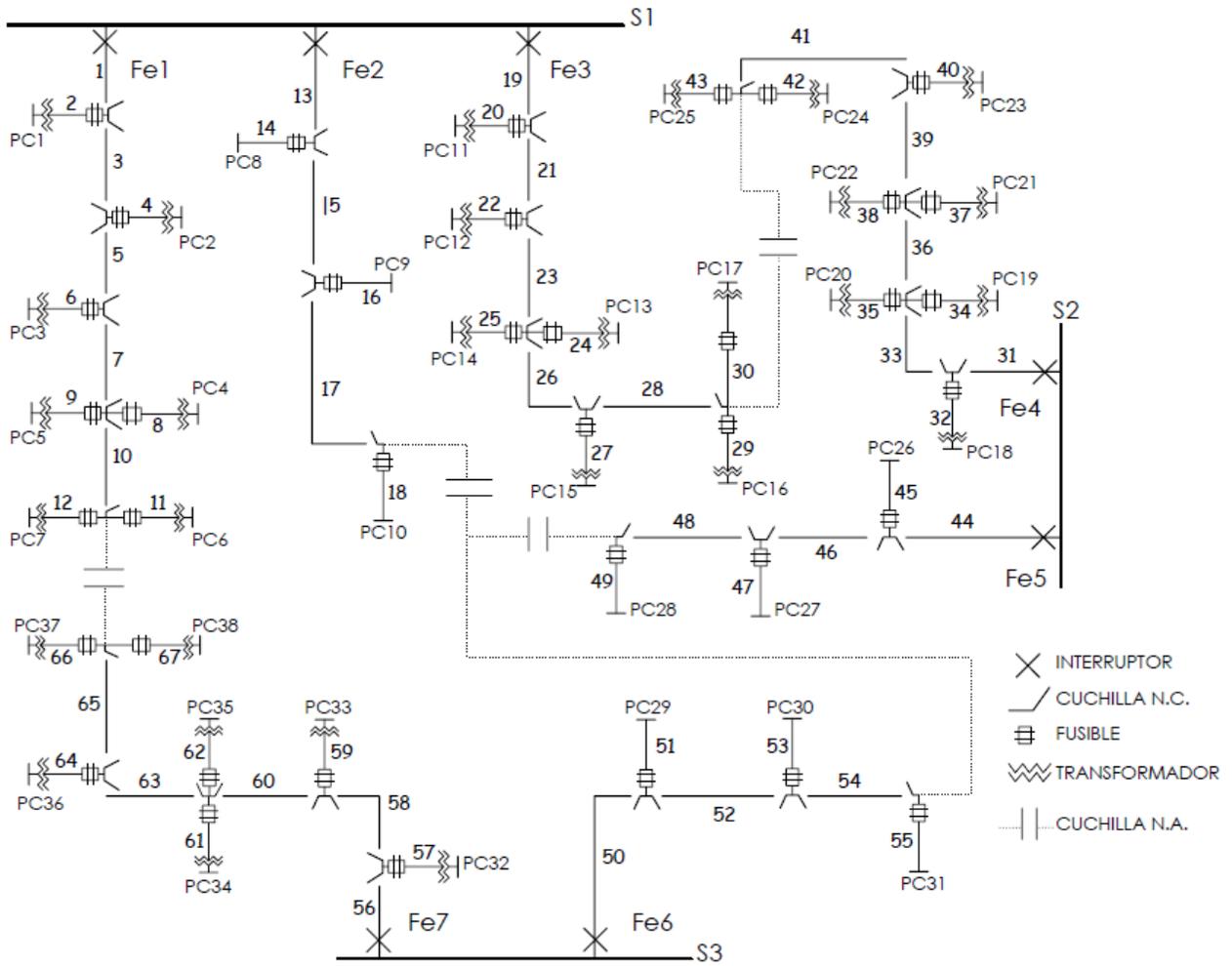


Figura B.1 Red de distribución prueba.

Tabla B.2. Datos de clientes.

Puntos de Carga	Tipo de cliente	Nivel de carga promedio (MW)	Nivel de carga pico (MW)	Número de clientes
1-4, 11-13, 18-21, 32-35	Residencial	0.545	0.8869	220
5, 14, 15, 22, 23, 36, 37	Residencial	0.500	0.8137	200
8, 10, 26-30	Pequeño usuario	1.00	1.63	1
9, 31	Pequeño usuario	1.50	2.445	1
6, 7, 16, 17, 24, 25, 38	Comercial	0.415	0.6714	10

Tabla B.3. Datos de confiabilidad de los componentes.

Componente	Tasa de falla permanente	Tiempo de reparación [Hrs]	Tiempo de recierre [Hrs]	Tiempo de conmutación [Hrs]
Transformadores de 11/0.45 kV	0.015	200		1
Interruptores	0.006	4	0.083	1
Líneas	0.065 (por km)	5		1
Bus	0.001	2	0.083	1

B.2.1 PRUEBAS TOMANDO EN CUENTA TODOS LOS DISPOSITIVOS

Se realizó primero un análisis con todos los dispositivos de protección y con todas las cuchillas, tal como se muestra en la figura B.1. Uno de los objetivos principales de realizar estas primeras pruebas es validar el programa desarrollado.

Para validar el programa realizado se comparan los resultados obtenidos con los que proporciona la referencia. En la tabla B.4 se muestran los índices de confiabilidad en algunos puntos de carga, como se observa, la diferencia entre los resultados que entrega el programa es demasiado chico (alrededor del 0.5%) en relación a los que proporciona la referencia, de esta manera se puede comprobar que el programa realizado entrega buenos resultados en los puntos de carga.

En la tabla B.4 se observa que las tasas de falla obtenidas son muy chicas, en el peor de los casos de 0.3075 fallas al año, es decir, que se espera que en los puntos de carga se tenga un corte de energía cada 3.25 años, lo cual resulta en una buena confiabilidad. Esto se debe a dos cosas: primero, a que se está simulando la red más completa lo cual hace que cuando ocurre una falla no sean afectados tantos usuarios, y segundo, a que las tasas de falla individuales de los componentes (ver tabla B.3) no son muy altas. Sin embargo, se observa que los tiempos medios de reparación son relativamente altos, en algunos casos llega a estar en 11.65 horas, es decir, que si en el punto de carga hay una interrupción se esperara que dure 11.65 horas, lo cual resulta en un alto tiempo aun cuando se trate de la red más completa. Lo anterior se debe a que los tiempos en que se repara un transformador en promedio es de 200 horas (como se observa en la tabla B.3) lo que hace que los tiempos finales de reparación aumenten. Finalmente, la indisponibilidad es un indicativo de las horas al año que se espera que el punto de carga este sin energía, como se observa en la tabla B.4 estos no son tan grandes como los tiempos de reparación. Esto se debe a que las tasas de falla son chicas, si se tuviera una falla al año entonces la indisponibilidad sería muy similar o igual al tiempo de reparación.

En la tabla B.5 se muestran los índices de confiabilidad de usuario en los 7 alimentadores. Al igual que en la tabla B.4, se realizó la comparación con los resultados que proporciona

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

la referencia. Se tienen resultados muy parecidos y casi iguales por lo que también se comprueba que el programa entrega buenos resultados en los alimentadores.

Los índices que se muestran en la tabla B.5 representan algo similar a los que se muestran en la tabla B.4. SAIFI sería el equivalente a la tasa de falla, es decir, son el número de fallas que se espera tenga en promedio un usuario del alimentador, por lo que el análisis de los resultados sería similar al que se realizó con la tasa de falla. SAIDI sería el equivalente a la indisponibilidad, es decir, son las horas al año que se espera que un usuario del alimentador se quede sin energía. CAIDI sería el equivalente al tiempo de reparación, es decir, son las horas que se espera esté un cliente del alimentador sin energía si sufre un corte. Se debe notar que estos índices arrojaron resultados muy parecidos a aquellos que se obtuvieron en sus puntos de carga por lo que si son un buen indicativo de la confiabilidad que tienen los usuarios. ENS es un índice que indica la energía que se espera no se suministre en el alimentador debido a cortes. Este es un índice que ayuda a dos cosas: primero, a saber la confiabilidad de la red ya que entre menor sea este índice mejor será la confiabilidad y segundo, se puede obtener a partir de este índice, las pérdidas de dinero que se tienen debido a los cortes a los usuarios.

Tabla B.4. Índices de confiabilidad en los puntos de carga.

Punto de Carga	Tasa de falla* λ (fallas/año)	Tasa de falla λ (fallas/año)	Tiempo de reparación* (horas)	Tiempo de reparación (horas)	Indisponibilidad* (horas/año)	Indisponibilidad (horas/año)
3	0.295	0.2960	11.65	11.3175	3.44	3.3492
4	0.308	0.3048	11.37	11.0965	3.50	3.3814
7	0.305	0.3075	11.43	11.3146	3.49	3.4788
8	0.182	0.1876	1.86	1.7249	0.34	0.3237
9	0.192	0.1972	2.02	1.9025	0.39	0.3751
10	0.195	0.2003	2.07	1.9380	0.40	0.3882
11	0.298	0.2964	11.72	11.7683	3.49	3.4873
13	0.295	0.2980	11.78	11.5295	3.48	3.4350
15	0.295	0.2974	11.78	11.7871	3.48	3.5047
17	0.295	0.2849	11.78	11.7350	3.48	3.3429
18	0.311	0.3027	11.23	11.5703	3.49	3.5019
19	0.301	0.2966	11.44	11.9398	3.44	3.5405
22	0.301	0.2977	11.44	11.7523	3.44	3.4982
25	0.301	0.2967	11.44	11.6884	3.44	3.4675
26	0.189	0.1854	2.04	2.03363	0.39	0.3776
27	0.192	0.1851	2.08	1.8333	0.40	0.3394
29	0.192	0.1928	1.81	1.7068	0.35	0.3292
30	0.202	0.2045	1.97	1.8256	0.40	0.3734
34	0.289	0.2847	11.87	12.0763	3.43	3.4377
35	0.302	0.2983	11.57	11.4306	3.50	3.4093
37	0.302	0.2939	11.57	11.6920	3.50	3.4351

*Resultados obtenidos de la referencia.

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

Tabla B.5 Índices de confiabilidad por usuario en los alimentadores.

Alimentador	SAIFI*	SAIFI	SAIDI*	SAIDI	CAIDI*	CAIDI	ENS*	ENS
1	0.302	0.3053	3.47	3.4162	11.50	11.188	12196	12153.76
2	0.190	0.1917	0.38	0.3469	1.98	1.8096	1323	1220.82
3	0.294	0.2971	3.47	3.3859	11.81	11.395	12007	11561.27
4	0.308	0.3117	3.48	3.5344	11.30	11.336	13930	14175.96
5	0.187	0.1905	0.37	0.4265	2.00	2.2383	1120	1279.46
6	0.195	0.2011	0.37	0.3898	1.87	1.9381	1268	1423.34
7	0.298	0.2973	3.47	3.3488	11.67	11.262	12469	12136.34

*Resultados obtenidos de la referencia.

Ya que se comprueba que el programa está operando adecuadamente se puede realizar varias pruebas que no se realizan en la referencia. Primero se realizan varias simulaciones tomando diversos número de veces en que se ejecuta un año para el Monte Carlo, los resultados son presentados en las tablas B.6-B.8. En la primera tabla se muestra como varía el SAIFI en los siete alimentadores, se puede observar que en algunos alimentadores como el 1 y el 6 se obtienen buenos resultados aun cuando se toman pocas veces en que se simula un año. Sin embargo, en otros alimentadores como el 3 y el 7 no se obtienen buenos resultados cuando se simulan pocas veces un año (50 a 200). En todos los casos llega un punto en que aun aumentando el número de veces que se simula un año ya no varía los resultados, para unos alimentadores este punto son pocos y para otros son muchos.

Tabla B.6. SAIFI simulando diversas veces un año.

Alim\Veces	50	100	200	500	1000	3000	5000	10000	15000
1	0.2908	0.3115	0.3385	0.3300	0.3312	0.313	0.3033	0.3057	0.3053
2	0.1533	0.1966	0.1850	0.1960	0.1983	0.198	0.1954	0.1893	0.1917
3	0.4394	0.3627	0.3204	0.3033	0.2847	0.302	0.3026	0.2965	0.2971
4	0.2207	0.2539	0.3205	0.3263	0.3394	0.316	0.3114	0.3119	0.3117
5	0.2200	0.1933	0.1850	0.1866	0.1923	0.189	0.1924	0.1886	0.1905
6	0.2133	0.1800	0.2050	0.1893	0.2006	0.187	0.2004	0.2001	0.2011
7	0.1963	0.2240	0.2785	0.3076	0.3121	0.299	0.3043	0.2990	0.2973

La tabla B.7 muestra como varia el CAIDI en los siete alimentadores cuando se simula diversas veces un año. A diferencia de lo que se observó en la tabla 4.6, en este caso en todos los alimentadores se tienen resultados malos cuando se simulan pocas veces y en algunos alimentadores como el 3 y el 7 siguen teniendo resultados con un error considerable aun cuando se simulan diez mil veces un año.

La tabla B.8 muestra como varía la energía no suministrada en los alimentadores cuando se simula diversas veces un año. Se observa que cuando se toman pocas veces, los resultados son malos. En mucho de los alimentadores como el 3 y el 7, aún con muchas

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

veces de simular un año se siguen teniendo errores considerables. Es por ello que se debe de tomar una cantidad suficiente de veces de simulación para obtener buenos resultados de todos los índices y en todos los alimentadores. Tal vez unas redes necesitarán menor o mayor número de veces, eso dependerá de los datos de confiabilidad y del tamaño de la red. Por ejemplo, con tasas de falla mayores de los componentes el número necesario de veces de simulación seguramente será menor, ya que habrá más fallas en un año y eso hará que se cubran más posibles contingencias en menor tiempo.

Tabla B.7. CAIDI simulando diversas veces un año.

Alim\Veces	50	100	200	500	1000	3000	5000	10000	15000
1	15.13	12.28	13.19	9.71	9.10	10.52	11.40	11.18	11.18
2	1.41	1.14	1.37	1.49	1.73	1.77	1.74	1.81	1.80
3	6.55	7.09	13.68	14.37	14.26	11.78	11.40	10.85	11.39
4	25.15	19.08	13.50	13.58	11.25	11.08	11.02	11.20	11.33
5	2.34	2.27	2.24	1.92	2.11	2.20	2.22	2.23	2.23
6	2.02	1.97	1.87	1.99	2.13	2.23	2.12	1.96	1.93
7	24.71	13.85	10.30	10.35	8.01	10.46	10.66	10.74	11.26

Tabla B.8. ENS simulando diversas veces un año.

Alim\Veces	50	100	500	1000	3000	5000	10000	15000
1	12302.3	10784.6	11248.6	11215.9	11514.3	11248.6	11215	12153
2	730.79	777.73	1038.89	1205.34	1221.58	1038.89	1205.3	1220.8
3	8583.7	7868.14	14346.5	14090.2	12346.7	14346.5	14090	11561
4	18294.8	17622.8	17493.8	14773.9	13698.9	17493.8	14773	14175
5	1545.69	1319.0	1080.25	1220.36	1255.77	1080.25	1220.3	1279.4
6	1712.05	1422.04	1358.09	1584.38	1529.47	1358.09	1584.3	1423.3
7	15946.2	10438.0	11461.1	9505.86	11605.5	11461.1	9505.8	12136

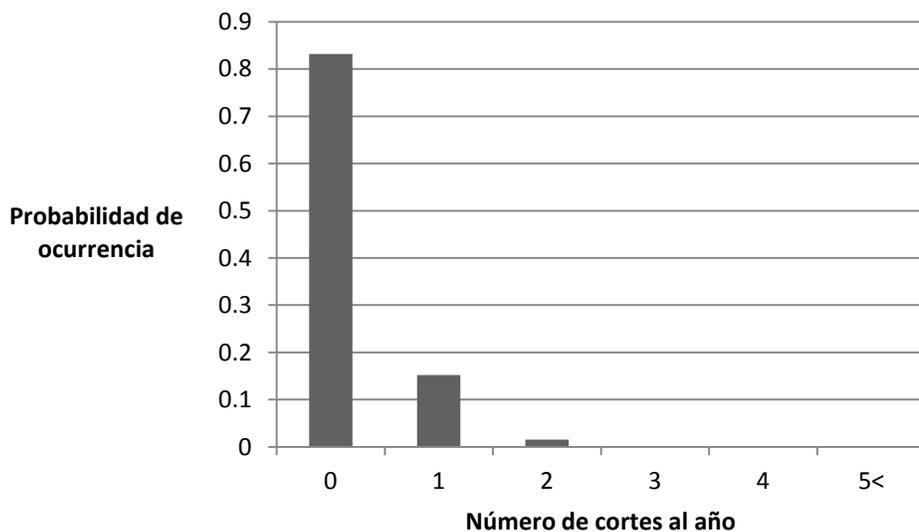


Figura B.2. Densidad de probabilidad de la tasa de falla en el punto de carga 8.

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

Con el programa de Monte Carlo se obtuvieron las densidades de probabilidad de las tasas de falla en los puntos de carga, estas dan un mejor panorama de la confiabilidad de la red. En las figuras B.2 y B.3 se muestran estas densidades en los puntos 8 y 18, no se muestran las densidades de los demás puntos ya que tienen un comportamiento muy similar. Como se observa, en ambos casos hay una gran probabilidad de que no sufran algún corte de energía en un año, además, la diferencia de probabilidad respecto a uno o más cortes es muy grande. Es lógico que se tengan resultados así, ya que se está analizando el sistema más completo, además, como se observa en la tabla B.4 las tasas de falla en estos puntos de carga son muy chicas.

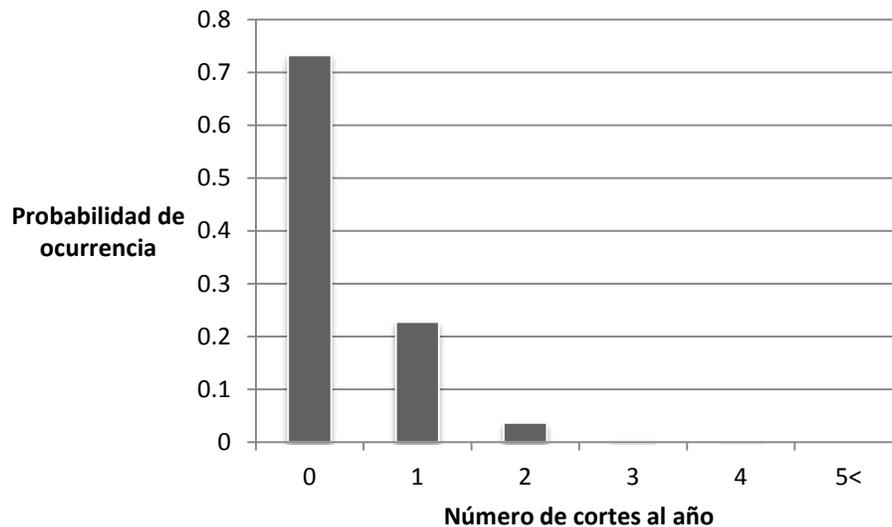


Figura B.3. Densidad de probabilidad de la tasa de falla en el punto de carga 18.

En las figuras B.4 y B.5 se muestran las densidades de probabilidad de la indisponibilidad en los puntos de carga 8 y 18. De la tabla B.4 se observa que la indisponibilidad para el punto 8 es de 0.3237 horas al año por lo que es lógico que se tenga una mayor probabilidad de que en ese punto se tenga entre cero y una hora sin energía al año, esto se verifica en la figura B.4. Sin embargo, en el caso del punto de carga 18, se observa de la tabla B.4 que su indisponibilidad es de 3.5019 horas al año por lo que sería lógico que la mayor probabilidad estuviera entre 3 y 4 horas. No obstante, de la figura B.5 se observa que hay mayor probabilidad de que se tenga entre cero y una hora sin energía. Esto se debe a que también hay una probabilidad de 0.022 de que se tengan nueve o más horas sin energía, aunque esta probabilidad es muy chica si repercute directamente a la indisponibilidad esperada final debido a que es una cantidad de horas grande.

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

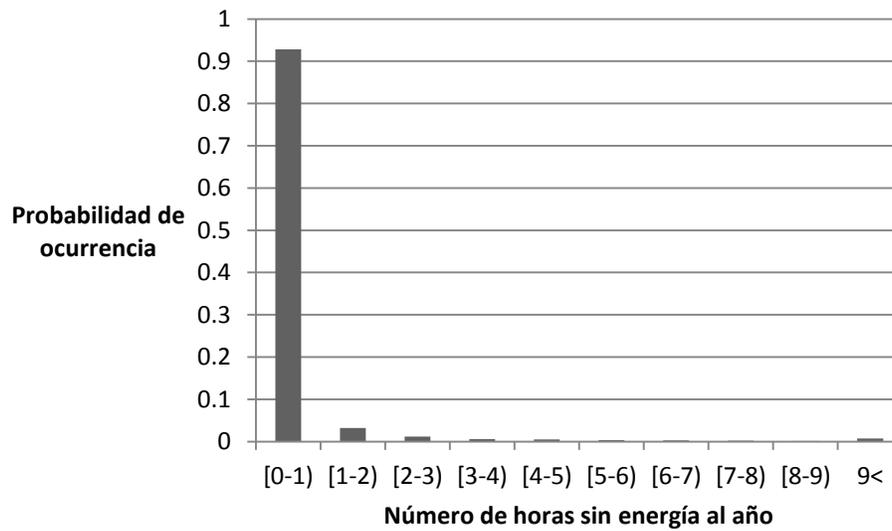


Figura B.4. Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 8.

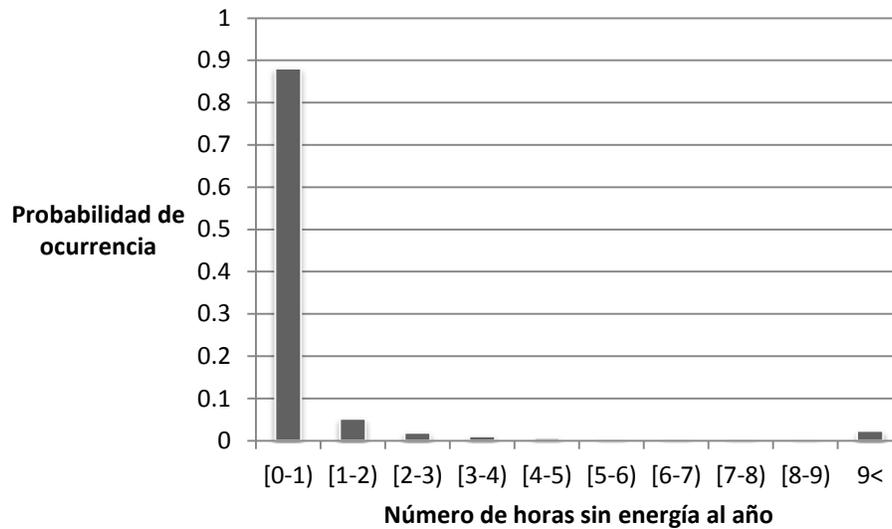


Figura B.5. Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 18.

B.2.2 PRUEBAS SIN CUCHILLAS Y SIN ALIMENTACIÓN ALTERNA

Se realizaron pruebas de la red de la figura B.1 quitando todas las cuchillas, tanto las que están normalmente cerradas como las que están normalmente abiertas, por lo que no se tiene alimentación alterna entre alimentadores. En la tabla B.9 se presentan los índices de confiabilidad en los siete alimentadores para este caso y para el caso de la red completa. Comparando estos resultados, se observa que el quitar las cuchillas hace que aumenten todos los índices menos el SAIFI, este se mantiene igual. Esto se debe a que las cuchillas

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

no hacen que disminuyan las fallas, hace disminuyan las horas sin energía y eso directamente afecta al SAIDI, CAIDI y a la ENS. Sin embargo, si las cuchillas fueran automáticas las restauraciones serían muy rápidas, lo que haría que también se disminuyera las fallas sostenidas y por lo tanto que afectaría el SAIFI, no obstante, haría que se incrementará las fallas momentáneas y por lo tanto que aumentará el MAIFI.

Tabla B.9 Índices de confiabilidad por usuario en los alimentadores con y sin cuchillas.

Alimentador	SAIFI*	SAIFI	SAIDI*	SAIDI	CAIDI*	CAIDI	ENS*	ENS
1	0.3053	0.3098	3.4162	4.3544	11.188	14.053	12153.76	15213.26
2	0.1917	0.1945	0.3469	0.9429	1.8096	4.847	1220.82	3305.83
3	0.2971	0.2997	3.3859	4.3035	11.395	14.355	11561.27	14863.12
4	0.3117	0.3135	3.5344	4.5891	11.336	14.638	14175.96	18155.85
5	0.1905	0.1888	0.4265	0.9407	2.2383	4.981	1279.46	2821.97
6	0.2011	0.1955	0.3898	0.9317	1.9381	4.764	1423.34	3254.89
7	0.2973	0.3096	3.3488	4.4505	11.262	14.372	12136.34	15863.18

*Resultados obtenidos con cuchillas.

Para este caso también se obtuvieron las densidades de probabilidad de las tasas de falla en los puntos de carga 8 y 18, éstas se muestran en las figuras B.6 y B.7. Comparándolas con las figuras B.2 y B.3 se observa que estas densidades no se modifican, por lo que las restauraciones no modifican en nada el número de cortes en los puntos de carga.

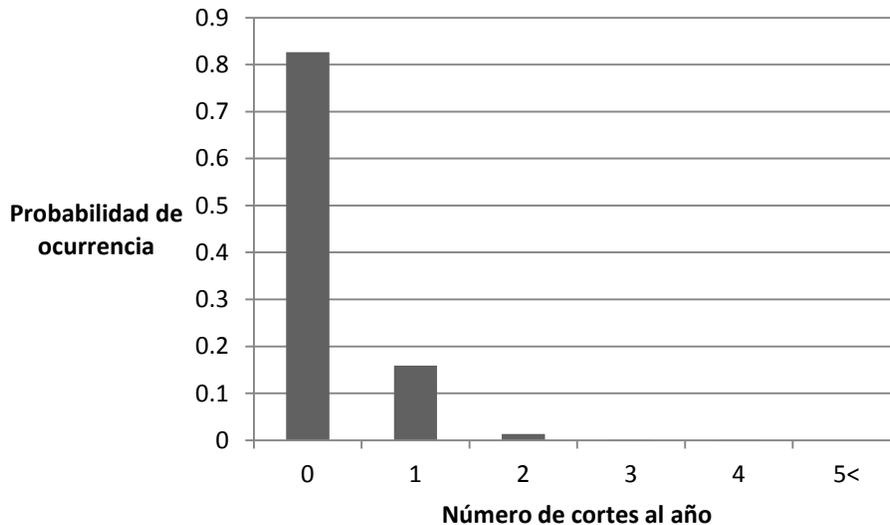


Figura B.6. Densidad de probabilidad de la tasa de falla en el punto de carga 8 sin cuchillas en la red.

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

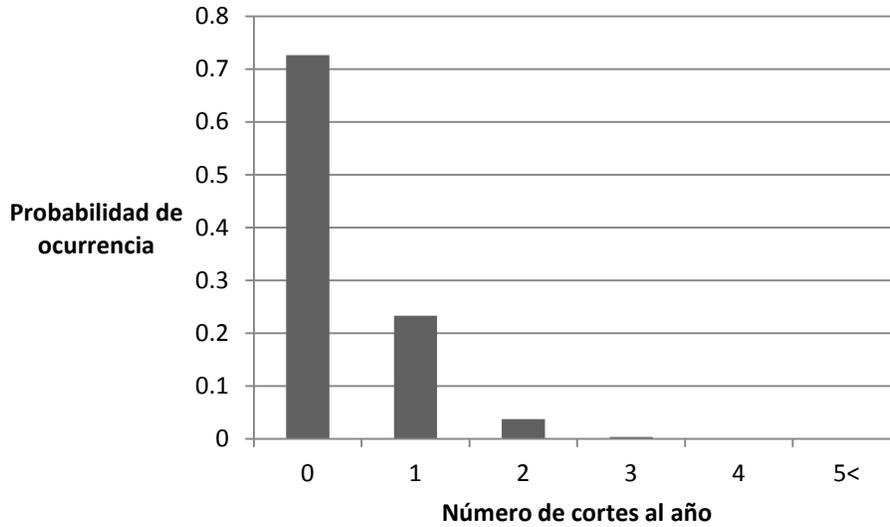


Figura B.7. Densidad de probabilidad de la tasa de falla en el punto de carga 18 sin cuchillas en la red.

Las densidades de probabilidad de la indisponibilidad en los puntos de carga 8 y 18 para este caso se muestran en las figuras B.8 y B.9. Comparándolas con las figuras 4.4 y 4.5, se observa que bajan las probabilidades para pocas horas (0-1), en cambio van aumentando las probabilidades para mayores horas, para más de nueve horas aumenta considerablemente. De esta manera se puede decir que las restauraciones harán que bajen los tiempos de corte.

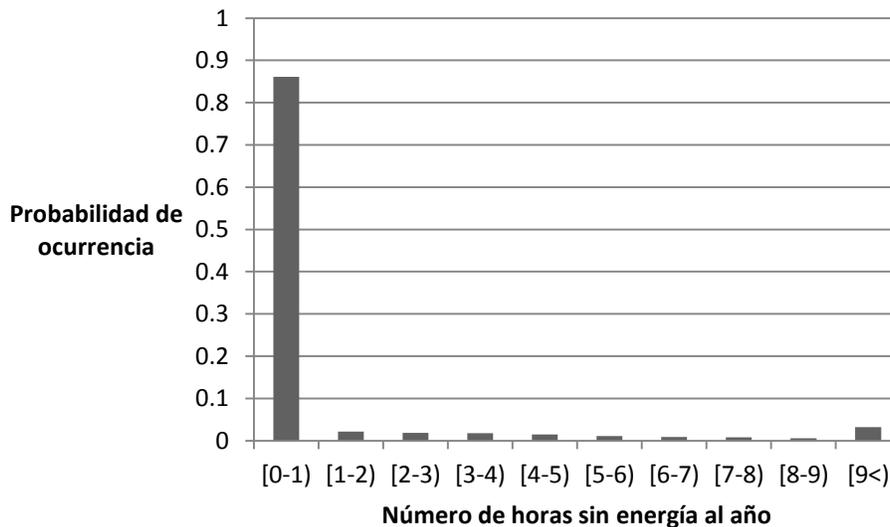


Figura B.8. Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 8 sin cuchillas en la red.

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

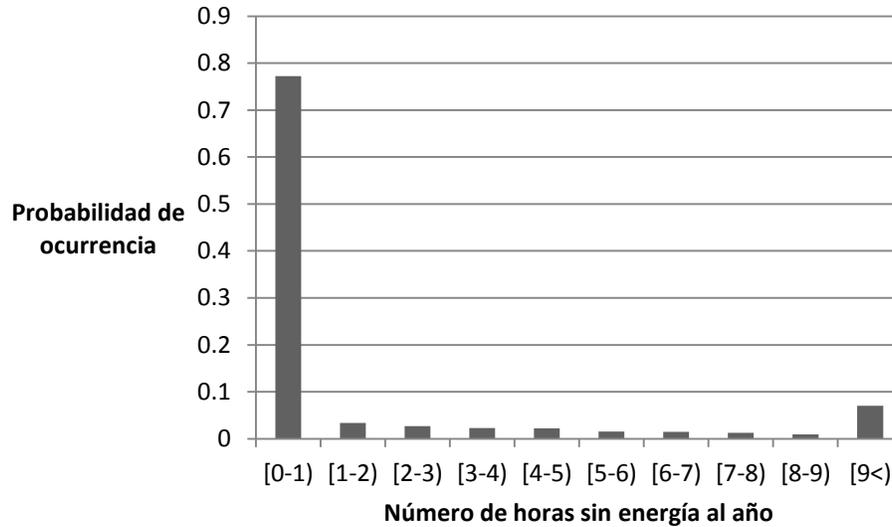


Figura B.9. Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 18 sin cuchillas en la red.

B.2.3 PRUEBAS SIN FUSIBLES

Se realizaron pruebas de la red de la figura B.1 quitando todos los fusibles. En la tabla B.10 se presentan los índices de confiabilidad en los 7 alimentadores para este caso y para el caso de la red completa. A diferencia con el caso anterior (sin cuchillas), en éste si se modifican todos los índices de confiabilidad, el SAIFI, SAIDI y la ENS aumentan, mientras el CAIDI disminuye. Con esto se puede decir que los fusibles afectan tanto al número de cortes como al tiempo de indisponibilidad.

Tabla B.10 Índices de confiabilidad por usuario en los alimentadores con y sin fusibles.

Alimentador	SAIFI*	SAIFI	SAIDI*	SAIDI	CAIDI*	CAIDI	ENS	ENS
1	0.3053	0.6725	3.4162	5.0012	11.188	7.43	12153.76	18892.71
2	0.1917	0.2950	0.3469	0.4352	1.8096	1.475	1220.82	1527.30
3	0.2971	0.6527	3.3859	5.2015	11.395	7.968	11561.27	19304.04
4	0.3117	0.7340	3.5344	6.2654	11.336	8.535	14175.96	25802.79
5	0.1905	0.2844	0.4265	0.4999	2.2383	1.757	1279.46	1499.73
6	0.2011	0.2862	0.3898	0.4787	1.9381	1.670	1423.34	1732.87
7	0.2973	0.6705	3.3488	5.6750	11.262	8.463	12136.34	21090.53

*Resultados obtenidos con fusibles.

Para este caso también se obtuvieron las densidades de probabilidad de la tasa de falla en los puntos de carga 8 y 18, éstas se muestran en las figuras B.10 y B.11. Comparándolas con las figuras B.2 y B.3 se observa que las probabilidades de cero cortes disminuyen, en cambio para uno o más cortes aumentan.

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

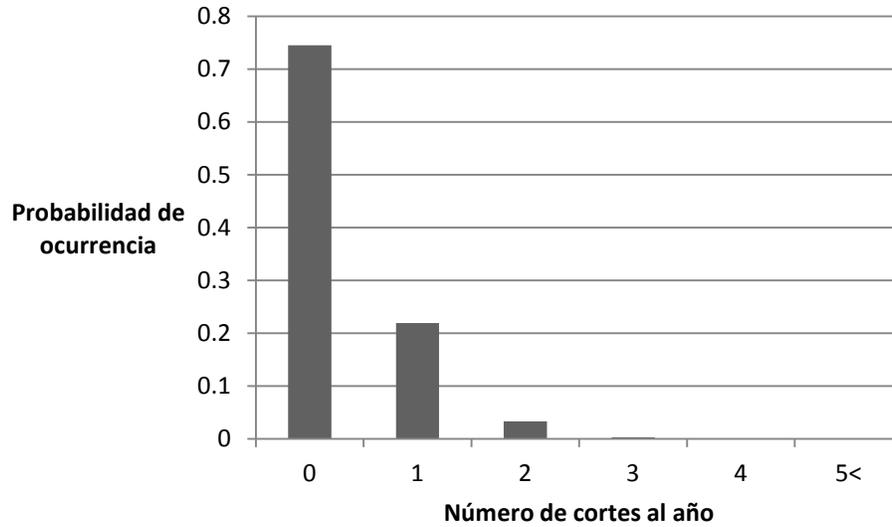


Figura B.10. Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 8 sin fusibles en la red.

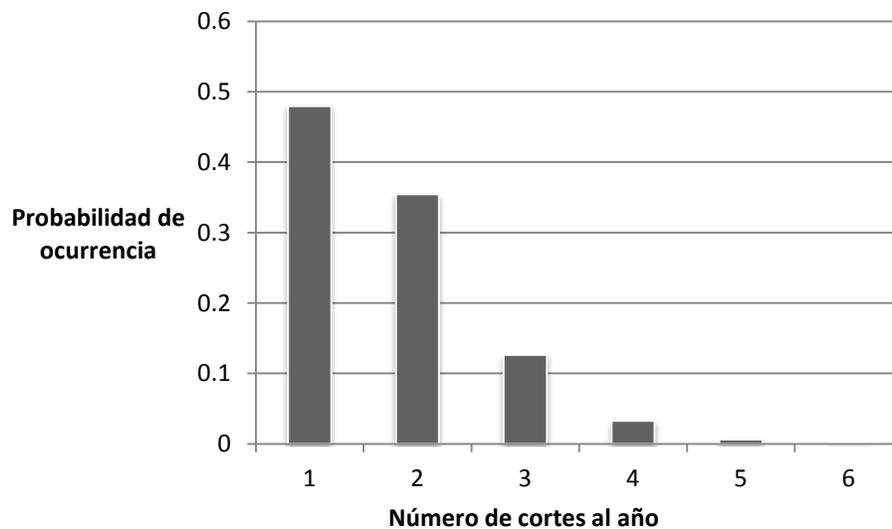


Figura B.11. Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 18 sin fusibles en la red.

Las densidades de probabilidad de la indisponibilidad en los puntos de carga 8 y 18 para este caso se muestran en las figuras B.12 y B.13. Comparándolas con las figuras B.4 y B.5, se observa que bajan las probabilidades para pocas horas (0-1), en cambio van aumentando las probabilidades para mayores horas, para más de nueve horas aumenta considerablemente. De esta manera se puede decir que los fusibles harán que bajen no sólo los cortes a usuarios, sino también las horas de corte.

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

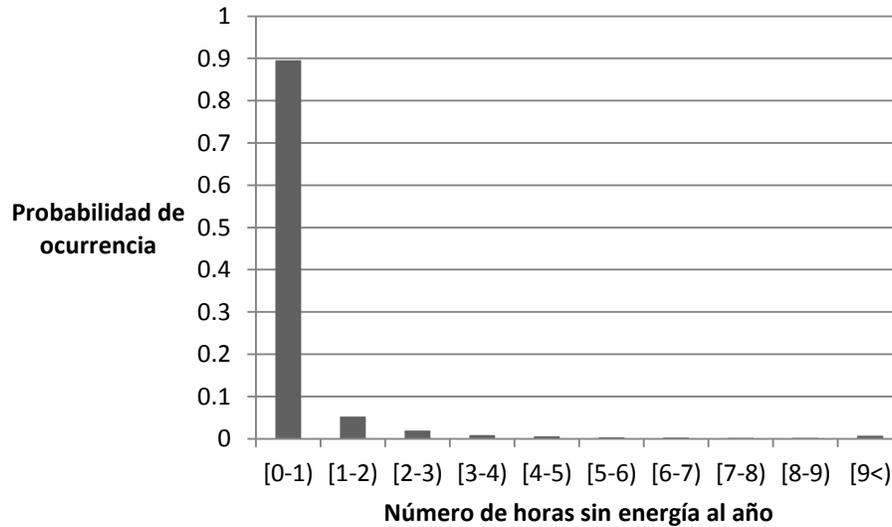


Figura B.12. Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 8 sin fusibles en la red.

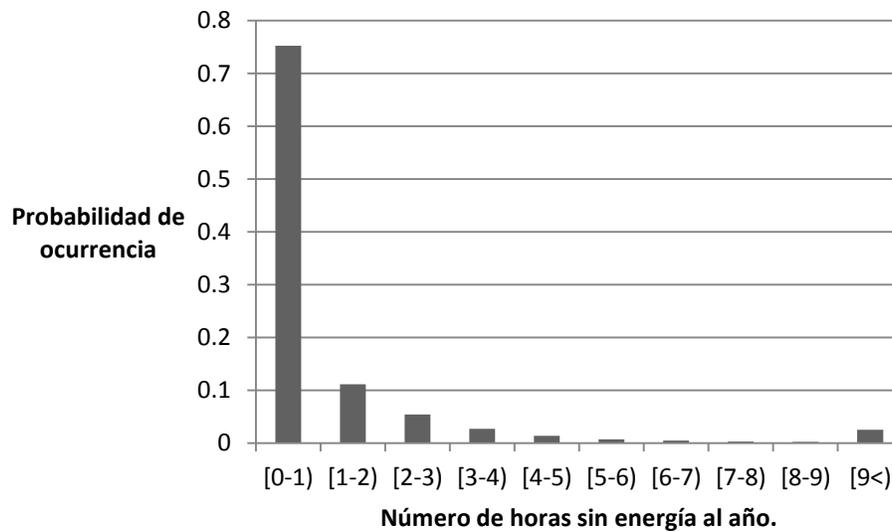


Figura B.13. Densidad de probabilidad de la indisponibilidad en el punto de carga 18 sin fusibles en la red.

B.2.4 PRUEBAS CON RESTAURADORES

En las pruebas anteriores se tomaron los interruptores con una función en la cual ante una falla abrían, teniendo una función similar a la de los fusibles. En estas pruebas se van a tomar los interruptores con funciones como la de los restauradores, para ver que tanto afecta esto a la confiabilidad de la red. Además se tomará la red más completa, como se muestra en la figura B.1.

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

Se analizan los dos esquemas de protección que fueron descritos en el capítulo 2. El primero, ante una falla operará el restaurador sin importar que esté primero un fusible aguas arriba, este esquema es el “Restaurador-Fusible”. El segundo, ante una falla opera el primer dispositivo de protección que esté aguas arriba, este esquema es el “Fusible-Restaurador”. Se toman varias probabilidades de que cuando ocurra una falla en la red, ésta sea momentánea.

En las tablas B.11 y B.12 se muestran como es afectado el SAIFI con los dos esquemas de protección. Ambos disminuyen este índice cuando aumenta la probabilidad de falla momentánea. Sin embargo, se observa que el primer esquema lo disminuye en mayor medida. Esto es lógico porque al aumentar la probabilidad de falla momentánea hará que disminuya las fallas sostenidas, que es lo que representa el SAIFI. Además, el primer esquema permite que operen más veces los restauradores, lo que hace que disminuya aún más las fallas sostenidas.

B.11. SAIFI utilizando el esquema de protección “Restaurador-Fusible”.

Alimentador	Sin Restaurador	20% de Probabilidad	50% de Probabilidad	80% de Probabilidad
1	0.3053	0.2359	0.1458	0.0618
2	0.1917	0.1521	0.0961	0.0382
3	0.2971	0.2315	0.1468	0.0573
4	0.3117	0.2378	0.1498	0.0624
5	0.1905	0.1461	0.0913	0.0365
6	0.2011	0.1510	0.0973	0.0393
7	0.2973	0.2340	0.1443	0.0560

B.12. SAIFI utilizando el esquema de protección “Fusible-Restaurador”.

Alimentador	Sin Restaurador	20% de Probabilidad	50% de Probabilidad	80% de Probabilidad
1	0.3053	0.2454	0.1811	0.1109
2	0.1917	0.1591	0.1198	0.0772
3	0.2971	0.2450	0.1742	0.1087
4	0.3117	0.2517	0.1822	0.1104
5	0.1905	0.1583	0.1195	0.0742
6	0.2011	0.1636	0.1176	0.0707
7	0.2973	0.2481	0.1768	0.1086

En las tablas B.13 y B.14 se muestran como es afectado el MAIFI con los dos esquemas de protección. Ambos aumentan este índice cuando aumenta la probabilidad de falla momentánea. Sin embargo, se observa que el esquema “Restaurador-Fusible” lo aumenta en mayor medida. Comparando con el SAIFI, se observa que el restaurador afecta al MAIFI de manera contraria. Esto es lógico porque los restauradores hacen que bajen las fallas sostenidas pero hacen que aumenten las fallas momentáneas, que son representadas por el MAIFI.

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

B.13. MAIFI utilizando el esquema de protección “Restaurador-Fusible”.

Alimentador	Sin Restaurador	20% de Probabilidad	50% de Probabilidad	80% de Probabilidad
1	0.01062	0.14385	0.34639	0.53846
2	0.00795	0.06597	0.14593	0.23128
3	0.01002	0.14559	0.34625	0.55703
4	0.01111	0.15079	0.37613	0.57583
5	0.00657	0.06546	0.14620	0.23268
6	0.00791	0.06295	0.14780	0.23157
7	0.00982	0.14606	0.33692	0.53169

B.14. MAIFI utilizando el esquema de protección “Fusible-Restaurador”.

Alimentador	Sin Restaurador	20% de Probabilidad	50% de Probabilidad	80% de Probabilidad
1	0.01062	0.0573	0.1269	0.2034
2	0.00795	0.0356	0.0753	0.1250
3	0.01002	0.0556	0.1266	0.1886
4	0.01111	0.0590	0.1351	0.2080
5	0.00657	0.0360	0.0782	0.1195
6	0.00791	0.0387	0.0813	0.1286
7	0.00982	0.0528	0.1285	0.1933

En las tablas B.15 y B.16 se muestran como es afectado el SAIDI con los dos esquemas de protección. Ambos disminuyen este índice cuando aumenta la probabilidad de falla momentánea. Sin embargo, se observa que el esquema “Restaurador-Fusible” lo disminuye en mayor medida. Esto es lógico porque al aumentar la probabilidad de falla momentánea hará que disminuya las fallas sostenidas y por lo tanto que disminuyan las horas de corte de energía, que esto último es lo que representa el SAIDI. Además, el primer esquema permite que operen más veces los restauradores, lo que hace que disminuya aún más las fallas sostenidas y por lo tanto que disminuyan los tiempos de corte.

B.15. SAIDI utilizando el esquema de protección “Restaurador-Fusible”.

Alimentador	Sin Restaurador	20% de Probabilidad	50% de Probabilidad	80% de Probabilidad
1	3.4162	2.7972	1.7280	0.6475
2	0.3469	0.2897	0.1784	0.0752
3	3.3859	2.7681	1.6503	0.6339
4	3.5344	2.7982	1.5680	0.7118
5	0.4265	0.3527	0.2020	0.0878
6	0.3898	0.3300	0.1957	0.0832
7	3.3488	2.5573	1.7248	0.6767

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

B.16. SAIDI utilizando el esquema de protección "Fusible-Restaurador".

Alimentador	Sin Restaurador	20% de Probabilidad	50% de Probabilidad	80% de Probabilidad
1	3.4162	3.2743	3.0847	3.03971
2	0.3469	0.3187	0.2891	0.2612
3	3.3859	3.4109	3.3731	3.2592
4	3.5344	3.2716	3.0889	3.01307
5	0.4265	0.3890	0.3300	0.2651
6	0.3898	0.3595	0.2999	0.2412
7	3.3488	3.3023	3.1403	3.02063

En las tablas B.17 y B.18 se muestran como es afectada la energía no suministrada con los dos esquemas de protección. Ambos disminuyen este índice cuando aumenta la probabilidad de falla momentánea. Sin embargo, se observa que el esquema "Restaurador fusible" lo disminuye en mayor medida. Esto es lógico porque al aumentar la probabilidad de falla momentánea hará que disminuya las fallas sostenidas y las horas de corte de energía, y esto hará instintivamente que disminuya la energía no suministrada. Además, el primer esquema permite que operen más veces los restauradores, lo que hace que disminuya aún más las fallas sostenidas, los tiempos de corte y por lo tanto la energía no suministrada.

B.17. ENS utilizando el esquema de protección "Restaurado-Fusible".

Alimentador	Sin Restaurador	20% de Probabilidad	50% de Probabilidad	80% de Probabilidad
1	12153.76	9895.38	6179.64	2247.93
2	1220.82	1020.32	623.72	266.48
3	11561.27	9839.32	5799.03	2223.42
4	14175.96	11454.54	6584.40	2800.40
5	1279.46	1058.31	606.22	263.56
6	1423.34	1211.53	709.01	304.56
7	12136.34	9442.58	6325.00	2474.00

B.18. ENS utilizando el esquema de protección "Fusible-Restaurador".

Alimentador	Sin Restaurador	20% de Probabilidad	50% de Probabilidad	80% de Probabilidad
1	12153.76	11878.17	10911.68	10844.86
2	1220.82	1113.73	1021.48	929.88
3	11561.27	11615.54	11000.08	10828.52
4	14175.96	13276.50	12662.04	12602.20
5	1279.46	1167.22	990.18	795.54
6	1423.34	1305.51	1059.86	847.66
7	12136.34	11779.66	11122.12	11085.09

ANEXO B: PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

Los dos esquemas que fueron analizados en esta sección sirven para disminuir las fallas sostenidas, los tiempos de corte y por lo tanto la energía no suministrada. Sin embargo, el esquema “Restaurador-Fusible” los reduce en mayor medida. El utilizar uno u otro esquema en una red dependerá de los tipos de clientes que haya, ya que no tendrá caso utilizar el primer esquema cuando una falla momentánea afecte de igual forma a un cliente que una falla sostenida, como podría ser el caso de industrias en las cuales una interrupción momentánea afecte sus ciclos de producción.

ANEXO C: DATOS DEL ALIMENTADOR REAL

C.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se muestran los datos del alimentador utilizado para realizar las pruebas de la sección 4.3.

C.2 DESCRIPCIÓN DEL ALIMENTADOR

El alimentador muestra las siguientes características:

- Voltaje de 23 kV.
- Está formado por 462 secciones de línea, de las cuales 190 son trifásicas y 272 bifásicas.
- Tiene 191 puntos de carga.
- Suministra a 3524.2 clientes.
- Tiene una demanda media total de 10138.5 kW.

En la figura C.1 se muestra donde están ubicadas las 462 secciones de línea en el alimentador. En la tabla C.1 se muestra detalladamente las características de cada una de las secciones que conforman el alimentador y en la tabla C.2 se muestra las características de los 191 puntos de carga.

ANEXO C: DATOS DEL ALIMENTADOR REAL

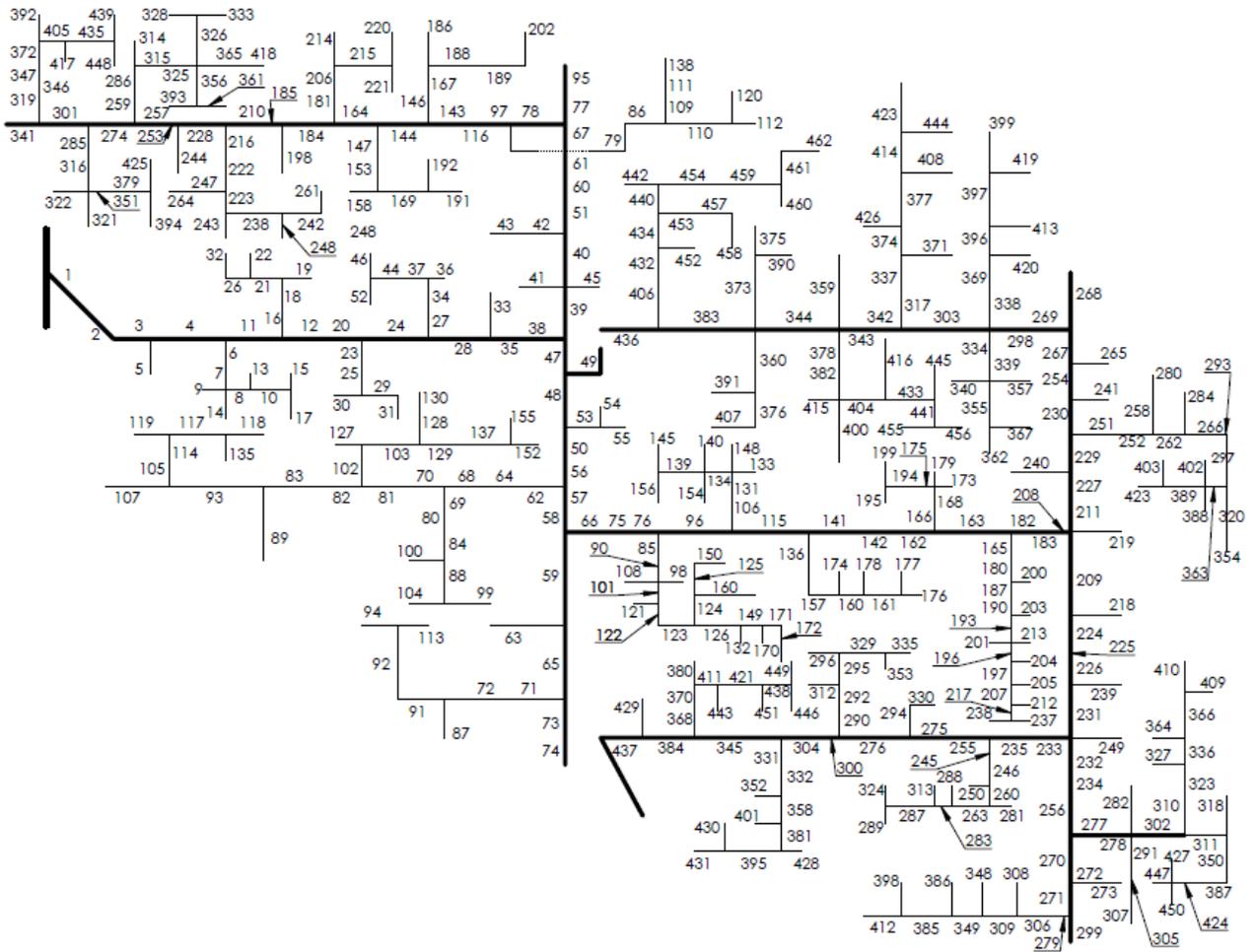


Figura C.1. Secciones de línea del alimentador real.

Tabla C.1 Características de las secciones de línea.

Sección de línea	Fases	Tipo de conductor	Longitud (m)	Sección de línea	Fases	Tipo de Conductor	Longitud (m)
1	ABCN	477 AAC	522	232	ABCN	336 AAC	107
2	ABCN	336 AAC	7	233	ABCN	336 AAC	45
3	ABCN	336 AAC	34	234	ABCN	336 AAC	91
4	ABCN	336 AAC	281	235	ABCN	336 AAC	44
5	AB N	2/0 ACSR	22	236	AB N	2 ACSR	49
6	AB N	2/0 ACSR	16	237	ABCN	2/0 ACSR	30
7	AB N	2/0 ACSR	34	238	AB N	2/0 ACSR	48
8	AB N	2/0 ACSR	88	239	ABCN	2/0 ACSR	44
9	AB N	2/0 ACSR	124	240	ABCN	2/0 ACSR	98
10	AB N	2 ACSR	65	241	ABCN	2 ACSR	64
11	ABCN	336 AAC	78	242	AB N	2/0 ACSR	43
12	ABCN	336 AAC	36	243	AB N	2/0 ACSR	36
13	AB N	2/0 ACSR	58	244	ABCN	1/0 ACSR	33
14	AB N	2/0 ACSR	72	245	AB N	2/0 ACSR	24

ANEXO C: DATOS DEL ALIMENTADOR REAL

15	AB N	2/0 ACSR	56	246	AB N	2/0 ACSR	26
16	AB N	2/0 ACSR	30	247	AB N	2/0 ACSR	35
17	AB N	2/0 ACSR	89	248	AB N	2/0 ACSR	47
18	AB N	2/0 ACSR	18	249	AB N	2/0 ACSR	161
19	AB N	2 ACSR	50	250	AB N	2/0 ACSR	39
20	ABCN	336 AAC	269	251	ABCN	1/0 ACSR	22
21	AB N	2/0 ACSR	110	252	AB N	1/0 ACSR	108
22	AB N	2/0 ACSR	107	253	ABCN	336 AAC	24
23	AB N	2 ACSR	12	254	ABCN	336 AAC	57
24	ABCN	336 AAC	79	255	ABCN	336 AAC	53
25	AB N	2 ACSR	38	256	ABCN	336 AAC	76
26	AB N	2/0 ACSR	69	257	ABCN	336 AAC	35
27	AB N	2/0 ACSR	31	258	AB N	2/0 ACSR	32
28	ABCN	336 AAC	73	259	ABCN	2 ACSR	47
29	AB N	2/0 ACSR	40	260	AB N	2/0 ACSR	49
30	AB N	2/0 ACSR	59	261	AB N	2/0 ACSR	118
31	AB N	2/0 ACSR	190	262	AB N	1/0 ACSR	49
32	AB N	2/0 ACSR	83	263	AB N	2 ACSR	52
33	ABCN	2/0 ACSR	41	264	AB N	2/0 ACSR	150
34	AB N	2/0 ACSR	19	265	ABCN	2 ACSR	64
35	ABCN	336 AAC	54	266	AB N	1/0 ACSR	48
36	AB N	2/0 ACSR	45	267	ABCN	336 AAC	31
37	AB N	2 ACSR	49	268	ABCN	336 AAC	29
38	ABCN	336 AAC	28	269	ABCN	336 AAC	44
39	ABCN	336 AAC	100	270	ABCN	336 AAC	246
40	ABCN	336 AAC	119	271	ABCN	336 AAC	96
41	ABCN	2 ACSR	214	272	ABCN	336 AAC	25
42	ABCN	2 ACSR	139	273	ABCN	336 AAC	16
43	ABCN	2 ACSR	58	274	ABCN	336 AAC	330
44	AB N	2/0 ACSR	49	275	ABCN	336 AAC	42
45	ABCN	2/0 ACSR	55	276	ABCN	336 AAC	158
46	AB N	2/0 ACSR	56	277	ABCN	336 AAC	23
47	ABCN	336 AAC	95	278	ABCN	336 AAC	61
48	ABCN	336 AAC	141	279	AB N	2/0 ACSR	56
49	ABCN	336 AAC	43	280	AB N	2 ACSR	144
50	ABCN	336 AAC	82	281	AB N	2/0 ACSR	40
51	ABCN	336 AAC	60	282	ABCN	2/0 ACSR	69
52	AB N	2/0 ACSR	92	283	AB N	2/0 ACSR	49
53	ABCN	2 ACSR	15	284	AB N	2/0 ACSR	78
54	ABCN	2 ACSR	70	285	AB N	2/0 ACSR	23
55	ABCN	2 ACSR	39	286	ABCN	2 ACSR	66

ANEXO C: DATOS DEL ALIMENTADOR REAL

56	ABCN	336 AAC	28	287	AB N	2/0 ACSR	50
57	ABCN	336 AAC	119	288	AB N	2/0 ACSR	43
58	ABCN	336 AAC	74	289	AB N	2/0 ACSR	99
59	ABCN	336 AAC	91	290	AB N	2/0 ACSR	25
60	ABCN	336 AAC	65	291	AB N	2/0 ACSR	27
61	ABCN	336 AAC	90	292	AB N	2/0 ACSR	24
62	ABCN	2/0 ACSR	30	293	AB N	2/0 ACSR	35
63	ABCN	1/0 ACSR	124	294	AB N	2/0 ACSR	21
64	ABCN	2/0 ACSR	53	295	AB N	2/0 ACSR	51
65	ABCN	336 AAC	59	296	AB N	2/0 ACSR	40
66	ABCN	336 AAC	53	297	AB N	2/0 ACSR	38
67	ABCN	336 AAC	27	298	ABCN	336 AAC	118
68	ABCN	2/0 ACSR	12	299	ABCN	336 AAC	82
69	AB N	2/0 ACSR	19	300	ABCN	336 AAC	48
70	ABCN	2/0 ACSR	51	301	ABCN	336 AAC	20
71	AB N	2/0 ACSR	39	302	ABCN	336 AAC	151
72	AB N	2/0 ACSR	36	303	ABCN	336 AAC	332
73	ABCN	336 AAC	70	304	ABCN	336 AAC	20
74	ABCN	336 AAC	99	305	AB N	2/0 ACSR	123
75	ABCN	336 AAC	22	306	AB N	2/0 ACSR	38
76	ABCN	336 AAC	19	307	AB N	2 ACSR	43
77	ABCN	336 AAC	59	308	AB N	2/0 ACSR	31
78	ABCN	336 AAC	7	309	AB N	2 ACSR	103
79	ABCN	2 ACSR	45	310	AB N	2/0 ACSR	32
80	AB N	2/0 ACSR	16	311	ABCN	2/0 ACSR	49
81	ABCN	2/0 ACSR	37	312	AB N	2/0 ACSR	44
82	AB N	2/0 ACSR	221	313	AB N	2/0 ACSR	44
83	AB N	2/0 ACSR	29	314	ABCN	1/0 ACSR	110
84	AB N	2/0 ACSR	14	315	ABCN	2 ACSR	59
85	ABCN	2/0 ACSR	17	316	AB N	2 ACSR	20
86	ABCN	2 ACSR	34	317	AB N	2/0 ACSR	26
87	AB N	2/0 ACSR	32	318	ABCN	2 ACSR	48
88	AB N	2 ACSR	50	319	AB N	2/0 ACSR	33
89	AB N	2/0 ACSR	133	320	AB N	2/0 ACSR	10
90	ABCN	2/0 ACSR	34	321	AB N	2 ACSR	140
91	AB N	2 ACSR	108	322	AB N	2/0 ACSR	118
92	AB N	2/0 ACSR	78	323	AB N	2/0 ACSR	19
93	AB N	2/0 ACSR	39	324	AB N	2/0 ACSR	46
94	AB N	2/0 ACSR	88	325	AB N	2 ACSR	76
95	ABCN	336 AAC	20	326	AB N	2/0 ACSR	107
96	ABCN	336 AAC	84	327	AB N	2/0 ACSR	65

ANEXO C: DATOS DEL ALIMENTADOR REAL

97	ABCN	336 AAC	6	328	AB N	2 ACSR	90
98	ABCN	2 ACSR	40	329	AB N	2/0 ACSR	49
99	AB N	2/0 ACSR	54	330	AB N	2 ACSR	71
100	AB N	2/0 ACSR	44	331	AB N	2/0 ACSR	28
101	ABCN	2/0 ACSR	99	332	AB N	2/0 ACSR	16
102	ABCN	2/0 ACSR	58	333	AB N	2/0 ACSR	84
103	ABCN	2/0 ACSR	44	334	AB N	2/0 ACSR	32
104	AB N	2/0 ACSR	110	335	AB N	2/0 ACSR	95
105	AB N	2/0 ACSR	27	336	AB N	2/0 ACSR	51
106	AB N	2/0 ACSR	24	337	AB N	2/0 ACSR	75
107	AB N	2/0 ACSR	14	338	AB N	2 ACSR	27
108	ABCN	2 ACSR	49	339	AB N	2/0 ACSR	18
109	ABCN	2/0 ACSR	64	340	AB N	2/0 ACSR	100
110	ABCN	2/0 ACSR	33	341	ABCN	336 AAC	93
111	ABCN	2/0 ACSR	38	342	ABCN	336 AAC	56
112	ABCN	2/0 ACSR	125	343	ABCN	336 AAC	29
113	AB N	2/0 ACSR	39	344	ABCN	336 AAC	244
114	AB N	2/0 ACSR	25	345	ABCN	336 AAC	168
115	ABCN	336 AAC	159	346	AB N	2/0 ACSR	136
116	ABCN	336 AAC	10	347	AB N	2/0 ACSR	68
117	AB N	2 ACSR	114	348	AB N	2 ACSR	48
118	AB N	2/0 ACSR	85	349	AB N	2/0 ACSR	41
119	AB N	2/0 ACSR	56	350	ABCN	2/0 ACSR	198
120	ABCN	2 ACSR	91	351	AB N	2/0 ACSR	47
121	ABCN	2/0 ACSR	42	352	AB N	2/0 ACSR	130
122	ABCN	2 ACSR	129	353	AB N	2/0 ACSR	37
123	ABCN	2/0 ACSR	54	354	AB N	2/0 ACSR	90
124	ABCN	2/0 ACSR	38	355	AB N	2/0 ACSR	80
125	ABCN	2/0 ACSR	70	356	AB N	2/0 ACSR	93
126	AB N	2/0 ACSR	42	357	AB N	2/0 ACSR	72
127	AB N	2/0 ACSR	48	358	AB N	2/0 ACSR	52
128	ABCN	2/0 ACSR	49	359	ABCN	2/0 ACSR	182
129	AB N	2/0 ACSR	59	360	ABCN	2 ACSR	50
130	ABCN	2/0 ACSR	74	361	AB N	2/0 ACSR	76
131	AB N	2/0 ACSR	32	362	AB N	2/0 ACSR	174
132	AB N	2/0 ACSR	34	363	AB N	2/0 ACSR	46
133	AB N	2/0 ACSR	39	364	AB N	2/0 ACSR	58
134	AB N	2 ACSR	138	365	AB N	2/0 ACSR	56
135	AB N	2/0 ACSR	53	366	AB N	2/0 ACSR	50
136	AB N	2/0 ACSR	21	367	AB N	2/0 ACSR	79
137	AB N	2/0 ACSR	36	368	ABCN	2/0 ACSR	25

ANEXO C: DATOS DEL ALIMENTADOR REAL

138	ABCN	1/0 ACSR	32	369	AB N	2/0 ACSR	32
139	AB N	2/0 ACSR	49	370	ABCN	2 ACSR	23
140	AB N	2/0 ACSR	45	371	AB N	2 ACSR	52
141	ABCN	336 AAC	107	372	AB N	2/0 ACSR	54
142	ABCN	336 AAC	86	373	ABCN	2 ACSR	85
143	ABCN	336 AAC	16	374	AB N	2 ACSR	80
144	ABCN	336 AAC	79	375	ABCN	2 ACSR	51
145	AB N	2 ACSR	49	376	ABCN	2 ACSR	38
146	ABCN	2/0 ACSR	60	377	AB N	2/0 ACSR	18
147	AB N	2 ACSR	25	378	ABCN	2/0 ACSR	30
148	AB N	2/0 ACSR	126	379	AB N	2/0 ACSR	101
149	AB N	2/0 ACSR	108	380	ABCN	2/0 ACSR	46
150	ABCN	2/0 ACSR	160	381	AB N	2/0 ACSR	56
151	ABCN	2 ACSR	12	382	ABCN	2/0 ACSR	24
152	AB N	2 ACSR	100	383	ABCN	336 AAC	79
153	AB N	2/0 ACSR	24	384	ABCN	336 AAC	84
154	AB N	2/0 ACSR	136	385	AB N	2/0 ACSR	47
155	AB N	2/0 ACSR	32	386	AB N	2/0 ACSR	55
156	AB N	2/0 ACSR	13	387	AB N	2/0 ACSR	34
157	AB N	2/0 ACSR	19	388	AB N	2/0 ACSR	189
158	AB N	2/0 ACSR	46	389	AB N	2/0 ACSR	48
159	ABCN	2 ACSR	12	390	ABCN	2 ACSR	127
160	AB N	2/0 ACSR	49	391	ABCN	2 ACSR	42
161	AB N	2/0 ACSR	49	392	AB N	2/0 ACSR	73
162	ABCN	336 AAC	63	393	AB N	2/0 ACSR	70
163	ABCN	336 AAC	220	394	AB N	2/0 ACSR	130
164	ABCN	336 AAC	62	395	AB N	2/0 ACSR	90
165	ABCN	2/0 ACSR	19	396	AB N	2/0 ACSR	15
166	AB N	2/0 ACSR	22	397	AB N	2/0 ACSR	44
167	ABCN	2/0 ACSR	59	398	AB N	2/0 ACSR	106
168	AB N	2/0 ACSR	27	399	AB N	2/0 ACSR	224
169	AB N	2/0 ACSR	51	400	ABCN	2 ACSR	179
170	AB N	2 ACSR	41	401	AB N	2 ACSR	130
171	AB N	2/0 ACSR	41	402	AB N	2/0 ACSR	114
172	AB N	2 ACSR	12	403	AB N	2/0 ACSR	106
173	AB N	2/0 ACSR	132	404	ABCN	2 ACSR	82
174	AB N	2/0 ACSR	54	405	AB N	2/0 ACSR	64
175	AB N	2/0 ACSR	55	406	AB N	2/0 ACSR	120
176	AB N	2/0 ACSR	103	407	ABCN	2 ACSR	62
177	AB N	2/0 ACSR	59	408	AB N	2/0 ACSR	184
178	AB N	2/0 ACSR	67	409	AB N	2/0 ACSR	107

ANEXO C: DATOS DEL ALIMENTADOR REAL

179	AB N	2 ACSR	132	410	AB N	2/0 ACSR	134
180	ABCN	2/0 ACSR	25	411	AB N	2/0 ACSR	52
181	AB N	2/0 ACSR	27	412	AB N	2/0 ACSR	48
182	ABCN	336 AAC	52	413	AB N	2/0 ACSR	106
183	ABCN	336 AAC	81	414	AB N	2/0 ACSR	49
184	ABCN	336 AAC	25	415	AB N	2/0 ACSR	60
185	ABCN	336 AAC	115	416	AB N	2/0 ACSR	56
186	ABCN	2/0 ACSR	58	417	AB N	2/0 ACSR	78
187	ABCN	2 ACSR	50	418	AB N	2/0 ACSR	42
188	ABCN	2/0 ACSR	27	419	AB N	2/0 ACSR	115
189	ABCN	2/0 ACSR	67	420	AB N	2/0 ACSR	126
190	ABCN	2/0 ACSR	51	421	AB N	2/0 ACSR	50
191	AB N	2/0 ACSR	26	422	AB N	2/0 ACSR	19
192	AB N	2/0 ACSR	34	423	AB N	2/0 ACSR	157
193	ABCN	2/0 ACSR	51	424	AB N	2/0 ACSR	14
194	AB N	2/0 ACSR	91	425	AB N	2 ACSR	37
195	AB N	2/0 ACSR	125	426	AB N	2/0 ACSR	124
196	ABCN	2/0 ACSR	64	427	AB N	2/0 ACSR	109
197	ABCN	2/0 ACSR	42	428	AB N	2/0 ACSR	121
198	ABCN	2/0 ACSR	26	429	ABCN	2 ACSR	130
199	AB N	2/0 ACSR	64	430	AB N	2/0 ACSR	49
200	ABCN	2/0 ACSR	42	431	AB N	2/0 ACSR	97
201	ABCN	2/0 ACSR	184	432	AB N	2 ACSR	75
202	ABCN	2 ACSR	72	433	ABCN	2/0 ACSR	41
203	AB N	2/0 ACSR	50	434	AB N	2/0 ACSR	30
204	AB N	2/0 ACSR	56	435	AB N	2 ACSR	77
205	AB N	2/0 ACSR	49	436	ABCN	336 AAC	59
206	AB N	2/0 ACSR	91	437	ABCN	336 AAC	64
207	ABCN	2/0 ACSR	50	438	AB N	2/0 ACSR	50
208	ABCN	336 AAC	58	439	AB N	2/0 ACSR	98
209	ABCN	336 AAC	100	440	AB N	2/0 ACSR	68
210	ABCN	336 AAC	39	441	ABCN	2/0 ACSR	52
211	ABCN	336 AAC	54	442	AB N	2/0 ACSR	54
212	AB N	2/0 ACSR	37	443	AB N	2/0 ACSR	48
213	AB N	2/0 ACSR	42	444	AB N	2/0 ACSR	42
214	AB N	2/0 ACSR	57	445	AB N	2/0 ACSR	115
215	AB N	2 ACSR	48	446	AB N	2/0 ACSR	46
216	AB N	2/0 ACSR	20	447	AB N	2 ACSR	47
217	ABCN	2/0 ACSR	52	448	AB N	2/0 ACSR	87
218	ABCN	2 ACSR	63	449	AB N	2/0 ACSR	100
219	AB N	2 ACSR	198	450	AB N	2/0 ACSR	127

ANEXO C: DATOS DEL ALIMENTADOR REAL

220	AB N	2/0 ACSR	274	451	AB N	2/0 ACSR	48
221	AB N	2/0 ACSR	19	452	AB N	2/0 ACSR	51
222	AB N	2 ACSR	30	453	AB N	2/0 ACSR	55
223	AB N	2/0 ACSR	52	454	AB N	2/0 ACSR	73
224	ABCN	336 AAC	128	455	AB N	2/0 ACSR	120
225	ABCN	336 AAC	27	456	ABCN	2/0 ACSR	92
226	ABCN	336 AAC	194	457	AB N	2/0 ACSR	61
227	ABCN	336 AAC	47	458	AB N	2/0 ACSR	131
228	ABCN	336 AAC	80	459	AB N	2/0 ACSR	41
229	ABCN	336 AAC	145	460	AB N	2 ACSR	59
230	ABCN	336 AAC	91	461	AB N	2/0 ACSR	99
231	ABCN	336 AAC	71	462	AB N	2/0 ACSR	50

Tabla C.2 Características de los puntos de carga.

Punto de Carga	Sección de línea	Demanda Media (kW)	Total de Clientes	Punto de Carga	Sección de línea	Demanda Media (kW)	Total de Clientes
1	5	86.3	30	97	248	38.3	13.3
2	9	57.5	20	98	249	34.5	12
3	13	28.8	10	99	250	57.5	20
4	14	38.3	13.3	100	255	57.5	20
5	15	57.5	20	101	261	57.5	20
6	17	38.3	13.3	102	264	38.3	13.3
7	19	57.5	20	103	265	51.8	18
8	22	38.3	13.3	104	266	28.8	10
9	26	34.5	12	105	280	28.8	10
10	29	34.5	12	106	281	57.5	20
11	30	34.5	12	107	282	86.3	30
12	31	34.5	12	108	284	57.5	20
13	32	34.5	12	109	288	57.5	20
14	33	86.3	30	110	289	28.8	10
15	36	38.3	13.3	111	296	38.3	13.3
16	41	86.3	30	112	307	38.3	13.3
17	42	86.3	30	113	308	86.3	30
18	43	51.8	18	114	312	28.8	10
19	46	38.3	13.3	115	313	57.5	20
20	52	38.3	13.3	116	314	51.8	18
21	54	51.8	18	117	315	86.3	30
22	55	129.4	45	118	318	86.3	30
23	57	86.3	30	119	321	57.5	20
24	60	51.8	18	120	322	28.8	10

ANEXO C: DATOS DEL ALIMENTADOR REAL

25	61	34.5	12	121	324	57.5	20
26	63	86.3	30	122	327	11.5	4
27	69	86.3	30	123	328	57.5	20
28	70	38.3	13.3	124	330	38.3	13.3
29	79	86.3	30	125	333	57.5	20
30	82	28.8	10	126	335	38.3	13.3
31	87	57.5	20	127	340	86.3	30
32	89	34.5	12	128	346	86.3	30
33	94	34.5	12	129	348	86.3	30
34	95	129.4	45	130	352	57.5	20
35	98	28.8	10	131	353	57.5	20
36	99	38.3	13.3	132	354	38.3	13.3
37	100	57.5	20	133	357	38.3	13.3
38	104	38.3	13.3	134	359	86.3	30
39	108	129.4	45	135	361	38.3	13.3
40	109	43.1	15	136	362	38.3	13.3
41	112	51.8	18	137	364	34.5	12
42	113	34.5	12	138	365	34.5	12
43	118	38.3	13.3	139	367	38.3	13.3
44	119	57.5	20	140	371	38.3	13.3
45	120	57.5	20	141	375	86.3	30
46	121	86.3	30	142	380	86.3	30
47	122	51.8	18	143	386	34.5	12
48	127	57.5	20	144	388	38.3	13.3
49	128	57.5	20	145	390	86.3	30
50	130	86.3	30	146	391	172.5	60
51	132	28.8	10	147	392	86.3	30
52	133	57.5	20	148	393	38.3	13.3
53	135	38.3	13.3	149	394	38.3	13.3
54	140	38.3	13.3	150	398	57.5	20
55	145	23	8	151	399	86.3	30
56	148	57.5	20	152	400	86.3	30
57	152	38.3	13.3	153	401	38.3	13.3
58	154	28.8	10	154	402	28.8	10
59	155	38.3	13.3	155	403	38.3	13.3
60	158	57.5	20	156	407	86.3	30
61	162	86.3	30	157	408	57.5	20
62	170	34.5	12	158	409	86.3	30
63	173	28.8	10	159	410	57.5	20
64	174	23	8	160	412	57.5	20
65	176	28.8	10	161	413	57.5	20

ANEXO C: DATOS DEL ALIMENTADOR REAL

66	177	38.3	13.3	162	415	57.5	20
67	178	38.3	13.3	163	416	57.5	20
68	179	57.5	20	164	417	34.5	12
69	183	51.8	18	165	418	34.5	12
70	186	51.8	18	166	419	28.8	10
71	188	51.8	18	167	420	57.5	20
72	192	38.3	13.3	168	423	28.8	10
73	195	34.5	12	169	425	28.8	10
74	199	28.8	10	170	426	38.3	13.3
75	200	86.3	30	171	427	34.5	12
76	201	86.3	30	172	428	11.5	4
77	202	51.8	18	173	430	57.5	20
78	203	38.3	13.3	174	431	34.5	12
79	204	86.3	30	175	439	38.3	13.3
80	205	28.8	10	176	442	28.8	10
81	212	28.8	10	177	443	86.3	30
82	213	38.3	13.3	178	444	38.3	13.3
83	214	34.5	12	179	445	28.8	10
84	218	86.3	30	180	446	57.5	20
85	219	57.5	20	181	447	57.5	20
86	220	38.3	13.3	182	448	34.5	12
87	221	38.3	13.3	183	449	57.5	20
88	234	86.3	30	184	450	38.3	13.3
89	237	86.3	30	185	451	57.5	20
90	238	57.5	20	186	452	28.8	10
91	239	51.8	18	187	455	38.3	13.3
92	240	86.3	30	188	456	129.4	45
93	241	86.3	30	189	458	57.5	20
94	243	38.3	13.3	190	460	28.8	10
95	244	51.8	18	191	462	34.5	12
96	247	34.5	12		TOTAL	5128.4	1782.6

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

D.1 INTRODUCCIÓN

En este apartado se describe el programa que fue desarrollado para la ubicación y selección óptima de los dispositivos de desconexión en los alimentadores de distribución. El programa que evalúa la confiabilidad de redes de distribución está integrado en éste por lo que no se describirá aparte.

D.2 ARCHIVOS DE DATOS

Para la ejecución del programa se tienen que introducir tres archivos de datos, el primero describe lo concerniente a la topología de la red y a la confiabilidad de los componentes, el segundo describe lo concerniente a los puntos de carga y el tercero describe lo concerniente a la optimización de costos de la confiabilidad. Los nombres de estos archivos son introducidos dentro del programa. Para facilitar la creación de estos archivos se va a utilizar la red de la figura D.1, en ella se muestra también los componentes puestos por niveles.

D.2.1 ARCHIVO DE TOPOLOGIA Y CONFIABILIDAD

Este archivo describe la topología de la red de distribución, los datos de confiabilidad de los componentes y datos adicionales, se compone de cinco partes. Para la red de la figura D.1 este archivo sería el que se muestra en la figura D.2.

En la primera parte se deben introducir siete datos, los cuales son: número de años a simular, número de componentes de la red (sin contar cuchillas n.a.), número de niveles, número máximo de componentes en un nivel, número de cuchillas normalmente abiertas, número de puntos de carga y número de alimentadores.

La segunda parte describe los datos de confiabilidad de los componentes y el tipo de componente. La forma en que se introduce es por medio de una matriz de cinco columnas que contiene: el número de componente, la tasa de falla, las horas de reparación esperada, el tipo de componente y el tiempo de conmutación en horas. Este último dato

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

sólo se pone si el componente se trata de una cuchilla, si no es el caso se coloca un cero. Para describir el tipo de componente se utiliza la siguiente enumeración:

1. Bus, Línea, Cable o Transformador. Siempre y cuando no tengan carga en ellos.
2. Punto de Carga, este puede ser un Transformador, Línea, etc.
3. Interruptor
4. Fusible
5. Cuchilla no automatizada.
6. Restaurador.
7. No se utiliza este número.
8. Cuchilla automatizada.

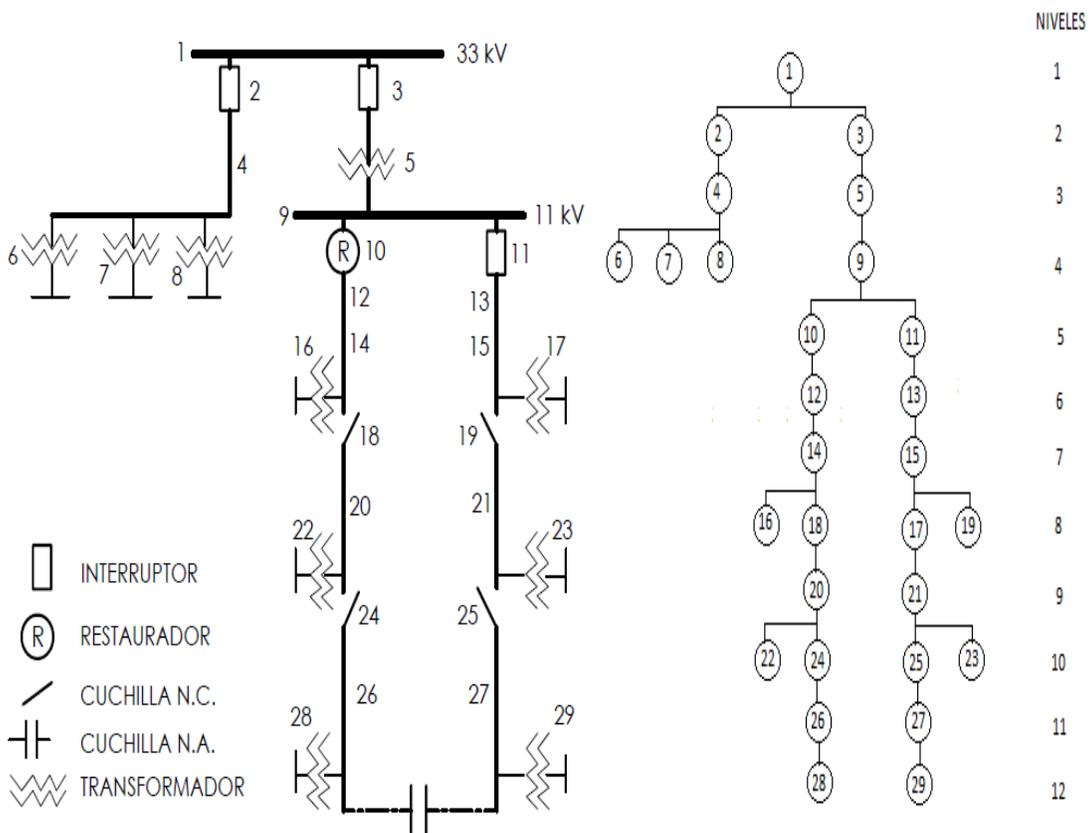


Figura D.1. Red de distribución para la creación de los archivos de datos.

En la tercera y cuarta parte se introducen las matrices de niveles y de conectividad que fueron descritas en la sección 2.3.2.1.1.

La quinta parte es una matriz que describe la información de las cuchillas normalmente abiertas que hay en la red, ésta consta de cuatro columnas que describe: número de componente, el primer componente a la que está conectada, el segundo componente a la que está conectada y su tiempo de conmutación.

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
1000				
29				
12				
4				
1				
9				
3				
PRIMERA PARTE				
1	0.1	3.5	1	0
2	0.001	32	3	0
3	0.001	32	3	0
4	0.1	3.5	1	0
5	0.012	6.5	1	0
6	0.012	6.5	2	0
7	0.012	6.5	2	0
8	0.012	6.5	2	0
9	0.1	3.5	1	0
10	0.001	32	6	0
11	0.001	32	3	0
12	0.1	3.5	1	0
13	0.1	3.5	1	0
14	0.1	3.5	1	0
15	0.1	3.5	1	0
SEGUNDA PARTE				
16	0.012	6.5	2	0
17	0.012	6.5	2	0
18	0.001	5.5	5	1
19	0.001	5.5	5	1
20	0.1	3.5	1	0
21	0.1	3.5	1	0
22	0.012	6.5	2	0
23	0.012	6.5	2	0
24	0.001	5.5	5	1
25	0.001	5.5	5	1
26	0.1	3.5	1	0
27	0.1	3.5	1	0
28	0.012	6.5	2	0
29	0.012	6.5	2	0
1	0	0	0	
2	3	0	0	
4	5	0	0	
6	7	8	9	
10	11	0	0	
12	13	0	0	
14	15	0	0	
TERCERA PARTE				
16	18	17	19	
20	21	0	0	
22	24	25	23	
26	27	0	0	
28	29	0	0	
0	0	0	0	
1	1	0	0	
1	2	0	0	
1	1	1	2	
4	4	0	0	
1	2	0	0	
1	2	0	0	
CUARTA PARTE				
1	1	2	2	
2	3	0	0	
1	1	2	2	
2	3	0	0	
1	2	0	0	
QUINTA PARTE				
30	26	27	1	

Figura D.2. Primer archivo de datos.

D.2.2 ARCHIVO DE LOS PUNTOS DE CARGA

Este archivo describe los datos de los puntos de carga, se compone de dos partes. Para la figura D.1 el archivo es el mostrado en la figura D.3, suponiendo que los puntos de carga están en los transformadores, exceptuando el 5.

La primera parte es una matriz de cinco columnas que describe: el número de componente en que se encuentra el punto de carga, el alimentador al que pertenece, el

número de usuarios en la fase A, el número de usuarios en la fase B y el número de usuarios en la fase C.

La segunda parte es una matriz de tres columnas que describe: la demanda media en kW en la fase A, B y C.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
6	1	3	2	1
7	1	2	2	2
8	1	1	2	3
16	2	30	20	10
17	3	13	11	7
22	2	4	8	9
23	3	15	12	11
28	2	9	14	21
29	3	22	14	22
PRIMERA PARTE				
33.4	28.6	21.2		
15.3	22.2	24.2		
40.2	20.5	11.1		
13.5	9.8	21.9		
9.9	12.2	18.4		
15.7	12.4	11.2		
9.1	8.2	7.4		
14.5	12.3	33.2		
9.8	12.1	23.2		
SEGUNDA PARTE				

Figura D.3. Segundo archivo de datos.

D.2.3 ARCHIVO DE OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

En este archivo describe algunos de los datos necesarios para la selección óptima de los dispositivos de desconexión, se compone de dos partes. Para la red de la figura D.1 este archivo se muestra en la figura D.4, considerando el lugar donde están los fusibles, restauradores y cuchillas como una posible ubicación de un dispositivo de desconexión.

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
2				
3				
10				
11				
18				
19				
24				
25				
30				
PRIMERA PARTE				
0.9	2.42	2.86		
0.9	2.42	2.86		
0.9	2.42	2.86		
SEGUNDA PARTE				

Figura D.4. Tercer archivo de datos

La primera parte se colocan las posibles ubicaciones para colocar un dispositivo de desconexión.

La segunda parte representa las restricciones en los alimentadores y se introduce mediante una matriz de tres columnas que describe: restricción del SAIFI en el alimentador i , restricción del SAIDI en el alimentador i y restricción del MAIFI en el alimentador i . Siendo “ i ” la fila de la matriz.

Los datos para la ejecución del algoritmo genético, los costos de los dispositivos y los costos por energía y potencia no servida se introducen mediante el teclado al principio de la ejecución del programa.

D.3 ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

El programa fue desarrollado en lenguaje de programación Fortran y está compuesto por un programa principal, veintiuna subrutinas y cuatro módulos, como se muestra en la figura D.5.

El programa principal fue llamado “DIS_ALIMENT” y puede ser descrito por cinco partes. La primera parte consta de los cuatro módulos que sirven para declarar las variables que se utilizan a lo largo de todas las subrutinas. La segunda parte consta de dos subrutinas que sirven para leer los tres archivos de datos descritos en la sección D.2, también se utilizan para leer mediante el teclado datos para la ejecución del algoritmo genético y de los costos. La tercera parte consta de diez subrutinas, las cuales se utilizan para realizar la evaluación de la confiabilidad de cada una de las combinaciones de dispositivos que tienen que ser analizados; en estas subrutinas se realiza la simulación secuencial de Monte Carlo y la Simulación Analítica, algoritmos que fueron descritos en el capítulo 2. La cuarta parte consta de siete subrutinas las cuales realizan la parte del algoritmo genético. Finalmente la quinta parte está compuesta por una subrutina, la cual realiza el algoritmo de búsqueda local.

Se debe de tener en cuenta que el llamado de cada subrutina no se hace como se muestra en la figura D.5. Por ejemplo, dentro del programa principal se realiza el llamado de las dos subrutinas de la segunda parte, así como las dos primeras subrutinas de la cuarta parte. El llamado de las otras subrutinas se hace entre ellas, cuando es necesario.

Cuando sólo se utiliza el programa para realizar la evaluación de confiabilidad de redes de distribución se utilizan los primeros dos módulos de la primera parte, la primera subrutina de la segunda parte, todas las subrutinas de la tercera parte y se utiliza dos subrutinas adicionales, una para obtener las densidades de probabilidad de los índices de confiabilidad y otra para generar un archivo de resultados.

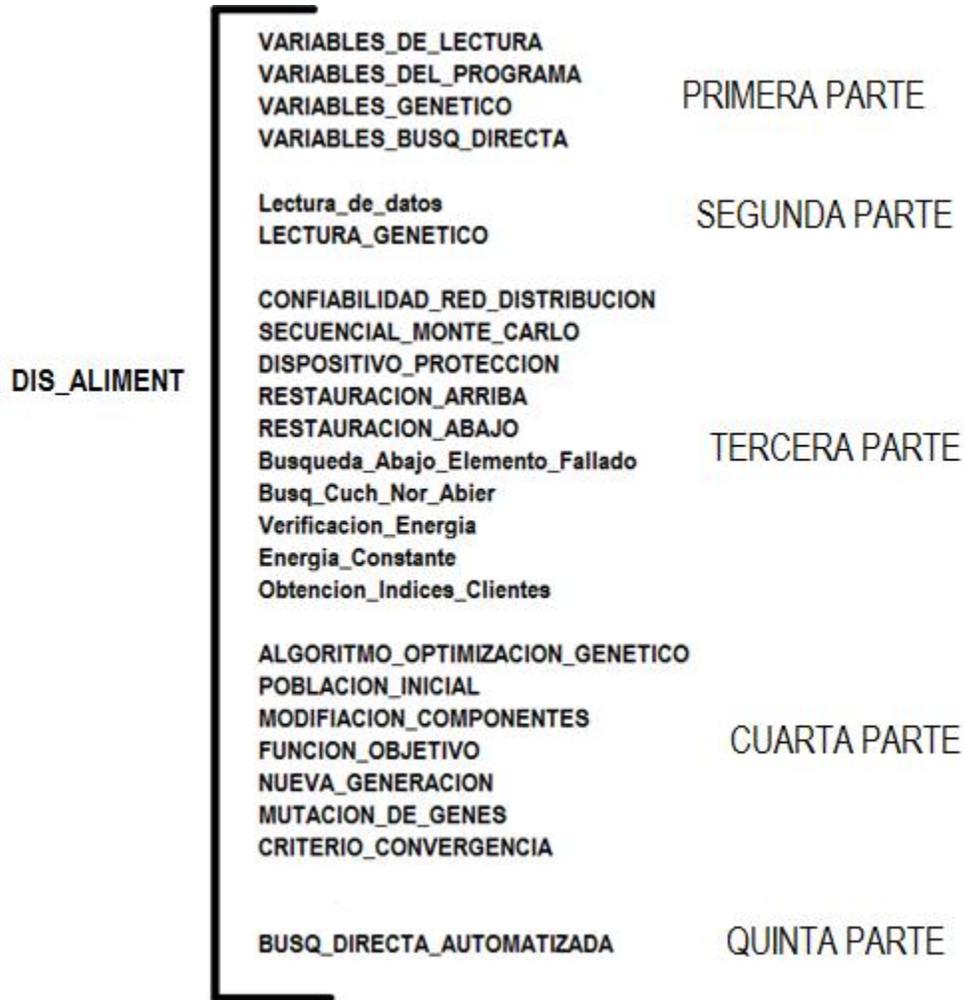


Figura D.5. Estructura del programa principal.

D.3.1 CODIGO FUENTE

En esta parte se presenta las subrutinas que conforman el programa principal, estas serán presentadas conforme a la figura D.5. El símbolo “&&” significa continuación de la línea anterior.

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
PROGRAM DIS_ALIMENT

CALL LECTURA_GENETICO
CALL Lectura_de_datos
CALL POBLACION_INICIAL
CALL ALGORITMO_OPTIMIZACION_GENETICO

END PROGRAM DIS_ALIMENT
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
MODULE VARIABLES_DE_LECTURA

REAL*8,ALLOCATABLE :: DatConf(:,:),
&&NIVELEM(:,:), TN(:,:), CuchiNorAbie(:,:),
&&INDCONF(:,:), CurPotAct(:,:), CarCon(:,:)
REAL*8,ALLOCATABLE :: DatConfResp(:,:),
&&CuchiNorAbieRes(:,:)
integer nde, ndn,nmax, numa,ndcna, npc, npct,
&&modcar,nda

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

Integer,ALLOCATABLE ::
&&PdC(:),Alim(:),NumClien(:)

Integer,ALLOCATABLE :: sol_prim(:), sol_pos(:),
&&sol_prim_aut(:), sol_pos_aut(:)

END MODULE VARIABLES_DE_LECTURA
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
MODULE VARIABLES_DEL_PROGRAMA

REAL*8   ::t, U, tr, menor, tcnc1, tiemfalla,
&&tiemrep , tiemrestarri, tiemrestabj
REAL*8,ALLOCATABLE ::tf(:)
integer elemento, tipelem, elementofallado,
&&cond, aaa, num_comp_rest
integer npca, npcra, npcra, tipo_ENS
integer,ALLOCATABLE :: PdCA(:),PdCRA(:),
&&PdCRAb(:), ContFallas(:), COM_YA_REST(:)
real*8,ALLOCATABLE:: EnergiaA(:), EnergiaB(:),
&&EnergiaC(:),ProbFalla(:,:), SAIFI(:),SAIDI(:),
&&CAIDI(:),ENS13(:), MAIFI(:)

USE VARIABLES_DE_LECTURA

integer i, j

OPEN(unit=2, file='PRIMER_ARCHIVO.dat',
&&status='old')
OPEN(unit=3, file='SEGUNDO_ARCHIVO.dat',
&&status='old')

  read(2,*) numa
  read(2,*) nde
  read(2,*) ndn
  read(2,*) nmax
  read(2,*) ndcna
  read(2,*) npc
  read(2,*) nda
  npct=npca*3

  ALLOCATE(DatConf(nde,5),DatConfResp(nde,5),NI
&&VELEM(ndn,nmax))
  ALLOCATE(TN(ndn,nmax),CuchiNorAbie(ndcna,4),
&&CuchiNorAbieRes(ndcna,4))
  ALLOCATE(INDCONF(nde,4))
  ALLOCATE(CurPotAct(96,npct),CarCon(npc,3))
  ALLOCATE(PdC(npc),Alim(npc),NumClien(npc))

do i=1,nde
  read(2,*) DatConf(i,:5)
  do j=1, 5
    DatConfResp(i,j)=DatConf(i,j)
  end do
end do
do i=1,ndn
  read(2,*) NIVELEM(i,:nmax)
end do
do i=1,ndn
  read(2,*) TN(i,:nmax)
end do
do i=1, ndcna
  read(2,*) CuchiNorAbie(i,:4)
  do j=1, 4
    CuchiNorAbieRes(i,j)=CuchiNorAbie(i,j)
  end do
end do

END MODULE VARIABLES_DEL_PROGRAMA
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
MODULE VARIABLES_GENETICO

REAL*8,ALLOCATABLE :: vec_opt(:), vec_cost(:),
&&SAIFIfinal(:), SAIDIfinal(:), MAIFIfinal(:),
&&CAIDIfinal(:),vec_cost_auto(:)
integer num_pobl, num_crom, num_elit,
&&num_tot_bins, generacion_act, cum_conv,
&&contadir, contadir2
real*8 :: optmax, optmin, tasa_mutu, SAIFirest,
&&SAIDirest, CAIDirest, OPTfinal, SAIFIN, SAIDIN,
&&CAIDIN, MAIFirest,MAIFIN
Integer,ALLOCATABLE :: mat_pobl(:,:),
&&mat_pobl_dos(:,:), vec_crom(:), rest_bit(:),
&&vec_comp(:), vec_bins(:)
Integer,ALLOCATABLE :: mat_sol_gen(:,:),
&&pobl_emergente(:), pobl_emer_aut(:)
Integer,ALLOCATABLE :: mat_p_aut(:,:),
&&mat_p_dos_aut(:,:), vec_crom_aut(:),
&&mat_sol_gen_aut(:,:)
real*8 :: tiem_aut, costo_ens
integer caso_realizar

END MODULE VARIABLES_GENETICO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
MODULE VARIABLES_BUSQ_DIRECTA

real opt_sol, opt_pos

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

    print*, 'Modelo de los puntos de Carga'
    print*, '.....'
    print*, '1. Constante'
    print*, '2. Curva de demanda'
    read*, modcar

do i=1, npc
    read(3,*) PdC(i) , Alim(i), NumClien(i)
end do
if(modcar==1) then
    do i=1, npc
        read(3,*) CarCon(i, :3)
    end do
else if(modcar==2) then
    do i=1, 96
        read(3,*) CurPotAct(i, :npct)
    end do
end if
do i=1, nde
    do j=1, 4
        INDCONF(i,j)=0
    end do
end do

END SUBROUTINE Lectura_de_datos
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE LECTURA_GENETICO

    USE VARIABLES_GENETICO
    USE VARIABLES_HILL

    integer i

    print*, '¿Numero de genes en un cromosoma?'
    read(*,*) num_crom
    print*, '¿Numero de cromosomas en la
    &&Poblacion?'
    read(*,*) num_pobl
    print*, '¿Numero de cromosomas ELITE?'
    read(*,*) num_elit
    print*, '¿Tasa de mutuacion?'
    read(*,*) tasa_mutu
    print*, ' '
    print*, '¿Que caso desea realizar?'
    print*, ' '
    print*, '1..... Dispositivos no automatizados'
    print*, '2..... Dispositivos automatizados'
    read(*,*) caso_realizar

    print*, '¿Costo por kWh no suministrado?'

    read(*,*) costo_ens
    print*, '¿Costo por kW no suministrado?'
    read(*,*) costo_pot
    print*, '¿Costo de cuchilla no automatizada?'
    read(*,*) costo_cna
    print*, '¿Costo de cuchilla automatizada?'
    read(*,*) costo_ca
    print*, '¿Costo de cuchilla restaurador?'
    read(*,*) costo_rest
    if(caso_realizar==2) then
        print*, '¿Tiempo de las cuchillas
    &&automatizadas?'
        read(*,*) tiem_aut
    end if

    ALLOCATE(mat_pobl(num_pobl,num_crom),mat_
    &&pobl_dos(num_pobl,num_crom),vec_crom(un
    &&m_crom))
    ALLOCATE(rest_bit(num_pobl),vec_opt(num_pob
    &&l),vec_bins(num_pobl),vec_comp(num_crom),
    &&vec_cost(num_crom),vec_cost_auto(num_cro
    &&m))
    ALLOCATE(mat_sol_gen(10,num_crom),mat_sol_
    &&gen_aut(10,num_crom))
    ALLOCATE(sol_prim(num_crom),sol_pos(num_cr
    &&om),sol_prim_aut(num_crom),sol_pos_aut(nu
    &&m_crom))
    ALLOCATE(SAIFifinal(num_pobl),
    &&SAIDifinal(num_pobl), CAIDifinal(num_pobl),
    &&pobl_emergente(num_crom),pobl_emer_aut(
    &&num_crom))
    ALLOCATE(mat_p_aut(num_pobl,num_crom),mat
    &&p_dos_aut(num_pobl,num_crom),
    &&vec_crom_aut(num_crom),MAIFifinal(num_p
    &&obl))

    OPEN(unit=1, file='TERCER_ARCHIVO.dat',
    &&status='old')

    do i=1, num_crom
        read(1,*) vec_comp(i), vec_cost(i),
    &&vec_cost_auto(i)
    end do

    read (1,*) SAIFlrest, SAIDlrest, MAIFlrest

END SUBROUTINE LECTURA_GENETICO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
PROGRAM DIS_ALIMENT

    CALL LECTURA_GENETICO

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

CALL Lectura_de_datos
CALL POBLACION_INICIAL
CALL ALGORITMO_OPTIMIZACION_GENETICO

END PROGRAM DIS_ALIMENT
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE
&&CONFIABILIDAD_RED_DISTRIBUCION

    CALL SECUENCIAL_MONTE_CARLO
    CALL Obtencion_Indices_Clientes

END SUBROUTINE
&&CONFIABILIDAD_RED_DISTRIBUCION
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE SECUENCIAL_MONTE_CARLO

USE VARIABLES_DE_LECTURA
USE VARIABLES_DEL_PROGRAMA

INTEGER j, i

aaa=aaa+1
if(aaa==1) then
    ALLOCATE(tf(nde))
    ALLOCATE(ContFallas(nde),PdCA(npc),PdCRA(npc
    &&), PdCRAb(npc))
    ALLOCATE(ProbFalla(nde,6),EnergiaA(npc),Energia
    &&aB(npc),EnergiaC(npc),COM_YA_REST(nde))
    ALLOCATE(SAIFI(nda),SAIDI(nda),CAIDI(nda),ENS1
    &&3(nda),MAIFI(nda))
end if

EnergiaA=0.0
EnergiaB=0.0
EnergiaC=0.0
ProbFalla=0.0
SAIFI=0.0
SAIDI=0.0
CAIDI=0.0
MAIFI=0.0
INDCONF=0.0

do j=1, numa
    do i=1, nde
        tf(i)=0
        ContFallas(i)=0
    end do
    t=0

do i=1, nde
    if (DatConf(i,2)/=0) then
        U=rand(0)
        tf(i)=((-log (U))/DatConf(i,2))*8760
    end if
end do

    11 elemento=1
npca=0
npcr=0
npcra=0
tiemrep=0
tiemfalla=0
tiemrestarri=0
tiemrestabj=0

PdCA=0
PdCRA=0
PdCRAb=0

menor=tf(1)
tipelem=DatConf(1,4)

do i=2, nde
    if(menor>tf(i) .AND. tf(i)/=0) then
        elemento=i
        menor=tf(i)
        tipelem=DatConf(i,4)
    end if
end do

t=tf(elemento)
if(t<8760) then
    tiemfalla=tf(elemento)
    U=rand(0)
    tr=(-log (U))*DatConf(elemento,3)
    tiemrep=tr
    tf(elemento)=tf(elemento)+tr
    U=rand(0)
    tf(elemento)=tf(elemento)+((-log
    &&(U))/DatConf(elemento,2))*8760
    COM_YA_REST=0
    num_comp_rest=0
    elementofallado=elemento
    CALL DISPOSITIVO_PROTECCION
    if((DatConf(elementofallado,4)==1 .OR.
    &&DatConf(elementofallado,4)==2) .AND.
    &&cond==0) then
        CALL RESTAURACION_ARRIBA
    end if
    if (cond==0 .AND. ndcna/=0) then
        if (DatConf(elementofallado,4)==3 &&.OR.
        DatConf(elementofallado,4)==4 .OR.

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

&&DatConf(elementofallado,4)==5 .OR.
&&DatConf(elementofallado,4)==6 .OR.
&&DatConf(elementofallado,4)==8) then
    tcnc1=0
    CALL Busq_Cuch_Nor_Abier
&&(elementofallado, elementofallado, tcnc1)
    else
        CALL RESTAURACION_ABAJO
    end if
end if
tipo_ENS=3
if (modcar==1) then
    CALL Energia_Constante
else if (modcar==2) then
    CALL Energia_No_Suministrada
end if
goto 11
else
end if
end do

end SUBROUTINE SECUENCIAL_MONTE_CARLO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE DISPOSITIVO_PROTECCION

USE VARIABLES_DE_LECTURA
USE VARIABLES_DEL_PROGRAMA

integer i, nivel, posicion, j, cont, cont2(1000),
&&R(1000,1000), RES(1000), auxil, k, aux(1000),
&&rest, elemento1, posicion1

cond=0
rest=0
elemento1=elemento

if (tipelem==1 .OR. tipelem==2) then
do i=1,ndn
do j=1, nmax
if(NIVELEM(i,j)==elemento) then
    nivel=i
    posicion=j
    exit
end if
end do
end do

posicion1=posicion

do i=1, nivel-1
cont=TN(nivel+1-i,posicion)

if (cont/=0 .AND. DatConf(elemento,4)==6)
&&then
    cond=1
    rest=elemento
    exit
else if(cont/=0) then
    elemento=NIVELEM(nivel-i,cont)
    posicion=cont
end if
end do

12 if(cond==0) then
elemento=elemento1
posicion=posicion1
do i=1, nivel-1
    cont=TN(nivel+1-i,posicion)
if (cont/=0 .AND. (DatConf(elemento,4)==3
&&.OR. DatConf(elemento,4)==4 .OR.
&&DatConf(elemento,4)==6)) then
    exit
else if(cont/=0) then
    elemento=NIVELEM(nivel-i,cont)
    posicion=cont
end if
end do
else if(cond==1) then
u=rand(0)
if (u>=0 .AND. u<=0.6) then
    cond=2
end if
if (cond/=2) then
    cond=0
    goto 12
end if
end if
end if

do i=1,ndn
do j=1, nmax
R(i,j)=0
if(NIVELEM(i,j)==elemento) then
    nivel=i
    posicion=j
end if
end do
end do
cont2(1)=posicion
R(1,1)=elemento
do i=2, nmax
    cont2(i)=0
    aux(i)=0
end do
do i=nivel+1, ndn

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

do j=1, nmax
  aux(j)=0
end do
do j=1, nmax
  if (TN(i,j)/=0) then
    do k=1, nmax
      if (TN(i,j)==cont2(k)) then
        aux(j)=j
        R(i-nivel+1,j)=NIVELEM(i,j)
      end if
    end do
  end if
end do
do j=1, nmax
  cont2(j)=aux(j)
end do
end do
auxil=0
do i=1, ndn
  do j=1, nmax
    if (R(i,j)/=0) then
      auxil=auxil+1
      RES(auxil)= R(i,j)
      if(cond==0) then
        if(DatConf(R(i,j),4)==2) then
          npca=npca+1
          PdCA(npca)=R(i,j)
        end if
        INDCONF(R(i,j),1)=INDCONF(R(i,j),1)+1
        INDCONF(R(i,j),2)=INDCONF(R(i,j),2)+tr
        ContFallas(R(i,j))=ContFallas(R(i,j))+1
      else if(cond==2) then
        INDCONF(R(i,j),4)=INDCONF(R(i,j),4)+1
      end if
    end if
  end do
end do
end do

END SUBROUTINE DISPOSITIVO_PROTECCION
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE RESTAURACION_ARRIBA

USE VARIABLES_DE_LECTURA
USE VARIABLES_DEL_PROGRAMA

integer elemento2, i, nivel, posicion, j, cont,
&&cont2(1000), R(1000,1000), k, aux(1000)
integer nivelfallado, posicionfallado, cuchilla,
&&nivelcuchilla, posicioncuchilla, aux_cuchilla
real(kind=8):: tc

elemento2=elemento
aux_cuchilla=8

40 do i=1,ndn
  do j=1, nmax
    if(NIVELEM(i,j)==elemento) then
      nivel=i
      posicion=j
    else if(NIVELEM(i,j)==elementofallado) then
      nivelfallado=i
      posicionfallado=j
    end if
  end do
end do

if (elementofallado==elemento) then
  cuchilla=elemento
else
  cuchilla=elementofallado
  do i=1, nivelfallado-nivel
    cont=TN(nivelfallado+1-i,posicionfallado)
    if (cont/=0 .AND. DatConf(cuchilla,4) ==
&&aux_cuchilla) then
      u=rand(0)
      tc=(-log (u))/(1/DatConf(cuchilla,5))
    if(tc<tr) then
      exit
    else
      cuchilla=NIVELEM(nivelfallado-i, &&cont)
      posicionfallado=cont
    end if
  else if(cont/=0) then
    cuchilla=NIVELEM(nivelfallado-i,cont)
    posicionfallado=cont
  end if
end do
end if

if(cuchilla==elemento .OR. cuchilla==1) then
  if(aux_cuchilla==8) then
    aux_cuchilla=5
    goto 40
  end if
else
  if(tc<tr) then
    do i=1,ndn
      do j=1, nmax
        R(i,j)=0
        if(NIVELEM(i,j)==cuchilla) then

          nivelcuchilla=i
          posicioncuchilla=j
        end if
      end do
    end do
  end if
end if

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

        end if
    end do
end do
cont2(1)=posicion
R(1,1)=elemento
elemento=cuchilla
do i=2, nmax
    cont2(i)=0
    aux(i)=0
end do
do i=nivel+1, ndn
    do j=1, nmax
        aux(j)=0
    end do
    do j=1, nmax
        if (TN(i,j)/=0) then
            if (nivelcuchilla==i .AND.
&&posicioncuchilla==j) then
                aux(j)=0
            else
                do k=1, nmax
                    if (TN(i,j)==cont2(k))
&&then
                        aux(j)=j
                        R(i-nivel+1,j) =
&&NIVELEM(i,j)
                    end if
                end do
            end if
        end if
    end do

    do j=1, nmax
        cont2(j)=aux(j)
    end do
    tmomen=0.016666
    tiemrestarri=tc
    tipo_ENS=1
    npcr=0
    PdCRA=0
    do i=1, ndn
        do j=1, nmax
            if (R(i,j)/=0 .AND.
&&DatConf(R(i,j),4)=2) then
                npcr=npcr+1
                PdCRA(npcr)=R(i,j)
            end if
            if (R(i,j)/=0 .AND.
&&tc>tmomen) then
                INDCONF(R(i,j),2) =
&&INDCONF(R(i,j),2)+tc-tr
        else if (R(i,j)/=0 .AND.
&&tc<=tmomen) then
            INDCONF(R(i,j),1) =
&&INDCONF(R(i,j),1)-1
            INDCONF(R(i,j),2) =
&&INDCONF(R(i,j),2)+tc-tr
            INDCONF(R(i,j),4) =
&&INDCONF(R(i,j),4)+1
        end if
    end do
end do

    CALL Energia_Constante
else
    end if
    if(aux_cuchilla==8)then
        elemento=cuchilla
        aux_cuchilla=5
        goto 40
    end if
end if

END SUBROUTINE RESTAURACION_ARRIBA
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE RESTAURACION_ABAJO

USE VARIABLES_DE_LECTURA
USE VARIABLES_DEL_PROGRAMA

integer i,j,k, condi, cont2(1000), aux(1000), nivel,
posicion, m, cuchilla
real(kind=8):: tcnc, cuchillaNC(1000),
TNA(1000,1000), aux_cuchilla

cuchillaNC=0.0
do i=1,ndn
    do j=1, nmax
        TNA(i,j)=TN(i,j)
        if(NIVELEM(i,j)==elemento) then
            nivel=i
            posicion=j
        end if
    end do
end do

aux_cuchilla=8
m=0

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

13 m=m+1
condi=0
do i=1, m-1
  do j=1, ndn
    do k=1, nmax
      if(NIVELEM(j,k)==CuchillaNC(i)) then
        TNA(j,k)=0
      end if
    end do
  end do
end do

cont2(1)=posicion

do i=2, nmax
  cont2(i)=0
  aux(i)=0
end do
do i=nivel+1, ndn
  do j=1, nmax
    aux(j)=0
  end do

  do j=1, nmax
    if (TNA(i,j)/=0) then
      do k=1, nmax
        if (TNA(i,j)==cont2(k)) then
          aux(j)=j
          if (DatConf(NIVELEM(i,j),4)
&&==aux_cuchilla) then
            cuchilla=NIVELEM(i,j)
            CALL
&&Busqueda_Abajo_Elemento_Fallado(cuchilla,
&&condi)
              if(condi==2) then
                CuchillaNC(m)=NIVELEM(i,j)
                exit
              end if
            end if
          end do
        end do
      end if

      if (condi==2) then
        cuchilla=CuchillaNC(m)
        u=rand(0)
        if(DatConf(cuchilla,5)/=0) then
          tcnc = (-log
&&(u))/(1/DatConf(cuchilla,5))
        else
          tcnc=0
        end if
        if (tcnc<tr) then
          CALL Busq_Cuch_Nor_Abier(cuchilla,
&&elemento, tcnc)
          exit
        else
          condi=0
        end if
      end do
      if (condi==2) then
        exit
      end if
      do j=1, nmax
        cont2(j)=aux(j)
      end do
    end do
    if (condi==2) then
      goto 13
    end if
    if(aux_cuchilla==8)then
      aux_cuchilla=5
      goto 13
    end if

END SUBROUTINE RESTAURACION_ABAJO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE
&&Busqueda_Abajo_Elemento_Fallado(cuchilla,
&&condi)

USE VARIABLES_DE_LECTURA
USE VARIABLES_DEL_PROGRAMA

integer cuchilla, i, nivel, posicion, cont(1000), j, k,
aux(1000), condi

do i=1, ndn
  do j=1, nmax
    if(NIVELEM(i,j)==cuchilla) then
      nivel=i
      posicion=j
    end if
  end do
end do

condi=0
cont(1)=posicion

do i=2, nmax
  cont(i)=0
  aux(i)=0
end do

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

do i=nivel+1, ndn
  do j=1, nmax
    aux(j)=0
  end do
  do j=1, nmax
    if (TN(i,j)/=0) then
      do k=1, nmax
        if (TN(i,j)==cont(k)) then
          aux(j)=j
          if(NIVELEM(i,j)==elementofallado)
&&then
            condi=1
          end if
        end if
      end do
    end if
  end do
  do j=1, nmax
    cont(j)=aux(j)
  end do
end do

if(condi==0) then
  condi=2
end if

END SUBROUTINE
&&Busqueda_Abajo_Elemento_Fallado
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE Busq_Cuch_Nor_Abier(cuchilla1,
&&elementofallado1,tcnc)

USE VARIABLES_DE_LECTURA
USE VARIABLES_DEL_PROGRAMA

integer i,j,k, cont2(1000), aux(1000),
&&elementofallado1, elementoconect,
&&nivelcuchNA, posicioncuchNA, cuchilla1, n,
&&cuchilla2
real(kind=8):: tcnc, tcna, tds, TNA(1000,1000)

do i=1, ndn
  do j=1, nmax
    TNA(i,j)=TN(i,j)
    if(NIVELEM(i,j)==cuchilla1) then
      nivelcuchNA=i
      posicioncuchNA=j
    end if
  end do
end do

cond=0
tds=tcnc

cont2(1)=posicioncuchNA
do i=2, nmax
  cont2(i)=0
  aux(i)=0
end do
do i=nivelcuchNA+1, ndn
  do j=1, nmax
    aux(j)=0
  end do
  do j=1, nmax
    if (TNA(i,j)/=0) then
      do k=1, nmax
        if (TNA(i,j)==cont2(k)) then
          aux(j)=j
          do n=1, ndcna
            if(NIVELEM(i,j)==CuchiNorAbie(n,2)
&&.OR. NIVELEM(i,j)==CuchiNorAbie(n,3)) then
              cuchilla2=n
              if (CuchiNorAbie(cuchilla2,2)
&&==NIVELEM(i,j))then
                elementoconect =
&&CuchiNorAbie(cuchilla2,3)
              else
                elementoconect =
&&CuchiNorAbie(cuchilla2,2)
              end if
              u=rand(0)
              if(CuchiNorAbie(cuchilla2,4)/=0)
&&then
                tcna=(-log
&&(u))/(1/CuchiNorAbie(cuchilla2,4))
              else
                end if
              if(tcnc>tcna) then
                tds=tcnc
              else
                tds=tcna
              end if
              if (tds<tr) then
                call Verificacion_Energia
&&(cuchilla1, elementoconect, elementofallado1,
&&tds)
              if (cond==1) then
                cond=0
                tds=tds-tcna
              else
                cond=2
                exit
              end if
            else

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

                tds=tds-tcna
            end if
        end if
    end do
    if(cond==2) then
        exit
    end if
end if
end do
if(cond==2) then
    exit
end if
end do
if (cond==2) then
    exit
end if
do j=1, nmax
    cont2(j)=aux(j)
end do
end do

END SUBROUTINE Busq_Cuch_Nor_Abier
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE Verificacion_Energia(cuchilla1,
&&elementoconect, elementofallado1, tds)

USE VARIABLES_DE_LECTURA
USE VARIABLES_DEL_PROGRAMA

integer i,j,k, condi, R(1000,1000), cont,
&&cont2(1000), aux(1000), elementofallado1,
&&nivel, posicion, cuchilla1, elementoconect
real(kind=8):: tds, tmomen

do i=1, ndn
    do j=1, nmax
        R(i,j)=0
        if(NIVELEM(i,j)==elementoconect) then
            nivel=i
            posicion=j
        end if
    end do
end do

condi=0

do i=1, nivel-1
    cont=TN(nivel+1-i,posicion)
    if (cont/=0) then
        if (elementofallado1 == NIVELEM(nivel-
&&i,cont))then
            condi=1
            cond=1
            end if
            posicion=cont
        end if
    end do

    if(condi==0) then
        do i=1, ndn
            do j=1, nmax
                if(NIVELEM(i,j)==cuchilla1) then
                    nivel=i
                    posicion=j
                end if
            end do
            cont2(1)=posicion
            R(1,1)=cuchilla1
            do i=2, nmax
                cont2(i)=0
                aux(i)=0
            end do
            do i=nivel+1, ndn
                do j=1, nmax
                    aux(j)=0
                end do
                do j=1, nmax
                    if (TN(i,j)/=0) then
                        do k=1, nmax
                            if (TN(i,j)==cont2(k)) then
                                aux(j)=j
                                R(i-nivel+1,j)=NIVELEM(i,j)
                            end if
                        end do
                    end if
                end do
            end do
            do j=1, nmax
                cont2(j)=aux(j)
            end do
        end do

        tmomen=0.016666
        tiemrestabj=tds
        tipo_ENS=2
        npcra=0
        PdCRAb=0

        do i=1, ndn
            do j=1, nmax
                if(R(i,j)/=0)then
                    do k=1, num_comp_rest

```


ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

END SUBROUTINE Energia_Constante
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE Obtencion_Indices_Clientes

USE VARIABLES_DE_LECTURA
USE VARIABLES_DEL_PROGRAMA

integer i, j
Integer,ALLOCATABLE ::TotClien(:)
REAL*8,ALLOCATABLE ::DurInt(:), TotInt(:),
&&TotIntMom(:)

if(aaa==1)then
  ALLOCATE(TotClien(nda), DurInt(nda),
&&TotInt(nda), TotIntMom(nda))
end if

TotClien = 0
DurInt = 0.0
TotInt = 0.0
TotIntMom = 0.0
SAIFI = 0.0
SAIDI = 0.0
CAIDI = 0.0
MAIFI = 0.0
ENS13 = 0.0

do i=1, nde
  INDCONF(i,3)=INDCONF(i,2)
  if (INDCONF(i,1) /= 0) then
    INDCONF(i,2)=INDCONF(i,2)/INDCONF(i,1)
  end if
  INDCONF(i,1)=(INDCONF(i,1))/((8760*numa-
&&INDCONF(i,3))/8760)
  INDCONF(i,3)=INDCONF(i,3)/numa
end do

do i=1, npc
  EnergiaA(i)=EnergiaA(i)/numa
  EnergiaB(i)=EnergiaB(i)/numa
  EnergiaC(i)=EnergiaC(i)/numa
end do

do i=1, nda
  do j=1, npc
    if(Alim(j) == i) then
      TotClien(i) = TotClien(i) + NumClien(j)
      DurInt(i) = DurInt(i) + NumClien(j) *
&&INDCONF(PdC(j),1)*INDCONF(PdC(j),2)
      TotInt(i) = TotInt(i) + NumClien(j) *
&&INDCONF(PdC(j),1)
      TotIntMom(i) = TotIntMom(i) + NumClien(j)
&&*(INDCONF(PdC(j),4)/numa)
      ENS13(i) = ENS13(i) + EnergiaA(j)
    end if
  end do

  SAIFI(i) = TotInt(i)/TotClien(i)
  MAIFI(i) = TotIntMom(i)/TotClien(i)
  SAIDI(i) = DurInt(i)/TotClien(i)
  CAIDI(i) = DurInt(i)/TotInt(i)
end do

END SUBROUTINE Obtencion_Indices_Clientes
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE
ALGORITMO_OPTIMIZACION_GENETICO

USE VARIABLES_GENETICO
USE VARIABLES_DEL_PROGRAMA
USE VARIABLES_DE_LECTURA

integer gene, j, i, generacion

open(unit=4, file='DISEÑO_GENETICO_4.res',
&&status='replace')

generacion=0
aaa=0
generacion_act=1
contadir2=0
pobl_emergente=1
pobl_emer_aut=1

87 do gene=1, num_pobl
  if(gene==1)then
    contadir=0
  end if
  do j=1, num_crom
    vec_crom(j)=mat_pobl(gene,j)
  end do
  if(caso_realizar==2)then
    do j=1, num_crom
      vec_crom_aut(j)=mat_p_aut(gene,j)
    end do
  end if
  do i=1, num_crom
    read(7,*) vec_crom(i), vec_crom_aut(i)
  end do

  CALL MODIFICACION_COMPONENTES
  CALL CONFIABILIDAD_RED_DISTRIBUCION

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

CALL FUNCION_OBJETIVO(gene)
end do

generacion=generacion+1
print*, generacion

if(contadir==0 .OR. contadir==1)then
  contadir2=contadir+1
  if(contadir2==5)then
    do i=1, num_crom
      mat_pobl_dos(1,i)=pobl_emergente(i)
      OPTfinal=999999999
    end do
    goto 86
  end if
  generacion_act=generacion_act+1
  goto 87
end if

if(cum_conv==0) then
  CALL NUEVA_GENERACION
  if (generacion>=100) then
    goto 86
  end if
  CALL MUTUACION_DE_GENES
  CALL CRITERIO_CONVERGENCIA
end if

if (cum_conv==0) then
  do i=1, num_pobl
    do j=1, num_crom
      mat_pobl(i,j)=mat_pobl_dos(i,j)
      mat_p_aut(i,j)=mat_p_dos_aut(i,j)
    end do
  end do
  generacion_act=generacion_act+1
  goto 87
end if

86 do i=1, num_crom
  if(caso_realizar==1)then
    WRITE(4,*) mat_pobl_dos(1,i), OPTfinal,
    generacion_act
  else
    WRITE(4,*) mat_pobl_dos(1,i),
    mat_p_dos_aut(1,i), OPTfinal
  end if
end do
WRITE(4,*)
WRITE(4,*) SAIFIN, SAIDIN, MAIFIN

if(caso_realizar==1)then
  CALL BUSQ_DIRECTA
else
  CALL BUSQ_DIRECTA_AUTOMATIZADO
end if

END SUBROUTINE
ALGORITMO_OPTIMIZACION_GENETICO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE POBLACION_INICIAL

USE VARIABLES_GENETICO

integer i, j
do i=1, num_pobl
  do j=1, num_crom
    U=rand(0)
    if((U>=0.0) .AND. (U<=0.5)) then
      mat_pobl(i,j)=0
    else
      mat_pobl(i,j)=1
    end if
  end do
end do

if(caso_realizar==2)then
  do i=1, num_pobl
    do j=1, num_crom
      U=rand(0)
      if((U>=0.0) .AND. (U<=0.5)) then
        mat_p_aut(i,j)=0
      else
        mat_p_aut(i,j)=1
      end if
    end do
  end do
end if

END SUBROUTINE POBLACION_INICIAL
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE MODIFICACION_COMPONENTES

USE VARIABLES_GENETICO
USE VARIABLES_DE_LECTURA

integer i, j

do i=1, nde
  do j=1, 5
    DatConf(i,j)=DatConfResp(i,j)
  end do
end do

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

do i=1, ndcna
  do j=1, 4
    CuchiNorAbie(i,j)=CuchiNorAbieRes(i,j)
  end do
end do

if(caso_realizar==1)then
  do i=1, num_crom-ndcna
    if(vec_crom(i)==0) then
      DatConf(vec_comp(i),2)=0
      DatConf(vec_comp(i),3)=0
      DatConf(vec_comp(i),4)=1
      DatConf(vec_comp(i),5)=0
    end if
  end do
  do i=num_crom-ndcna+1, num_crom
    if(vec_crom(i)==0) then
      CuchiNorAbie(i-num_crom+ndcna,2)=0
      CuchiNorAbie(i-num_crom+ndcna,3)=0
      CuchiNorAbie(i-num_crom+ndcna,4)=0
    end if
  end do
end if

if(caso_realizar==2)then
  do i=1, num_crom-ndcna
    if(vec_crom(i)==0) then
      DatConf(vec_comp(i),2)=0
      DatConf(vec_comp(i),3)=0
      DatConf(vec_comp(i),4)=1
      DatConf(vec_comp(i),5)=0
    else if(vec_crom(i)==1 .AND.
vec_crom_aut(i)==1)then
      if(DatConf(vec_comp(i),4)==3)then
        DatConf(vec_comp(i),4)=6
      else if(DatConf(vec_comp(i),4)==5)then
        DatConf(vec_comp(i),4)=8
        DatConf(vec_comp(i),5)=tiem_aut
      end if
    end if
  end do
  do i=num_crom-ndcna+1, num_crom
    if(vec_crom(i)==0) then
      CuchiNorAbie(i-num_crom+ndcna,2)=0
      CuchiNorAbie(i-num_crom+ndcna,3)=0
      CuchiNorAbie(i-num_crom+ndcna,4)=0
    else if(vec_crom(i)==1 .AND.
vec_crom_aut(i)==1)then
      CuchiNorAbie(i-
num_crom+ndcna,4)=tiem_aut
    end if
  end do
end if

END SUBROUTINE
MODIFICACION_COMPONENTES
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE FUNCION_OBJETIVO(gene)

USE VARIABLES_DEL_PROGRAMA
USE VARIABLES_GENETICO
USE VARIABLES_DE_LECTURA

integer gene, j, a, num_cum
real*8 prom_pobl, DIVI

a=0
do j=1, 1
  if(SAIDI(j)<SAIDIrest) then
    a=a+1
  end if
  if (SAIFI(j)<SAIFlrest) then
    a=a+1
  end if
  if(MAIFI(j)<MAIFlrest) then
    a=a+1
  end if
end do

SAIFIfinal(gene)=SAIFI(1)
SAIDIfinal(gene)=SAIDI(1)
MAIFIfinal(gene)=MAIFI(1)

if (a==0) then
  vec_bins(gene)=0
  vec_opt(gene)=0
else if(a==1) then
  vec_bins(gene)=1
  vec_opt(gene)=0
else if(a==2) then
  vec_bins(gene)=2
  vec_opt(gene)=0
end if

if(a==3) then
  num_cum=num_cum+1
  do j=1, num_crom
    pobl_emergente(j)=vec_crom(j)
    if(caso_realizar==2)then
      pobl_emer_aut(j)=vec_crom_aut(j)
    end if
  end do

  contadir=contadir+1

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

vec_opt(gene)=0

if(caso_realizar==1)then
  do j=1, num_crom
    if(vec_crom(j)==1) then
      vec_opt(gene)=vec_opt(gene)+vec_cost(j)
    end if
  end do
  vec_opt(gene)=vec_opt(gene)+ENS13(1)*
  &&costo_ens
end if
if(caso_realizar==2)then
  do j=1, num_crom
    if(vec_crom(j)==1 .AND.
vec_crom_aut(j)==0) then
      vec_opt(gene)=vec_opt(gene)+vec_cost(j)
    else if(vec_crom(j)==1 .AND.
&&vec_crom_aut(j)==1) then
      vec_opt(gene) = vec_opt(gene) +
&&vec_cost_auto(j)
    end if
  end do
  vec_opt(gene) = vec_opt(gene) + ENS13(1) *
&&costo_ens
end if
end if

if (gene==num_pobl) then
  if(contadir==0 .OR. contadir==1) then
    CALL POBLACION_INICIAL
    goto 27
  end if

  optmin=999999999
  optmax=0.0

  do j=1, num_pobl
    if(vec_opt(j)/=0 .AND. vec_opt(j)<optmin)
&&then
      optmin=vec_opt(j)
    end if
    if(vec_opt(j)/=0 .AND. vec_opt(j)>optmax)
&&then
      optmax=vec_opt(j)
    end if
  end do

  num_tot_bins=0
  prom_pobl=0

  do j=1, num_crom
    prom_pobl=prom_pobl+vec_opt(j)
  end do

  prom_pobl=prom_pobl/num_cum
  DIVI=optmin/prom_pobl
  num_cum=0
  if(DIVI>0.999 .AND. DIVI<1.001)THEN
    cum_conv=1
    goto 27
  end if
  if(optmax==optmin) then
    cum_conv=1
    goto 27
  end if
  do j=1, num_pobl
    if(vec_opt(j)/=0) then
      vec_bins(j)=40-30*abs((vec_opt(j)-
&&optmin)/(optmax-optmin))
      num_tot_bins=num_tot_bins+vec_bins(j)
    end if
  end do
end if

27 END SUBROUTINE FUNCION_OBJETIVO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE NUEVA_GENERACION

USE VARIABLES_GENETICO

integer i, j, pos, num_uno,num_dos,
&&cromosoma_uno, cromosoma_dos, cont,
&&punto_uno, punto_dos, aux
real*8 min, U, V

do i=1, num_elit
  min=999999999
  pos=0
  do j=1, num_pobl
    if(vec_opt(j)/=0 .AND. vec_opt(j)<min) then
      pos=j
      min=vec_opt(j)
    end if
  end do

  if (i==1) then
    OPTfinal=vec_opt(pos)
    SAIFIN=SAIFIfinal(pos)
    SAIDIN=SAIDIfinal(pos)
    CAIDIN=CAIDIfinal(pos)
    MAIFIN=MAIFIfinal(pos)
  end if
  vec_opt(pos)=0
  do j=1, num_crom
    mat_pobl_dos(i,j)=mat_pobl(pos,j)

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

    mat_p_dos_aut(i,j)=mat_p_aut(pos,j)
end do
end do

do i=num_elit+1, num_pobl, +2
    cont=-1
    U=rand(0)
    V=rand(0)
    num_uno=abs(U*num_tot_bins)
    num_dos=abs(V*num_tot_bins)
    do j=1, num_pobl
        if(cont<num_uno .AND.
&&num_uno<=(cont+vec_bins(j))) then
            cromosoma_uno=j
        end if
        if(cont<num_dos .AND.
&&num_dos<=(cont+vec_bins(j))) then
            cromosoma_dos=j
        end if
        cont=cont+vec_bins(j)
    end do
    if(cromosoma_uno==cromosoma_dos .AND.
&&cromosoma_uno/=num_pobl) then
        cromosoma_dos=cromosoma_dos+1
    else if(cromosoma_uno==cromosoma_dos
&&.AND. cromosoma_uno==num_pobl) then
        cromosoma_dos=cromosoma_dos-1
    end if

    13 U=rand(0)
    V=ran(0)
    punto_uno=abs(U*num_crom)
    punto_dos=abs(V*num_crom)
    if (punto_uno==punto_dos) then
        goto 13
    end if
    if (punto_uno>punto_dos) then
        aux=punto_dos
        punto_dos=punto_uno
        punto_uno=aux
    end if
    do j=1, punto_uno
        mat_pobl_dos(i,j)=
&&mat_pobl(cromosoma_uno,j)
    if(caso_realizar==2)then
        mat_p_dos_aut(i,j)=
&&mat_p_aut(cromosoma_uno,j)
    end if

    if((i+1)<=num_pobl) then
        mat_pobl_dos(i+1,j)=
&&mat_pobl(cromosoma_dos,j)
    end if
end do

```

```

if(caso_realizar==2)then
    mat_p_dos_aut(i+1,j)=
&&mat_p_aut(cromosoma_dos,j)
end if
end if
end do
do j=punto_uno+1, punto_dos
    if((i+1)<=num_pobl) then
        mat_pobl_dos(i+1,j)=
&&mat_pobl(cromosoma_uno,j)
        if(caso_realizar==2)then
            mat_p_dos_aut(i+1,j)=
&&mat_p_aut(cromosoma_uno,j)
        end if
    end if
    mat_pobl_dos(i,j)=
&&mat_pobl(cromosoma_dos,j)
    if(caso_realizar==2)then
        mat_p_dos_aut(i,j)=
&&mat_p_aut(cromosoma_dos,j)
    end if
end do

do j=punto_dos+1, num_crom
    mat_pobl_dos(i,j)=
&&mat_pobl(cromosoma_uno,j)
    if(caso_realizar==2)then
        mat_p_dos_aut(i,j)=
&&mat_p_aut(cromosoma_uno,j)
    end if
    if((i+1)<=num_pobl) then
        mat_pobl_dos(i+1,j)=
&&mat_pobl(cromosoma_dos,j)
    if(caso_realizar==2)then
        mat_p_dos_aut(i+1,j)=
&&mat_p_aut(cromosoma_dos,j)
    end if
    end if
end do

END SUBROUTINE NUEVA_GENERACION
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE MUTUACION_DE_GENES

USE VARIABLES_GENETICO

INTEGER i,j
REAL*8 U
do i=num_elit+1, num_pobl
    do j=1, num_crom

```


ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

END SUBROUTINE CRITERIO_CONVERGENCIA
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
SUBROUTINE BUSQ_DIRECTA_AUTOMATIZADA

USE VARIABLES_GENETICO
USE VARIABLES_DE_LECTURA
USE VARIABLES_DEL_PROGRAMA
USE VARIABLES_BUSQ_DIRECTA

integer i, j, n, a, num_cam, num_pos
real*8 SAIF, SAID, MAIF
open(unit=5, file='DISEÑO_HILL_4.res',
status='replace')

do i=1, num_crom
  sol_prim(i)=mat_pobl_dos(1,i)
  sol_prim_aut(i)=mat_p_dos_aut(1,i)
end do
opt_sol=OPTfinal
100 do i=1, num_crom
  sol_pos(i)=sol_prim(i)
  sol_pos_aut(i)=sol_prim_aut(i)
end do
num_cam=0
n=1
99 a=0
opt_pos=0
do i=1, num_crom
  sol_pos(i)=sol_prim(i)
  sol_pos_aut(i)=sol_prim_aut(i)
end do
if(n>num_crom)then
  if(num_cam==0)then
    goto 101
  else
    goto 100
  end if
end if
num_pos=0
98   if(num_pos==0)then
  if(sol_pos(n)==0)then
    sol_pos(n)=1
  else
    sol_pos(n)=0
  end if
else if(num_pos==1 .AND. sol_pos(n)==0)then
num_pos=num_pos+1
  goto 98
else if(num_pos==1)then
  if(sol_pos_aut(n)==0)then
sol_pos_aut(n)=1
  else
    sol_pos_aut(n)=0
  end if
else if(num_pos==2)then
  if(sol_pos(n)==0)then
    sol_pos(n)=1
  else
    sol_pos(n)=0
  end if
  if(sol_pos_aut(n)==0)then
sol_pos_aut(n)=1
  else
    sol_pos_aut(n)=0
  end if
end if

!MODIFICACION DE COMPONENTES
do i=1, nde
  do j=1, 5
    DatConf(i,j)=DatConfResp(i,j)
  end do
end do
do i=1, ndcna
  do j=1, 4
    CuchiNorAbie(i,j)=CuchiNorAbieRes(i,j)
  end do
end do
do i=1, num_crom-ndcna
  if(sol_pos(i)==0) then
    DatConf(vec_comp(i),2)=0
    DatConf(vec_comp(i),3)=0
    DatConf(vec_comp(i),4)=1
    DatConf(vec_comp(i),5)=0
  else if(sol_pos(i)==1 .AND.
sol_pos_aut(i)==1)then
    if(DatConf(vec_comp(i),4)==3)then
      DatConf(vec_comp(i),4)=6
    else if(DatConf(vec_comp(i),4)==5)then
      DatConf(vec_comp(i),4)=8
      DatConf(vec_comp(i),5)=tiem_aut
    end if
  end if
end do
do i=num_crom-ndcna+1, num_crom
  if(sol_pos(i)==0) then
    CuchiNorAbie(i-num_crom+ndcna,2)=0
    CuchiNorAbie(i-num_crom+ndcna,3)=0
    CuchiNorAbie(i-num_crom+ndcna,4)=0
  else if(sol_pos(i)==1 .AND.
&&sol_pos_aut(i)==1)then
    CuchiNorAbie(i-num_crom+ndcna,4)=
&&tiem_aut
  end if
end if

```

ANEXO D: DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DESARROLLADO

```

end do
!FINAL DE MODIFICACION DE COMPONENTES

CALL CONFIABILIDAD_RED_DISTRIBUCION

!!INICIA REVISION DE RESTRICCIONES
a=0
do j=1, 1
  if(SAIDI(j)<SAIDirest) then
    a=a+1
  end if
  if (SAIFI(j)<SAIFirest) then
    a=a+1
  end if
  if(MAIFI(j)<MAIFirest) then
    a=a+1
  end if
end do
if (a==2 .OR. a==1 .OR. a==0) then
  if(num_pos==2) then
    n=n+1
    goto 99
  else
    num_pos=num_pos+1
    goto 98
  end if
end if
! TERMINA REVISION DE RESTRICCIONES
! INICIA CALCULO DE FUNCION OBJETIVO
if(a==3)then
  opt_pos=0
  do j=1, num_crom
    if(sol_pos(j)==1 .AND. sol_pos_aut(j)==0) then
      opt_pos=opt_pos+vec_cost(j)
    else if(sol_pos(j)==1 .AND. sol_pos_aut(j)==1)
      &&then
        opt_pos=opt_pos+vec_cost_auto(j)
      end if
    end do
    opt_pos=opt_pos+ENS13(1)*costo_ens
  end if
! TERMINA CALCULO DE FUNCION OBJETIVO
if(opt_pos<opt_sol) then
  do i=1, num_crom
    sol_prim(i)=sol_pos(i)
    sol_prim_aut(i)=sol_pos_aut(i)
  end do
  opt_sol=opt_pos
  num_cam=num_cam+1
  n=n+1
  SAIF=SAIFI(1)
  SAID=SAIDI(1)
  MAIF=MAIFI(1)
  goto 100 !99
else
  if(num_pos==2)then
    n=n+1
    goto 99
  else
    num_pos=num_pos+1
    goto 98
  end if
end if
101 do i=1, num_crom
  WRITE(5,*) sol_prim(i), sol_prim_aut(i), opt_sol
end do
WRITE(5,*)
WRITE(5,*) SAIF, SAID, MAIF

END
SUBROUTINE&&BUSQ_DIRECTA_AUTOMATIZAD
O

END SUBROUTINE
&&BUSQ_DIRECTA_AUTOMATIZADO
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```