



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

---

---

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA  
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

**SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**ALGORITMO GENÉTICO PARA ANALIZAR  
LA CONFIABILIDAD DE REDES DE  
DISTRIBUCIÓN**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD  
EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**PRESENTA**

**RICARDO ARTURO TRUJILLO HERNÁNDEZ**

**MÉXICO, D.F.**

**MAYO 2007**





# INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

## SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

### ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 19 del mes de Febrero del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

**“ALGORITMO GENÉTICO PARA ANALIZAR LA CONFIABILIDAD DE REDES DE DISTRIBUCIÓN”**

Presentada por el alumno:

**TRUJILLO**

Apellido paterno

**HERNÁNDEZ**

materno

**RICARDO ARTURO**

nombre(s)

Con registro: 

A	0	0	0	3	0	3
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA DE ELÉCTRICA**

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

#### LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis

M. EN C. GILBERTO ENRÍQUEZ HARPER

Presidente

DR. DANIEL OAGUÍN SALINAS

Segundo Vocal

DR. JOSE ALBERTO GÓMEZ HERNÁNDEZ

Tercer Vocal

DR. DANIEL RUIZ VEGA

Secretario

DR. JAIME ROBLES GARCÍA

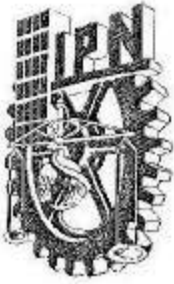
Suplente

M. EN C. TOMÁS IGNACIO ASIAÍN OLIVARES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA





INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
COORDINACION DE POSGRADO E INVESTIGACION

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 20 del mes de Febrero de 2007, el que suscribe Ricardo Arturo Trujillo Hernández alumno del programa de Maestría en Ingeniería eléctrica con numero de registro A000303, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de tesis Bajo la dirección del M. en C. Gilberto Enríquez Harper y el Dr. José Alberto Gómez Hernández, y cede los derechos del trabajo titulado: ALGORITMO GENÉTICO PARA ANALIZAR LA CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN, AL Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones: jagohdz@hotmail.com, gilberto.enriquez@cfe.gob.mx, rtrujilloh@hotmail.com

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

Ricardo Arturo Trujillo Hernández



---

---

## DEDICO ESTE TRABAJO

### *A Dios*

*¡Gracias!.... Por permitirme vivir y disfrutar de la vida, por haberme dado una familia a la que amo profundamente, por todas sus bendiciones, por haberme dado la calma y la fuerza para seguir adelante cuando sentía claudicar y, por que no me ha dejado solo en ningún momento.*

### *A mis Amados Padres*

*David Trujillo Hernández y María R. Hernández Flores*

*¡Gracias!.... Por haberme dado la vida, por todo el amor, el ejemplo, el apoyo incondicional, por todo lo que me han dado y por ser ustedes mi mayor motivación para ser mejor persona cada día. Por eso les dedico este logro en mi vida con todo mi amor, cariño, admiración y respeto.*

### *A mi Querido Hermano*

*Angel David Trujillo Hernández*

*¡Gracias!.... Por su apoyo, consejos y por que sin el no habría sido posible concluir este logro.*

### *A mis Adoradas Abuelitas*

*Antonia Hernández Soto†.*

*Trinidad Flores Lozada†,*

*Ana María Flores Lozada.*

*¡Gracias!... Por todo el amor y cariño que siempre me han dado.*



---

---

## AGRADECIMIENTOS

A todos los mis profesores de la SEPI ESIME de ingeniería eléctrica, quienes comparten sus conocimientos desinteresadamente y contribuyen grandemente en el desarrollo de nuestro país.

Mi agradecimiento a los directores de esta tesis, M. en C. Gilberto Enríquez Harper y al Dr. José Alberto Gómez Hernández por su apoyo incondicional como maestros y amigos, quienes durante la realización de la tesis siempre me proporcionaron consejos, críticas, comprensión y sobre todo confianza.

Al H. jurado revisor de esta Tesis, integrado por Dr. Daniel Olguín Salinas, M. en C. Gilberto Enríquez Harper, Dr. José Alberto Gómez Hernández, Dr. David Ruiz Vega, Dr. Jaime Robles García, y M. en C. Tomas Ignacio Asiaín Olivares.

A las instituciones:

COSNET

IPN

Por el apoyo económico recibido durante los estudios de maestría, sin el cual no hubiera sido posible la terminación de esta tesis.

A mis amigos y compañeros por brindarme su apoyo, amistad y confianza: Norberto Posada Téllez, Alfonso Eliel Benítez Olivares, Dora Luz Galicia Mendoza, Wendy Madrid Delgado, Lilia Alejandra Maldonado Zamora, José Antonio Castillo Jiménez, José del Carmen Gómez Vázquez, Gabriel López Ruiz, Rogelio Díaz Flores, Manlio Al Altamirano González, Rubén Arcos Hernández, Sergio López Llaven, Ernesto Meléndez Meléndez, Fabián García Peralta, Baruch Barragán Gómez, Carlos Gallardo M., Yamil Aldana, Enrique O. González de la Parra, Ricardo Carvajal Díaz.

A mis amigos, compañeros y colegas, por su amistad, apoyo personal y profesional: Jorge Luis Zuart Macias, Mario Alberto Villanueva Franco, Sebastián Joseph Pathiyamattom, Joel Moreira Acosta, Joel Pantoja Enríquez, Edgar Eduardo Valenzuela Mondaca, Andrés Reyes Nava, Alfredo Olea Rangel, Carlos Manuel Sánchez Trujillo, Luis Enrique Gómez Aguilera, Fabio Fernández Ramírez.

Para todos los que me faltaron, instituciones, amigos, compañeros, que me han dado su amistad, comprensión, apoyo y por ser parte importante de mi desarrollo personal y profesional..... ¡Gracias!

---

---

## RESUMEN

En el área de la evaluación de la confiabilidad en los sistemas eléctricos de potencia, históricamente en general la zona de distribución ha recibido una menor atención con respecto a las otras dos zonas funcionales: generación y transmisión, debido a que una falla en los elementos de las redes de distribución tiene un impacto menor en la confiabilidad del sistema eléctrico de potencia. Las redes de distribución no son complejas en la topología que las caracteriza, por lo que una falla tiene un alcance local, debido a esto, al invertir para mejorar la confiabilidad en una red de distribución solo beneficiaría a pocos usuarios. Un análisis estadístico de fallas muestra que los sistemas de distribución representan entre el 80% y 90% de las interrupciones totales del suministro de energía a los consumidores. Debido a las políticas de calidad de la energía, reestructuración y procesos de privatización del sector eléctrico, los sistemas de distribución han comenzado a recibir una mayor atención.

Existen muchas formas para mejorar la confiabilidad en las redes eléctricas de distribución, en particular, en este trabajo se adicionan dispositivos de seccionamiento (cuchillas y restauradores) en la sección principal de la red, lo que proporciona una medida para mejorar la confiabilidad de dichas redes. La adición de un dispositivo de seccionamiento aumenta la disponibilidad de energía eléctrica a los puntos de carga y para todo el sistema, debido a que impacta directamente en el tiempo de interrupción, solo que implica una inversión económica inicial. La adición de dispositivos de seccionamiento puede realizarse en sistemas existentes y/o en sistemas que están en fase de diseño, lo que implica tomar decisiones en base a la rentabilidad de los proyectos, mediante el uso de técnicas de evaluación económica, como son el valor presente neto, la tasa interna de rendimiento y la relación costo/beneficio, esto para cada una de las posibles alternativas. En esta tesis para obtener una buena selección de dispositivos de seccionamiento en sistemas de distribución radial se utiliza una técnica de computación evolutiva: algoritmos genéticos.

Determinando así, el número idóneo de dispositivos de seccionamiento necesarios para mejorar la confiabilidad de la red en sus puntos más débiles, logrando una mayor continuidad de la energía hacia los consumidores. Una consideración en este trabajo es que se toma en cuenta los tipos de consumidores como son: industrial, comercial, agrícola, residencial, oficinas, instituciones gubernamentales y usuarios grandes, considerando también algunos costos que serán necesarios para el estudio de rentabilidad, así también, los costos de inversión asociados a la instalación de cada dispositivo de seccionamiento, la mano de obra del dispositivo, por citar algunos; los cuales sumarán un total que será considerado como la inversión inicial del proyecto a evaluar. Buscando así, un balance entre el beneficio obtenido con el costo requerido. Obteniendo del análisis una gama de posibles soluciones que permita seleccionar al proyecto que ofrezca mayores beneficios en un tiempo de amortización aceptable, buenos índices de confiabilidad y que además permita considerar variables en la toma de decisiones como por ejemplo el límite económico. Este problema es de tipo combinatorio, con una infinidad de soluciones; para resolverlo se desarrolló un programa computacional en lenguaje FORTRAN (FORMula-TRANslator).



---

---

## ABSTRACT

In the reliability evaluation of the Electric Power System, in general historically the distribution networks have received a smaller attention with respect to the sources of generation and to the transmission means, because a fault in the elements of the distribution networks has a smaller impact in the electrical system power reliability. The distribution networks are not complex in the topology that characterizes them, reason why a fault has a local reach, due to this, when investing to improve the reliability in a single distribution network would benefit few users. A statistical analysis of faults shows that the distribution systems represent between 80% and 90% of the total interruptions of the provision of energy to the consumers. Due to the policies of quality of the energy, reconstruction and processes of privatization of the electrical sector, the distribution systems have begun to receive a greater attention.

Many forms exist to improve the reliability in the mains of distribution, in particular, this work add switchgears (disconnected switches and reclosers) in the main section of the network, which provides a measurement to improve the reliability of these networks. The addition of switchgear increases the availability of electrical energy to the points of load and for all the system, because it impact directly in the time of interruption, only that it implies an initial economic investment. The addition of switchgears can be made in existing systems and/or systems that are in phase of design, which implies to make decisions on the basis of the profitability from the projects, by means of the use of techniques of economic evaluation, as they are the net present value, the internal rate of return and the relation cost/benefits, this for each one of the possible alternatives. For this work in order to obtain a good selection of switchgears in systems of radial distribution a technique of evolutionary computation: genetic algorithms is used that determines the suitable number of switchgears necessary to improve the reliability of the network in its weaker points, obtaining therefore a greater continuity of the energy towards the consumers. A consideration in this work is that it is taken into account the types from consumers as they are: industrial, commercial, agricultural, residential, governmental and usuary offices, large users, also considering some the associated costs that will be necessary for the profitability study, thus also, costs of investment to the installation of each switchgear, the manual labor of the switchgear, to mention some; which will add a total that will be considered like the initial investment of the project to evaluate. Thus looking for, a balance between the benefit obtained with the required cost. Obtaining from the analysis a range of possible solutions that allows selecting to the project that offers greater benefits in a time of acceptable amortization, good reliability indexes and in addition it allows considering variables in the decision making for example the economic limit. This problem is of type combinatory, with infinity of solutions; in order to solve it a computational program in FORTRAN language was developed (FORmula-TRANslator).



---

---

# ÍNDICE

RESUMEN	I
ABSTRACT	Ii
ÍNDICE	Iii
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	Xiii
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS	Xvi

## CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVO DE LA TESIS	2
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS	2
1.4 ESTADO DEL ARTE	2
1.4.1 Efectos de las fallas	4
1.4.2 Criterio determinístico contra criterio probabilístico	5
1.4.3 Medidas estadísticas y probabilísticas	5
1.4.4 Criterio adecuado	6
1.4.5 Técnicas de evaluación	7
1.4.6 Mejoramiento de la confiabilidad y disponibilidad en el sistema y la planta	8
1.4.7 Aplicaciones	9
1.4.8 Valor de la Confiabilidad	10
1.4.9 Impacto en las decisiones del cliente y estándares de seguridad	12
1.5 APORTACIONES DE LA TESIS	12
1.6 INFRAESTRUCTURA D ELA TESIS	13

## CAPÍTULO II CONFIABILIDAD DE SISTEMAS DE DISTRIBUCION





---

2.1 INTRODUCCIÓN	15
2.2 CALIDAD EN EL SERVICIO DE LA ENERGIA ELECTRICA	15
2.2.1 Objetivo de la teoría de la confiabilidad	17
2.2.2 Consideraciones básicas de diseño en instalaciones eléctricas	17
2.2.3 Evaluación global de la confiabilidad de un sistema	17
2.3 METODOS PARA LA EVALUACION DE LA CONFIABILIDAD	18
2.3.1 Método de cortes mínimos	19
2.3.2 Método de estado permanente	20
2.3.3 Método de la probabilidad condicional	23
2.3.4 Método de la reducción de la red	26
2.4 CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCION	26
2.5 EL COSTO CONTRA EL VALOR DE LA CONFIABILIDAD	30
2.6 EVALUACIÓN DEL VALOR DE LA CONFIABILIDAD	32
2.7 EVALUACIÓN EXPLICITA E IMPLICITA DE LA CONFAIBILIDAD	32
2.8 EVALUACIÓN DEL COSTO POR FALLA DE SUMINISTRO PARA EL CLIENTE	33
2.9 MÉTODOS BASICOS DE EVALUACIÓN	34
2.10 ENCUESTAS DEL COSTO POR INTERRUPCIÓN	36
2.11 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE COSTOS	35
2.12 EVALUACION DE LA CONFIABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION	38
2.12.1 Funciones de daño al consumidor	38
2.12.2 Función compuesta de daño a1 consumidor (FCDC)	40

## **CAPÍTULO III**

### **MÉTODOS DE EVALUACION ECONOMICA**

3.1 INTRODUCCIÓN	42
3.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA	42
3.2.1 Conceptos básicos de evaluación económica	42
3.2.1.1 Proyecto	42



---

3.2.1.2 Inversión	43
3.2.1.3 Proyecto de inversión	43
3.2.1.4 Decisiones básicas de un proyecto de inversión	43
3.2.1.5 Clasificación de los proyectos de inversión	43
3.2.2 Evaluación económica y financiera	44
3.2.2.1 Rentabilidad	45
3.2.3 El valor del dinero a través del tiempo	46
3.2.4 Tipos de intereses y tasas de descuento para evaluar el proyecto de inversión	46
3.2.5 Métodos de evaluación económica de proyectos	47
3.2.5.1 Método del período de recuperación (PR)	47
3.2.5.2 Método del valor anual equivalente (VAE)	48
3.2.5.3 Método del valor presente neto (VPN)	48
3.2.5.4 Método de la tasa interna de rendimiento (TIR)	50
3.2.5.5 Método de la relación costo beneficio (RCB)	51
3.2.6 Evaluación de un proyecto individual	52
3.2.6.1 Evaluación de proyectos mutuamente exclusivos	53
3.2.6.2 Proyectos sin tasas de rendimiento	53
3.2.6.3 Proyectos con una sola tasa de rendimiento	53
3.2.6.4 Proyectos con múltiples tasas internas de rendimiento	54
3.2.7 Ejemplo del análisis económico	54
3.3 EJEMPLO DEL COSTO CONTRA EL VALOR DE LA CONFIABILIDAD	55
3.3.1 Evaluación	56
3.3.2 Datos	57
3.3.3 Cálculos del sistema existente	58
3.3.4 Cálculos del sistema propuesto	58

## **CAPÍTULO IV**

### **OPTIMIZACIÓN DEL COSTO DE LA CONFIABILIDAD UTILIZANDO UN ALGORITMO GENÉTICO**



---

4.1 INTRODUCCIÓN	60
4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO PARA ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD	61
4.2.1 Modelado de la red de prueba	61
4.2.1.1 Asignación de los componentes de la red al grafo modelador	61
4.2.1.2 Creación del grafo modelador	63
4.2.2 Ejemplo de modelado de redes de prueba	63
4.2.3 Asignación de parámetros de confiabilidad de la red de distribución radial a los elementos del grafo modelador	64
4.3 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE CORTES	65
4.3.1 Formación de trayectorias mínimas	66
4.3.1.1 Determinación del árbol	66
4.3.1.2 Obtención de las trayectorias mínimas	69
4.3.2 Deducción de cortes	70
4.3.2.1 Deducción de cortes pasivos	70
4.3.2.1.1 Procedimiento para obtener cortes pasivos de primer orden	71
4.4 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA LA OPIMIZACION DE LA CONFIABILIDAD	71
<b>4.4.1 Interpretación del problema real al Algoritmo Genético</b>	71
<b>4.4.1.1. Creación de la población inicial</b>	72
4.4.1.2 Selección de los individuos	73
4.4.1.3 Creación de la nueva población	73
4.4.1.4 Criterio de terminación	74
4.4.2 Técnica para la evaluación de costos de interrupción al cliente	74
4.5 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN	75
4.5.1 Técnica de enumeración	75

## **CAPITULO V**

### **VALIDACION PRUEBAS Y RESULTADOS**

5.1 INTRODUCCIÓN	78
5.2 SISTEMA DE ESTUDIO 1	78



---

5.2.1 Caso re prueba No.1	78
5.2.2 Caso re prueba No.2	87
<b>5.3 SISTMA DE ESTUDIO 2</b>	91
<b>5.3.1 Caso de prueba No. 1</b>	91
<b>5.3.2 Caso de prueba No.2</b>	98
<b>CAPÍTULO VI</b>	
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS</b>	
6.1 INTRODUCCIÓN	102
6.2 CONCLUSIONES	103
6.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	104
<b>REFERENCIAS</b>	106
<b>APÉNDICE A</b>	
<b>EVALUACION EN INDICES DE CONFIABILIDAD</b>	
A.1 INTRODUCCIÓN	114
A.2 EVALUACION DE LA CONFIABILIDAD EN SISTEMAS SIMPLES	114
A.2.1. Sistemas serie	115
A.2.2 Sistema paralelo	117
A.3 SISTEMA SERIE-PARALELO	118
A.4 SISTEMAS PARCIALMENTE REDUNDANTE	122
A.5 CONCEPTOS DE CONFIABILIDAD	124
A.5.1 Modos de falla de un componente	124
A.5.2 Modos de salida de un componente	125
A.5.3 Causas de la salida	126
A.6 RED DE CONFIABILIDAD	131
A.7 INDICES DE CONFIABILIDAD EN REDES DE DISTRIBUCIÓN	132

---



---

A.7.1 Índices de confiabilidad basados en los clientes	142
A.7.2 Índices de confiabilidad basados en la carga	136
A.7.3 Índices de la calidad de la energía	138

## **APÉNDICE B**

### **OPTIMIZACION NÚMÉRICO**

B.1 INTRODUCCIÓN	141
B.2 FORMULACION MATEMÁTICA	142
B.2.1 Ejemplo: problema de transportación	143
B.2.2 Optimización continua contra discreta	144
B.2.3 Optimización limitada e ilimitada	145
B.2.4 Optimización global y local	146
B.2.5 Optimización estocástica y determinística	146
B.3 ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN	146
B.4 TÉCNICAS CONVENCIONALES DE OPTIMIZACIÓN	145
B.4.1 Clasificado de modelos de optimización	146
B.4.1.1 Programación lineal	147
B.4.1.1.1 Algunas aplicaciones de la programación lineal	148
B.4.1.1.2 Resolviendo problemas de programación lineal	149
B.4.1.2 Programación meta	150
B.4.1.3 Programación entera	151
B.4.1.3.1 El papel de los modelos de programación entera binaria	151
B.4.1.3.2 Resolviendo modelos de programación entera	152
B.4.1.4 programación no lineal	153
B.4.1.4.1 Tipos de modelos de programación no lineal	156
B.5 SIMULACIÓN	157

## **APÉNDICE C**

**ALGORITMOS  
GENÉTICOS**

**EVOLUTIVOS:**

**ALGORITMOS**



---

C.1 INTRODUCCIÓN	160
C.1.1 Principales paradigmas de los algoritmos genéticos	160
C.1.2.1 Estrategias evolutivas contra programación evolutiva	161
C.2 ALGORITMOS GENÉTICOS	161
C.2.1 Algoritmos genéticos contra otras estrategias evolutivas	163
C.3 DIFERENCIA DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS CON LOS MÉTODOS CONVENCIONALES	164
C.4 VENTAJAS DE LAS TÉCNICAS EVOLUTIVAS	164
C.5 ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE	165
C.6 EJEMPLO DE UN ALGORITMO GENÉTICO	165

## **APÉNDICE D**

### **DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO**

D.1 INTRODUCCIÓN	170
D.2 DESCRIPCIÓN DE LAS SUBROUTINAS	171
D.3 DATOS DE ENTRADA PARA EL PROGRAMA DIGITAL	172
D.4 FORMATO DE LOS ARCHIVOS DE ENTRADA Y SALIDA	175
D.5 CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA “ALGENTC” Y SUBROUTINAS	190



---

---

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Número de Figura</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
1.1	Representación determinística de las características carga/fuerza	6
1.2	Confiabilidad como una función de costo de inversión	11
1.3	Costos de confiabilidad total	11
2.1	Sistema sin aplicar cortes mínimos	20
2.2	Componente en serie con dos componentes en paralelo	21
2.3	Diagrama de transición de estado para el sistema de la figura 2.2	22
2.4	Subdivisión del sistema o red tipo puente	24
2.5	Subsistemas Eléctricos Generación- transmisión- distribución	27
2.6	Porcentaje de fallas en los diferentes subsistemas eléctricos	28
2.7	Curvas de relación costo- confiabilidad	31
2.8	Costos estimados de la interrupción al sector de consumidores	40
2.9	Función compuesta de daño al consumidor	41
3.1	Comportamiento del VPN variando la tasa de interés “ <i>i</i> ”	50
3.2	Valor presente neto y su relación con el método de la TIR	52
3.3	Representación del flujo de efectivo del proyecto	54
3.4	Sistema actual para la evaluación	56
3.5	Sistema propuesto para la evaluación, construir dos kilómetros de línea e instalar un interruptor automático de transferencia	56
4.1	Red de distribución radial	63
4.2	Grafo asociado a la red de distribución de la Figura 4.1	64
4.3	Grafo usado para ilustrar el árbol de trayectorias	67
4.4	Estructura del árbol para el grafo de la Figura 4.3 para ilustrar la repetición local y global como se explica en los pasos 3.2.1 y 3.2.2	67
4.5	Árbol para el grafo de la Figura 4.3	68
4.6	Grafo para explicar la deducción de cortes pasivos	70
4.7	Funcionamiento general del programa de optimización y las subrutinas	77



---

5.1	<b>Red de distribución tipo radial (Sistema de estudio 1)</b>	78
5.2	<b>Grafo modelador de la red de distribución en la Figura 5.1</b>	79
5.3	<b>Curva compuesta de daño al consumidor</b>	81
5.4	<b>Sistema de distribución (Sistema de estudio 2)</b>	91
5.5	<b>Red de distribución radial (3er alimentador de la Figura 5.4)</b>	92
5.6	<b>Grafo modelador de la Figura 5.5</b>	92
A.1	<b>Sistema con dos componentes en serie</b>	116
A.2	<b>Sistema con dos componentes conectados en paralelo</b>	117
A.3	<b>Sistema serie-paralelo</b>	118
A.4	<b>Sistema equivalente</b>	118
A.5	<b>Reducción del sistema equivalente</b>	119
A.6	<b>Modelo de confiabilidad del sistema</b>	119
A.7	<b>Reducción del sistema de la figura A.6</b>	120
A.8	<b>Sistema equivalente de la figura A.7</b>	120
A.9	<b>Reducción del sistema equivalente de la figura A.8</b>	120
A.10	<b>Sistemas parcialmente redundantes</b>	122
A.11	<b>Sistema altamente redundante</b>	123
A.12	<b>Reducción del sistema de la figura A.11</b>	123
A.13	<b>Modelo de tres estados para un interruptor</b>	130
A.14	<b>Ilustración de <math>L_p</math>, <math>L_a</math>, <math>E_d</math> y <math>t</math></b>	137
B.1	<b>Representación geométrica de un problema de optimización</b>	141
B.2	<b>Problema de transportación</b>	142
B.3	<b>Función con varios máximos locales</b>	154
B.4	<b>Una función cóncava y una función convexa</b>	155
B.5	<b>Región factible no convexa con óptimo local múltiple</b>	155
B.6	<b>Grupo convexo y no convexo</b>	156
C.1	<b>Ejemplo de la codificación (mediante cadenas binarias) usada tradicionalmente con los algoritmos genéticos</b>	162
C.2	<b>Esquema para mostrar el cruzamiento entre dos cadenas, mostrando el sitio de cruce escogido aleatoriamente</b>	165

---





---

C.3	<b>Ejemplo de optimización de la función <math>f(x)=x^2</math> en el intervalo entero [0,31]</b>	166
C.4	<b>Asignación de reproducción mediante una rueda de ruleta con tamaños de aberturas de acuerdo a la aptitud de cada cadena. Datos tomados de las tablas C.1 y C.2</b>	167
D.1	Organigrama del programa digital “algentc”	170
D.2	Archivo de entrada “dates.sal” del programa principal “algentc”	175
D.3	Archivo de salida INDICES.SAL de la subrutina LECMAT1	181
D.4	Archivo de salida INDICE_BASE.DAT de la subrutina LECMAT1	181
D.5	Archivo de salida INDICES.SAL de la subrutina LECMAT2	184
D.6	Archivo de salida INDICE_PRO.DAT de la subrutina LECMAT2	184
D.7	<b>Archivo de entrada ENTRADA.DAT (para la subrutina RENTA) generado por la subrutina “prueba”</b>	185
D.8	<b>Archivo de salida RBC.SAL de la subrutina RENTA</b>	187
D.9	<b>Archivo de entrada BER.DAT para la subrutina “prueba”</b>	187
D.10	<b>Archivo de salida “dates.sal” del programa “algentc”</b>	188
D.11	<b>Archivo de salida “dates.sal” del programa “algentc”</b>	188
D.12	<b>Archivo de salida “costosinv.sal” del programa “algentc”</b>	189



---

---

# ÍNDICE DE TABLAS

<b>Número de tabla</b>	<b>Descripción</b>	<b>Pág.</b>
2.1	Cortes mínimos del sistema	20
2.2	Función de daño a los diferentes tipos de cliente	39
2.3	Distribución de clientes mixtos por energía consumida y demanda pico	41
2.4	Función compuesta de daño al consumidor para el cliente mixto	41
4.1	Estadísticas de indisponibilidad típica del cliente	60
4.2	Parámetros de confiabilidad asignados a cada componente de la figura 4.1	65
4.3	Interpretación de las subcadenas	72
4.4	Cromosoma generado de acuerdo a la sección principal	72
5.1	Precios supuestos de los dispositivos de seccionamiento y su mano de obra	79
5.2	Datos individuales de los componentes para el sistema de estudio 1, caso 1	80
5.3	Parámetros de confiabilidad del sistema de estudio 1, caso 1	80
5.4	Parámetros en los puntos de carga para el sistema de estudio 1, caso 1	80
5.5	Duración de interrupción y su respectivo costo (\$/KW) para diferentes sectores	80
5.6	Datos para la evaluación económica	81
5.7	Datos para la evaluación económica	82
5.8	Resultados de los parámetros (tasa de falla e indisponibilidad) obtenidos por el programa de optimización para el sistema de estudio 1 caso 1	83
5.9	Índices de confiabilidad obtenidos por el programa de optimización para el sistema de estudio 1 caso 1	83
5.10	Reporte de la generación 1 (sistema de estudio 1 caso 1)	84
5.11	Reporte de la generación 50 (sistema de estudio 1 caso 1)	85



---

5.12	Datos de la población en la generación 0 (sistema de estudio 1 caso 1)	86
5.13	Datos de la población en la generación 50 (sistema de estudio 1 caso 1)	86
5.14	Tabla para la elección del proyecto de la generación 50(sistema de estudio 1 caso 1)	86
5.15	Datos de los cromosomas para el sistema de estudio 1 caso 1	86
5.16	Reporte de la generación 1(sistema de estudio 1 caso 2)	88
5.17	Reporte de la generación 50 (sistema de estudio 1 caso 2)	89
5.18	Datos de la población en la generación 0 (sistema de estudio 1 caso 2)	90
5.19	Datos de la población en la generación 50 (sistema de estudio 1 caso 2)	90
5.20	Tabla para la elección del proyecto de la generación 50 (sistema de estudio 1 caso 2)	90
5.21	Datos de los cromosomas para el sistema de estudio 1 caso 2	90
5.22	Cargas máximas para el sistema de estudio 2, caso 1	93
5.23	Tipo de alimentador y longitudes para el sistema de estudio 2, caso 1	93
5.24	Datos de los consumidores para el sistema de estudio 2, caso 1	93
5.25	Datos de carga para el sistema de estudio 2, caso 1	93
5.26	Datos individuales de los componentes en el sistema de estudio 2, caso 1	93
5.27	Parámetros de confiabilidad del sistema de estudio 2, caso 1	94
5.28	Reporte de la generación 1 (sistema de estudio 2 caso 1)	95
5.29	Reporte de la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 1)	96
5.30	Datos de la población en la generación 0 (sistema de estudio 2 caso 1)	97
5.31	Datos de la población en la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 1)	97
5.32	Tabla para la elección del proyecto de la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 1)	97
5.33	Datos de los cromosomas para el sistema de estudio 2 caso 1	97
5.34	Reporte de la generación 1(sistema de estudio 2 caso 2)	99
5.35	Reporte de la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 2)	100
5.36	Datos de la población en la generación 0 (sistema de estudio 2 caso 2)	101
5.37	Datos de la población en la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 2)	101
5.39	Tabla para la elección del proyecto de la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 2)	101

---



---

A.1	Clasificación de salidas	126
C.1	Cadenas para el ejemplo y sus valores de aptitud	166
C.2	Algoritmo genético a mano	167
C.3	Cadenas de solución hasta la generación 3	168
C.4	Mejores cadenas para una probabilidad de mutación $p_m=0.1$	169
D.1	Archivo de entrada DIS.DAT para la red radial de la sección 5.2.1	168
D.2	Archivo ICOST.DAT generado por la subrutina ALCON	179
D.3	Archivo de salida MATRIZ.SAL de la subrutina LECMAT1	180
D.4	Archivo de salida MATRIZ.SAL de la subrutina LECMAT2	183
D.5	Archivo de salida RENTA.SAL de la subrutina RENTA	185



---

---

## SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

<b>Simbología:</b>	<b>Descripción</b>
B/C	Beneficio entre costo
C <sub>j</sub>	Costo inicial fijo
Ca	Créditos anuales
c/u	Cada uno
<i>f</i>	Frecuencia
<i>f/km</i>	Falla por kilómetro
<i>i</i>	Tasa de interés
<i>I<sub>o</sub></i>	Inversión inicial
<i>i</i>	<i>i</i> - ésimo elemento
<i>j</i>	<i>j</i> – ésimo elemento
<i>m + r</i>	Tiempo promedio entre fallas = <i>MTBF</i> ( por sus siglas en ingles)
<i>n</i>	Número de años
N	Número total de elementos en el sistema
N/A	Dispositivo normalmente abierto
N/C	Dispositivo normalmente cerrado
P	Flujo de efectivo
<i>r</i>	Tiempo promedio de reparación = <i>MTTR</i> (por sus siglas en ingles)
R <sub>a</sub>	Réditos anuales
t	Tiempo
U	Indisponibilidad
V	Voltaje
X <sub>p</sub>	Riesgo
$\lambda$	Tasa o índice de probabilidad de falla
Ø	Fase de un elemento
\$	Pesos
\$/kw	Costo de la interrupción



---

---

∪	Unión
∩	Intersección
/	Entre
*	Por

<b>Siglas:</b>	<b>Descripción</b>
A	Amperes
ACSR (por sus siglas en ingles)	Cable de aluminio reforzado con acero
AENS (por sus siglas en ingles)	Energía promedio no suministrada
ASAI (por sus siglas en ingles)	Índice promedio de la disponibilidad del servicio
ASIFI (por sus siglas en ingles)	Índice promedio de la frecuencia de interrupción del sistema
ASUI (por sus siglas en ingles)	Índice promedio de la indisponibilidad del servicio
CAIDI (por sus siglas en ingles)	Índice promedio del tiempo de interrupción a los clientes
CAIFI (por sus siglas en ingles)	Índice promedio de la frecuencia de interrupción al cliente
CEA (por sus siglas en ingles)	Asociación eléctrica de Canadá
DIC	Duración de interrupción a los consumidores
ENS	Energía no suministrada
FCDC	Función compuesta de daño al consumidor
FDC	Función de daño al consumidor
FDSC	Función de daño al sector de consumidores
IAC	Interrupción anual a los consumidores
ICOST	Costo de interrupción
IEEE (por sus siglas en ingles)	Institute of Electrical and Electronics Engineers
KA	Kilo ampere
Km	Kilómetro
Km <sup>2</sup>	Kilómetro cuadrado
KV	Kilovolt



---

KVA	Kilovolt ampere
KVAR	Kilovolt ampere reactivo
KW	Kilowatt
KWh	Kilowatt hora
Lcosto	Costo de pérdidas por energía no suministrada
MAIFI (por sus siglas en ingles)	Índice promedio de la frecuencia de interrupción momentánea
MTTF (por sus siglas en ingles)	Tiempo promedio de la Falla
MTTR (por sus siglas en ingles)	Tiempo promedio de reparación
MTTS (por sus siglas en ingles)	Tiempo promedio de switcheo
MVA	Megavolt ampere
PR	Periodo de recuperación
p.u.	Por unidad
RCB	Relación costo beneficio
SAIDI (por sus siglas en ingles)	Índice promedio del tiempo de interrupción del sistema
SAIFI (por sus siglas en ingles)	Índice promedio de la frecuencia de interrupción del sistema
SCADA (por sus siglas en ingles)	Supervisión del control y adquisición de datos
TIR	Tasa de interna de rendimiento
TIU	Tiempo de interrupción al usuario
TREMA	Tasa de rendimiento mínima atractiva
VAE	Valor anual equivalente
VPN	Valor presente neto



---

---

# CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

## 1.1 INTRODUCCIÓN

La primera función técnica de un sistema de potencia es proveer energía eléctrica a los clientes como económicamente sea posible, con un grado aceptable de continuidad y calidad, conocido como confiabilidad. El componente más importante es el cliente y es de suprema importancia satisfacer sus expectativas. Los dos límites, los económicos y los de confiabilidad son competitivos debido a que desde que se incrementa la confiabilidad del suministro se requiere un incremento del capital de inversión. Algo que es de sumo interés para los ingenieros es el como poder balancear estos dos límites técnicamente y económicamente.

Los dispositivos de desconexión son usados en sistemas de distribución primaria para varias aplicaciones tales como para mejorar la confiabilidad, aislar fallas, mejorar la planeación y para reconfigurar la red [1,2]. La selección de un número adecuado de dispositivos de desconexión es un factor importante en sistemas de distribución, más cuando se habla de una red de distribución automatizada, donde los dispositivos de desconexión son activados de forma remota. Los costos asociados con la instalación de los dispositivos de desconexión son realmente significativos, por lo que habrá que llegar a un punto en el que se equilibre el beneficio obtenido con el costo requerido.

Se pueden minimizar los costos usando técnicas de optimización eficientes que determinen el número mínimo de dispositivos de desconexión y su localización óptima. La selección del número adecuado de dispositivos de desconexión y su localización óptima es una tarea difícil para la planeación de sistemas de distribución y depende de muchos factores, tales como consideraciones de confiabilidad, tipo de clientes conectados, variación de la carga, costos de mantenimiento e instalación [3]. Las empresas suministradoras de energía eléctrica utilizan estadísticas de fallas de la red de distribución, datos de los clientes y otras consideraciones para la selección de un número conveniente de dispositivos de desconexión.





## **1.2 OBJETIVO DE LA TESIS**

Minimizar el costo de la confiabilidad de los sistemas de distribución radiales, por medio de la localización de restauradores y cuchillas desconectoras en la sección principal de la red, siendo justificado por métodos de evaluación económica, tales como Valor presente neto, Relación costo beneficio, los cuales indicarán que proyecto proporcionará mayores beneficios con un bajo costo de inversión (es decir, que proyecto es el más rentable). Utilizando para la optimización, la técnica llamada Algoritmos Genéticos.

Además se consideran límites económicos de inversión de tal manera que el ingeniero tenga un abanico amplio de posibles soluciones que le proporcionen buenos índices y parámetros de confiabilidad con los mejores valores de rentabilidad, para poder así elegir al proyecto más viable.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS**

En la actualidad no se cuenta con muchas metodologías para mejorar la confiabilidad de los sistemas de distribución, ya que a este tema no se le daba la importancia que ahora tiene, esto debido a la demanda y a la exigencia de una mejor calidad de la energía. La confiabilidad tiene un costo, el cual puede ser minimizado y es de gran importancia para las compañías suministradoras de energía eléctrica, así como también para los usuarios, ya que al invertir para mejorar la confiabilidad se obtiene un mejor servicio, teniendo en cuenta restricciones económicas y estructurales del sistema, logrando con esto la reducción del tiempo fuera de servicio del sistema ocasionado por una falla, provocando interrupciones de energía al usuario, lo cual repercute económicamente en ambas partes.

Al mejorar la confiabilidad se logra un balance entre el costo de confiabilidad del consumidor con el costo de confiabilidad de la empresa, teniendo en cuenta el capital de inversión dispuesto a utilizarse para mejorar la confiabilidad y la estructura del sistema.

El desarrollo industrial, comercial y de servicios en México, requiere una planeación que garantice el suministro de energía eléctrica, con márgenes de confiabilidad aceptables, aumentado la seguridad de los sistemas de distribución ante posibles contingencias que puedan presentarse. La selección óptima de dispositivos de desconexión en la planeación y operación de sistemas de distribución tiene una aportación importante, donde se deben considerar contingencias (análisis de confiabilidad), tipo de usuarios conectados y restricción de costos [4].

## **1.4 ESTADO DEL ARTE**

En décadas pasadas la mayoría de las publicaciones sobre confiabilidad en sistemas eléctricos de potencia eran dedicadas a los sistemas de generación, donde el interés principal era conocer la disponibilidad de energía y la potencia mediante evaluaciones realizadas con teorías y procedimientos ampliamente desarrollados y conocidos.



Sin embargo, se marca una diferencia a partir del año de 1964 cuando se publican dos trabajos sobre cálculo de confiabilidad en sistemas de transmisión y distribución [5,6]. Desde entonces se aprecia un continuo interés por desarrollar métodos y técnicas de cálculo de parámetros de confiabilidad en redes de distribución, principalmente en los países desarrollados.

Otra motivación para orientar esfuerzos en este sentido lo constituyen los apagones que afectaron a extensas áreas del territorio norteamericano, provocando cuantiosos daños y pérdidas. Esto indicaba que aparte de la disponibilidad de energía también era necesario conocer los posibles puntos débiles de la red, puesto que las fallas fueron consecuencia de ellos.

La técnica de Markov resulta impráctica cuando se trata de analizar sistemas eléctricos de gran tamaño, ya que implica la solución de un sistema de ecuaciones de orden  $2^n$ , donde  $n$  es el número de elementos con los cuales se ha modelado la red eléctrica. Así, por ejemplo, un sistema de sólo 20 componentes requiere solucionar un sistema de  $2^{20} = 1,048,576$  ecuaciones [7].

En 1975 dos trabajos [8,9] presentaron versiones modificadas de las ecuaciones dadas por Todd [6] con las que se obtenían resultados similares a los entregados por la técnica de Markov. La publicación de Billinton de 1975 [10] muestra que es posible utilizar la técnica de Cortes Mínimos para identificar las fallas de los puntos de carga y la manera cómo podrían calcularse los índices de confiabilidad empleando las ecuaciones modificadas dadas en [7,8]. Esta técnica tuvo gran aceptación por simplicidad de su manejo y gran facilidad de programación computacional. Algunas empresas de distribución norteamericanas comenzaron a utilizar estas evaluaciones para mejorar el funcionamiento de sus redes. Nuevos esquemas de investigación fueron generando metodologías que intentaban representar mejor el complejo comportamiento de una red eléctrica, es así como en [11] se presenta una técnica para evaluar índices de confiabilidad al considerar las maniobras que se siguen en la ocurrencia de una falla, mientras que trabajos posteriores van eliminando algunos supuestos que habían simplificado la simulación del comportamiento de las redes eléctricas, tanto de transmisión como en distribución. Inicialmente se consideró solo la continuidad del suministro, pero en trabajos posteriores se incluyó los niveles de voltaje e índices de confiabilidad totales para la red eléctrica [12,13].

La confiabilidad de los sistemas de distribución ha sido tradicionalmente evaluada por sus índices de confiabilidad, basados en la frecuencia y duración de las interrupciones a los usuarios. La mayoría de estos índices dan la frecuencia y duración de interrupciones sostenidas (SAIDI, SAIFI, CAIDI), aunque también se consideran los índices para interrupciones momentáneas e interrupciones de energía [14,15]. Aunque estos índices dan una idea de que usuarios pueden contar con energía, ellos no manejan costos, [16,17] pero son limitados en cuestión del costo de confiabilidad de los usuarios y tampoco incluyen el costo de confiabilidad de las compañías suministradoras de energía eléctrica.



Para el ingeniero en distribución hay tres metas: primero, minimizar el costo de confiabilidad del usuario para un costo fijo de la compañía suministradora, segundo, lograr un nivel fijo de confiabilidad para el usuario a un costo mínimo de la compañía suministradora y tercero, minimizar el costo total de la confiabilidad [18-21].

Para diseñar detalladamente un sistema de distribución ante una pre-salida por falla, se considera que es un problema de optimización de tipo discreto. El método para solucionar el problema, debe ser capaz de considerar el costo total de confiabilidad como una función objetivo, permitiendo explorar una variedad de soluciones e identificando con cual el costo se minimiza. Algunos métodos de optimización utilizados por diferentes autores son: programación entera [22], simulación templada (simulated annealing) [23], algoritmos genéticos [24-27], y métodos híbridos [28,29].

Se le ha dado mucha atención a la planeación de sistemas de distribución. Esta investigación se ha inclinado en la parte económica [30,31] y la confiabilidad [21,32], pero se limita solo en la colocación de subestaciones y salidas de alimentadores primarios. Después de que han sido localizadas las subestaciones de distribución y han sido aislados los alimentadores primarios, el sistema necesita diseñarse a detalle (localización de interruptores y dispositivos de protección), donde se debe considerar la automatización, en donde todas las decisiones de diseño afectan a la confiabilidad y al costo de la misma. En la actualidad, la mayoría de los diseños se desarrollan de forma manual, dando como resultado diseños y soluciones no estandarizadas [33].

Como antecedentes a esta tesis se han realizado trabajos previos en la SEPI ESIME, donde se considero un sistema de distribución con un número de posibles localizaciones donde se pueden instalar dispositivos de desconexión. En [33] se utilizo la técnica búsqueda directa y bisección considerando la colocación de interruptores únicamente.

En el trabajo [34] se utilizo el método de búsqueda directa a diferencia de que aquí considero la colocación dos diferentes dispositivos de desconexión (cuchillas y restauradores ) además se calcularon los índices de confiabilidad, dirigidos a clientes y al sistema, además de considerara métodos de evaluación económica.

A continuación se describen algunos temas de importancia en la evaluación de la confiabilidad de los sistemas eléctricos de potencia, conceptos que fueron considerados en la realización de este trabajo [35].

#### **1.4.1 Efectos de las fallas**

La industria de suministro eléctrico opera un sistema muy complejo y altamente integrado. Las fallas en cualquier parte de esta industria pueden causar interrupciones, las cuales sus rangos incomodan a desde un número pequeño de residentes locales hasta una mayor y extensa interrupción catastrófica del suministro. El impacto económico de estas fallas no son necesariamente restringidas a la pérdida del rédito por la utilidad o por la perdida de la energía no suministrada al cliente pero, para estimar los costos verdaderos , se debe también incluir costos indirectos impuestos en la sociedad y en el medio debido a la falla.



### 1.4.2 Criterio determinístico contra criterio probabilístico

La mayoría de los criterios de las planeaciones, diseños y operaciones son basados en técnicas determinísticas, tales como un porcentaje de reserva o un criterio  $(n-1)$  de contingencia. Estos han sido utilizados por décadas por las empresas y puede y son discutidos que han servido a la industria de una manera extremadamente bien en el pasado.

Podríamos preguntarnos si existe alguna otra justificación para cuestionar su uso y sugerir una aproximación diferente a lo que la respuesta es que “sí”, si y solo si las aproximaciones determinísticas contienen debilidades inherentes y la nueva aproximación involucra un número mayor de medidas objetivas en la decisión tomada.

Desde hace 40 o 50 años se identificó la necesidad de la “evaluación probabilística”, relacionando la economía a la confiabilidad, y la medición de los beneficios, las técnicas y el criterio deben ser tales que ellos cuantifiquen el beneficio derivado por el cliente y que este cliente debe ser capaz de identificar el valor de cualquier inversión en el sistema o cambio en la estrategia operacional.

### 1.4.3 Medidas estadísticas y probabilísticas

Las fallas de los componentes, de la planta y de los sistemas ocurren aleatoriamente; la frecuencia y duración y el impacto de las fallas varían de un año al siguiente. Generalmente todas las empresas registran detalles de los eventos que van ocurriendo y producen un grupo de funcionamientos establecidos.

Esto puede ser limitado o extensivo en número y pueden incluir:

- Disponibilidad del sistema
- Energía estimada no suministrada
- Número de incidentes
- Número de horas de interrupción
- Excursiones más allá del grupo de los límites de voltaje
- Excursiones más allá del grupo de los límites de frecuencia

Estas medidas de funcionamiento son valiosas debido a que ellas:

- (a) identifican áreas débiles que necesitan reforzarse o modificarse
- (b) establece tendencias cronológicas en el funcionamiento de la confiabilidad
- (c) establecen índices existentes los cuales sirven como una guía para aceptar valores en las futuras mediciones de la confiabilidad
- (d) permite predicciones previas para ser comparadas con la operación actual
- (e) monitorea la respuesta a los cambios del sistema diseñado

El punto importante es que estas medidas son índices estadísticos. No hay valores determinísticos pero en el mejor de los casos son promedio o valores esperados de una distribución de probabilidad.



Se aplican los mismos principios básicos si se está determinando el futuro comportamiento del sistema. Se puede suponer que las fallas que ocurren aleatoriamente en el pasado pueden ocurrir aleatoriamente en el futuro y por lo tanto el sistema se comporta de manera probabilística, más precisamente estocásticamente. También las medidas pronosticadas pueden ser comparadas con los funcionamientos establecidos anteriormente o índices que podrían ser una forma extremadamente benéfica para comparar el pasado y el futuro pronosticado. Estas medidas solo pueden ser pronosticadas utilizando técnicas probabilísticas.

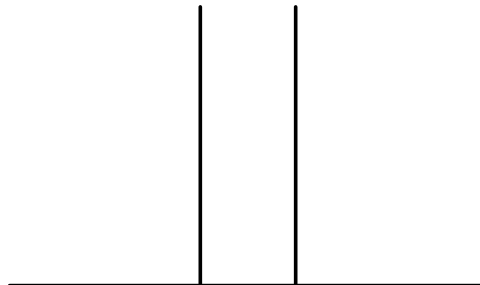
Para aplicar las técnicas y criterios determinísticos, el sistema debe ser artificialmente restringido en un grupo ajustado por valores los cuales no tienen incertidumbre o variabilidad.

El reconocimiento de estas restricciones resulta en un estudio extensivo de escenarios específicos o llamados eventos ‘creíbles’. La debilidad esencial es que se descuida esta probabilidad y el verdadero riesgo no puede ser determinado.

#### 1.4.4 Criterio adecuado

La necesidad de tener un criterio para medir el funcionamiento adecuado es aplicable si son usadas las medidas probabilísticas o determinísticas. El criterio apropiado determina los límites entre que es aceptable o adecuado y que no lo es. Históricamente, el indicador del funcionamiento del sistema y el nivel aceptable son ajustados a valores determinísticos, especificados y calculados utilizando técnicas determinísticas. Estos dos valores son comparados como se observa en la Figura 1. Teóricamente, si el indicador del funcionamiento  $L_p$  es menor que un nivel específico  $L_s$ , el sistema tiene una seguridad adecuada. El indicador del funcionamiento y el nivel aceptable son separados por un margen de seguridad específico. Estos conceptos, aunque reconocen que la variabilidad existe, no reconocen la probabilidad de las variaciones y entonces pueden imponer una seguridad excesiva si la dispersión en las dos características es pequeña, pero también hay una seguridad inadecuada si la dispersión es muy grande.

Figura 1.1 Representación determinística de las características carga/fuerza



La aplicación de la teoría de la probabilidad para medir las suficiencias disponibles deben de tomar en cuenta las variaciones probabilísticas y estocásticas



### 1.4.5 Técnicas de evaluación

Pueden determinarse una amplia gama de índices apropiados utilizando la teoría de la probabilidad. No existe una simple fórmula o técnica. La aproximación utilizada y las fórmulas resultantes, si existen, dependen del problema y las suposiciones utilizadas. Muchas suposiciones deben realizarse en todas las aplicaciones prácticas de la teoría de la probabilidad y estadística. La validez de los análisis es directamente relacionada a la validez del modelo utilizado para representar al sistema. Las distribuciones reales de falla raramente se ajustan completamente a las descripciones utilizadas en el análisis, y se debe de tener cuidado para asegurar que no son introducidos errores significativos por la sobre simplificación de un problema.

El aspecto más importante para recordar es que es necesario tener un completo conocimiento de las implicaciones de la ingeniería del sistema. Ninguna teoría de la probabilidad puede evitar esta función de ingeniería. Por lo tanto es evidente que la teoría de la probabilidad es solo una herramienta que permite a un ingeniero transformar el conocimiento del sistema a una predicción del probable futuro comportamiento. Solo después de que se ha alcanzado este entendimiento se puede derivar un modelo y elegir a la técnica de evaluación más apropiada, ambos deben reflejar y responder a la forma de operación del sistema y de fallas. Por lo tanto los pasos básicos son:

- Comprender la manera en que operan los componentes y el sistema
- Identificar las maneras en las que puedan fallar
- Deducir las consecuencias de las fallas
- Derivar modelos para representar estas características
- Solo entonces seleccionar la técnica de evaluación

Existen dos categorías principales de las técnicas de evaluación: Analítica y Evaluación. Las técnicas analíticas representan al sistema mediante un modelo matemático y evalúa los índices desde este modelo utilizando soluciones matemáticas. Probablemente, los métodos de simulación Monte Carlo estiman los índices simulando el proceso actual y el comportamiento aleatorio del sistema. Por lo tanto el método trata al problema como unas series de experimentos reales [36]. Estos son méritos y deméritos en ambos métodos.

Generalmente la simulación por Monte Carlo requiere una gran cantidad de tiempo de computo y no es utilizado extensivamente si están disponibles los métodos analíticos alternativos. En teoría, sin embargo, puede cualquier efecto del sistema o procesos del sistema aproximarse por métodos analíticos.

Debe notarse que los índices pronosticados son buenos como sea bueno el modelo derivado del sistema, la conveniencia de la técnica de evaluación y la calidad de los datos de entrada utilizados en los modelos y técnicas.



#### **1.4.6 Mejoramiento de la confiabilidad y disponibilidad en el sistema y la planta**

La consideración de la confiabilidad y de la disponibilidad es una gran parte de la etapa de diseño de un sistema. Es importante apreciar la diferencia entre ‘confiabilidad’ y ‘disponibilidad’. La confiabilidad se relaciona a la probabilidad del sistema restante en el estado de operación mientras la disponibilidad se relaciona a la probabilidad del sistema estando en el estado de operación. La disponibilidad depende de los eventos de falla y el tiempo tomado para restablecer el suministro donde ocurrieron las fallas. Se puede gastar dinero para reducir los eventos de fallas y/o el tiempo de reparación, y por lo tanto existen de nuevo opciones.

Existen un número de formas y cualidades que pueden afectar la confiabilidad y la disponibilidad. Una cualidad es la calidad. Esto es evidente y no solo concierne a los materiales y componentes utilizados en el sistema, si no también a la calidad de la fabricación, construcción, prueba, calibración, transporte, operación y mantenimiento. Estas por si mismas depende de la calidad y experiencia del personal, el estrés al cual esta expuesto, el entrenamiento que ha tomado, el medio ambiente en el cual trabajan. Estos factores humanos juegan un papel muy importante en la confiabilidad de productos y sistemas, todavía son difíciles de cuantificar objetivamente. Se realiza una cantidad considerable de investigación y desarrollo en esta área de actividad, la respuesta de esto tiende a colocar énfasis o pautas relacionadas a una buena practica.

Una segunda cualidad acepta que los componentes siempre fallarán de un tiempo a otro y que ahí debe estar respaldado el sistema de tal manera que la falla del componente sea absorbido por otro; este estado de respaldo es conocido como redundancia.

La redundancia es de dos tipos: activa y pasiva. La redundancia activa existe cuando los componentes comparten la función entre ellos y la actividad es automáticamente absorbida por los componentes restantes si uno o más fallan. Esto también conocido como redundancia paralela. La redundancia pasiva existe cuando los componentes redundantes permanecen en un estado pasivo y son solo suicheados en el sistema cuando el funcionamiento del componente(s) principal falla.

El mejoramiento de la calidad o la redundancia requiere una inversión adicional. De nuevo se puede preguntar ¿esto tiene algún valor?

Otro método que es utilizado para mejorar la confiabilidad es la diversidad. Esto significa que, cuando la redundancia es utilizada en un sistema, puede haber algún merito al escoger componentes similares pero de diferentes fabricantes, o usar componentes diferentes.

La lógica de la diversidad es que, si existen debilidades inherentes en uno de los componentes (avería en el diseño, falla en la fabricación) esto no afectará a todos los componentes y así el sistema resultante debe ser más fuerte. Esto claramente será solo en el caso de que si el uso de la diversidad elimina uno o más de los componentes más débiles y no remplace un componente fuerte desconocido por uno más débil.



Métodos adicionales para mejorar la disponibilidad del sistema son almacenar repuestos y realizar mantenimiento preventivo. Teniendo repuestos disponibles es en concepto similar a la redundancia pasiva excepto que los procesos incluyen el cambio manual de los componentes fallados en lugar de un suicheo manual o automático. El bajo tiempo es por lo tanto mucho mas largo pero la configuración del sistema es usualmente más simple. El almacenamiento de repuestos es un problema económico el cual es frecuentemente resuelto usando técnicas de optimización para decidir el número optimo de repuestos requeridos, si colocarlos de manera centrada o dispersa, etc. Estas consideraciones deben tomar en cuenta el costo, la probabilidad de operación de los componentes fallados y la vida útil de los repuestos.

El mantenimiento preventivo debe ser realizado cuando los componentes están cerca del final de su vida útil o cuando son detectadas fallas incipientes. Estos tiempos son muy difíciles para establecer en práctica y por lo tanto el mantenimiento preventivo es realizado frecuentemente en intervalos regulares cuando cualquiera de los componentes son checados y remplazados si es necesario o remplazado independientemente de su estado actual.

#### **1.4.7 Aplicaciones**

Los siguientes tópicos muestran algunas áreas en la cuales la teoría de la probabilidad tiene y esta siendo aplicada en sistemas de potencia. Algunas áreas son altamente desarrolladas y utilizadas en la práctica mientras otras están en la etapa de desarrollo.

##### *Diseño de una estructura de línea*

La confiabilidad estructural es de interés en muchas disciplinas incluyendo el diseño de línea. Una formulación simple del problema general fue presentado cuando consideraron el traslape entre la carga y las distribuciones de la fuerza (Fig. 3). Factores tomados en cuenta incluyendo el viento, hielo, temperatura, envejecimiento y fatiga, y su impacto en los conductores, cadenas de aislamientos, torres y bases. Claramente la fuerza infinita no es factible y siempre ocurrirán fallas de las líneas sobre ciertas condiciones adversas.

##### *Análisis de corto circuito*

Factores que afectan a las corrientes de corto circuito incluyen a la localización de la falla, tipo de falla y a las condiciones del sistema. Desde que son eventos aleatorios, la corriente de falla puede también ser descrita por una función de la densidad de la probabilidad. Considerando la probabilidad así como la magnitud que puede tener un mayor impacto en el índice de corto circuito. También pueden ser aumentados índices previos si es incluido subsecuentemente el análisis probabilístico.

##### *Estabilidad transitoria*

De una manera similar para el análisis de corto circuito, la estabilidad de un sistema es dependiente de muchos factores incluyendo la localización de un disturbio, energía inyectada, tipo de falla, tiempos de falla, impedancias del sistema, y configuración del sistema. Las técnicas que han sido desarrolladas permiten evaluar la probabilidad de la probabilidad como una función de estas variables.





### *Flujo de carga*

Inyecciones de energía, cargas, la generación así como las configuraciones de la red, todo varía aleatoriamente con el tiempo. Las técnicas probabilísticas del flujo de carga toman estos factores en consideración y evalúan la probabilidad las funciones relevantes de la densidad de la probabilidad para parámetros tales como los flujos de línea, voltajes en las barras de distribución, inyecciones de energía reactiva.

### *Evaluación de la confiabilidad*

Este es el área de aplicación más extensamente estudiada. El trabajo en esta área fue iniciada en los 1930s . Un indicador de los parámetros que pueden ser evaluados incluyen:

- Para los estudios de la capacidad de generación- pérdida de la carga esperada y pérdida de la energía esperada.
- Para la generación compuesta y sistemas de transmisión- un rango de índices global o de puntos de suministro que incluyen frecuencia, duración, carga, energía.
- Para sistemas de distribución- índices de punto de carga incluyendo frecuencia, duración, carga, energía.

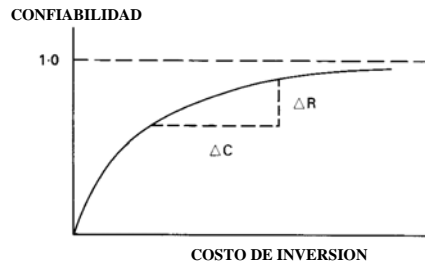
## **1.4.8 Valor de la Confiabilidad**

Un punto muy importante de discusión es sobre si tiene o no algún valor la confiabilidad. Según lo indicado un número de veces, los costos y la economía juegan un papel mayor en la aplicación de los conceptos de confiabilidad y su logro físico. En este contexto, la cuestión puesta es: “en donde o en que parte del sistema debe invertirse el siguiente peso, a para alcanzar el máximo beneficio de confiabilidad”. Esto puede ser una cuestión de extrema dificultad para responder, pero es vital y solo puede ser procurado si los índices cuantitativos constantes de la confiabilidad son evaluados para cada una de las alternativas.

Por lo tanto es evidente que la confiabilidad y la economía juegan un papel importante en la decisión para realizar procesos. El primer paso en este proceso mostrado en la Fig. 1.2 se observa como la confiabilidad de un producto o sistema es relacionado al costo de inversión, es decir, se requiere de incrementar el costo para mejorar la confiabilidad. Esto claramente muestra la tendencia general que el costo incrementado  $\Delta C$  alcance un incremento dado de confiabilidad  $\Delta R$  aumentos que suceden cuando los niveles de confiabilidad incrementan o, alternativamente, un incremento dado en la inversión produce un decremento que disminuye en confiabilidad como la confiabilidad aumenta. En cualquier caso, es costoso alcanzar una alta confiabilidad.



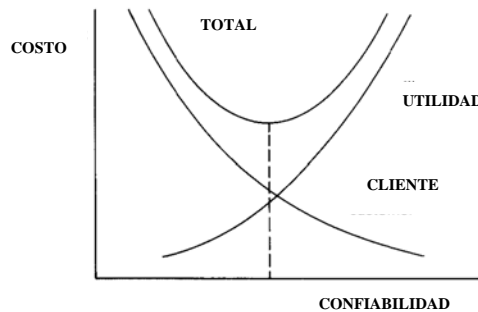
Fig. 1.2 Confiabilidad como una función de costo de inversión



El aumento del costo de la confiabilidad,  $\Delta C / \Delta R$ , mostrado en la Fig. 1.2 es una forma de decidir si una inversión en el sistema es valiosa. Sin embargo, esto no refleja adecuadamente los beneficios vistos por la empresa, el cliente o la sociedad. Los dos aspectos de la confiabilidad y de la economía pueden apreciarse mejor de manera más consistente por medio de la comparación del costo de la confiabilidad (el costo de inversión necesario para alcanzar un cierto nivel de confiabilidad) con el valor de la confiabilidad (el beneficio derivado por los clientes y la sociedad).

Este tipo de valoración de la economía es un área fundamental e importante de la aplicación de la ingeniería. La extensión del análisis cuantitativo de la confiabilidad a la evaluación del valor del servicio es una simple inclusión engañosa la cual es cargada con una aplicación potencial errada. El concepto básico de la evaluación de confiabilidad-costo/confiabilidad-valor es relativamente simple y puede ser presentada como las curvas costo/confiabilidad de la Fig. 1.3.

Fig. 1.3 Costos de confiabilidad total



Estas curvas muestran que el costo de inversión generalmente aumenta con una confiabilidad más alta. De otra manera, el costo del cliente asociado con las fallas disminuye conforme la confiabilidad aumenta. El costo total por lo tanto es la suma de estos dos costos individuales. Este costo total expone un mínimo, y así se alcanza un “óptimo” o un nivel de confiabilidad. Este concepto es absolutamente válido. Dos dificultades se presentan en su determinación. Primero, los índices calculados son usualmente derivados solo de modelos aproximados. Segundo, existen problemas significantes en la determinación de las opiniones del cliente de los costos de falla del sistema.



Los conceptos y aplicaciones ilustrados en la Fig. 1.2 y 1.3 requieren una determinación cuantitativa de la confiabilidad incluyendo una técnica de determinación que responda a los factores reales que afectan a la confiabilidad del sistema [35].

#### **1.4.9 Impacto en las decisiones del cliente y estándares de seguridad**

Los conceptos económicos discutidos anteriormente proporcionan la oportunidad para la industria eléctrica suministradora re-examinar algunas de sus filosofías y estándares básicos. Las siguientes cuestiones son un breve ejemplo de puntos los cuales deben ser considerados y discutidos:

- Tener una alta calidad de suministro y un costo relacionado
- Aceptar una baja calidad y sufrir las consecuencias
- Invertir en su propia planta de emergencia

El conocimiento y la discusión en cuestiones tales como estas lleva a la propuesta que la industria suministradora de energía por lo tanto no necesita imponer o adherir estándares rígidos pero debería en lugar de ello proporcionar a los clientes información relacionada con la calidad del suministro, es decir la confiabilidad, disponibilidad y costos relacionados.

Esto requiere una visión de un nuevo futuro, un escape del limitado y atrincherado pasado, es conocido que todos los productos en el mercado varían en calidad y confiabilidad, y que los clientes deben tener libertad de escoger entre ellos.

#### **1.5 APORTACIONES DE LA TESIS**

Se desarrolla un algoritmo el cual considera combinaciones de dispositivos de seccionamiento (cuchillas desconectadoras y restauradores), que se pueden colocar en la sección principal de la red de distribución. Reflejando la mejoría de la confiabilidad por medio de indicadores económicos (VPN, TIR, RCB) basándose en los principales índices de confiabilidad (SAIFI, SAIDI, CAIDI).

Considerando además una posible limitación económica en el costo de inversión, evento que en ocasiones se presenta sin ser considerado en la etapa de diseño y evaluación del proyecto. De tal manera que si el proyecto más rentable sobrepasa al capital de inversión considerado, se pueda escoger a otro proyecto que talvez no tenga los índices de confiabilidad más altos pero si aceptables y que no sobrepase el capital de inversión.

Encontrando de esta manera a la mejor solución, la cual optimiza la confiabilidad de la red, considerando el factor económico. Proporcionando al ingeniero una herramienta que le permita diseñar, evaluar y elegir a la mejor opción.



---

---

## 1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis está conformada por cinco capítulos en los que se describe el trabajo realizado y los resultados obtenidos, así como de cuatro apéndices que son de utilidad para una mejor comprensión del desarrollo de dicho trabajo.

En el capítulo 1 se presenta la introducción general, justificación, el objetivo de la tesis y las aportaciones. En el estado del arte se presentan los antecedentes más importantes de confiabilidad en los sistemas eléctricos de potencia enfocándose en la zona de distribución.

En el capítulo 2 se presenta, conceptos sobre confiabilidad en redes de distribución donde se describen los temas básicos de la confiabilidad, como son las técnicas de evaluación, el valor de la confiabilidad, así como los métodos de evaluación de costos.

En el capítulo 3, se describen los métodos de evaluación económica que se consideraron para la evaluación de proyectos y así poder determinar cual es el más rentable entre una gama de posibles soluciones.

En el capítulo 4 se presenta el algoritmo empleado para el desarrollo de la tesis.

En el capítulo 5 se presentan los casos de prueba, así como los resultados obtenidos por el programa de optimización.

En el capítulo 6, se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones de trabajos futuros.

Para complementar los capítulos anteriores se anexan los siguientes apéndices:

En el apéndice A, se observan los conceptos básicos sobre confiabilidad de sistemas eléctricos de potencia enfocándose en los sistemas de distribución. Se analiza la confiabilidad de sistemas serie, paralelo, serie – paralelo, y demás se describen los índices de confiabilidad que se consideraron para realizar el análisis y la evaluación en este trabajo.



---

En el apéndice B, se establecen los conceptos básicos del tema de optimización, como son sus clasificaciones, los algoritmos y técnicas que existen.

En el apéndice C, se describe la técnica llamada Algoritmos Genéticos, proporcionando las bases y conceptos del algoritmo, así también la interpretación del problema real a la estructura del algoritmo para su posible solución.

En el apéndice D se muestra el programa digital utilizado para analizar la confiabilidad y rentabilidad de los sistemas de distribución radiales.

# CAPITULO II CONFIABILIDAD DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

## DEFINICIONES DE CONFIABILIDAD

### 2.1 INTRODUCCIÓN

En este Capítulo se describen aspectos importantes tales como la calidad en el servicio de la energía eléctrica, la confiabilidad en sistemas de distribución y los métodos para evaluar la misma, el como se ven afectados los usuarios y las compañías suministradoras de servicio de energía eléctrica por no tener un buen índice de confiabilidad en sus sistemas, así como los costos por pérdidas que se presentan por no atender este punto tan importante.

### 2.2 CALIDAD EN EL SERVICIO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Una de las definiciones de calidad dice: es la suma de características de desempeño de un producto o servicio, que permiten satisfacer las necesidades del cliente.

La compañía suministradora esta comprometida a proporcionar un servicio que cumpla con algunos requerimientos mínimos, para de este modo poder garantiza a los clientes calidad en el suministro, esto a su vez se traduce en confianza por parte d de los mismos en el sentido de que no habrán daños en sus equipos y que tendrán un funcionamiento optimo, y por otro lado que sus perdidas por falta de suministro también serán las mínimas. Entre algunos de los requerimientos principales se tienen los siguientes [43-45]:

- a) Un servicio Continuo
- b) Una forma de onda sin deformaciones
- c) Regulación de voltaje
- d) Control de la frecuencia
- e) Bajo contenido de armónicas
- f) Desbalance de voltaje
- g) Confiabilidad

## CONFIABILIDAD.-

La confiabilidad es un factor importante para contar con un servicio de calidad en el suministro de la energía eléctrica. Una definición de confiabilidad es la siguiente:

“la confiabilidad es la probabilidad de que un producto determinado realice aquellas funciones para las que fue concebido, de manera satisfactoria durante un periodo de vida útil determinado, bajo ciertas condiciones ambientales definidas” [43-45].

Por lo anterior podemos decir que un sistema confiable es aquel que desempeña una función para la cual fue creado, cuando se le requiera; por lo tanto la calidad es una característica del sistema, durante la producción del mismo o inmediatamente después de esta, y la confiabilidad es la capacidad del producto para desempeñar su función durante un cierto periodo de tiempo. Un sistema que funciona durante un periodo de tiempo prolongado, es un sistema confiable.

Hay cuatro factores relacionados directamente con lo que es la confiabilidad [46].

### *1. Un valor numérico*

El valor numérico es la probabilidad de que el producto no falle durante determinado tiempo. Por ejemplo, el valor 0.93 indicaría la probabilidad de que 93 de 100 productos funcionen por un lapso previamente establecido y de que siete productos fallen antes de ese mismo lapso. Para representarse la tasa de falla por unidad de producto se utiliza distribuciones probabilísticas.

### *2. Una función específica*

El segundo factor esta relacionado con la función que desempeñará el producto. Los productos que se diseñan para una aplicación determinada y de ellos se espera que sean capaces de realizarla. Por ejemplo, de un montacargas eléctrico se espera que sea capaz de levantar cierta carga especificada en su diseño, no es de esperar que pueda levantar una carga que exceda lo especificado en el diseño.

### *3. Un lapso vital.*

El tercer factor se refiere a la vida del producto, es decir, cuanto tiempo se espera que dure éste. Por ejemplo, la vida de los neumáticos de los autos se especifica mediante diversos valores, como sería el de 36 meses o 70,000 Km. Dependiendo del tipo de armazón de los mismos. La vida de un producto se especifica en términos de uso, tiempo o ambos.

-



#### 4. *Condiciones ambientales.*

El último factor tiene que ver con las condiciones ambientales. No se pueden esperar que un producto destinado a servir en interiores, como sería una silla tapizada, funcione adecuadamente en exteriores expuesta al sol, aire y lluvia. Dentro de las condiciones ambientales se toman en cuenta aspectos como el almacenamiento y el transporte, pues muchas veces su efecto es más severo que el uso mismo.

##### **2.2.1 Objetivo de la teoría de la confiabilidad.**

Desde hace mucho tiempo se ha comprendido que la teoría de la confiabilidad está vinculada con el exceso o reserva. Por ello en cálculos de ingeniería se utilizan ampliamente los factores de seguridad que con cierta frecuencia llegan a convertirse en factores de inseguridad.

Fundamentalmente la teoría de la confiabilidad se enfoca en tener bases cuantitativas para predecir el comportamiento de la pieza, ensamble, equipo, componente o sistema, para determinar el grado óptimo de reserva sin caer en el exceso o en el defecto.

##### **2.2.2 Consideraciones básicas de diseño en instalaciones eléctricas.**

Toda instalación eléctrica debe proyectarse atendiendo varios criterios básicos, entre los cuales podemos mencionar los siguientes:

Seguridad, Flexibilidad, CONFIABILIDAD, Simplicidad de la operación, Facilidades de mantenimiento, Eficiencia, Ecología y Costo (inicial y global).

##### **2.2.3 Evaluación global de la confiabilidad de un sistema.**

Al evaluar la confiabilidad de un sistema se persigue de cierta forma predecir el comportamiento de este, y si es necesario modificar el estado actual del sistema, de forma tal que se alcance el valor deseado de eficiencia.

Para medir el grado de confiabilidad de un sistema eléctrico, es necesario definir y evaluar uno o más indicadores, los cuales, a partir de la estadística de fallas del sistema y de sus componentes, permitan concluir si el grado de confiabilidad es aceptado o requiere modificarse.

Esto depende de un gran número de variables, pues el accionar de la mayoría de los departamentos de una empresa eléctrica, redundan en el valor de confiabilidad del servicio. No obstante lo anterior, se puede citar como variables fundamentales, las siguientes.

- La calidad y confiabilidad de los componentes
- El diseño de los componentes o su tecnología

-





- La arquitectura del sistema y su redundancia.
- El análisis y atención de las causas recurrentes.

Otras variables de menor peso específico, pero no menos importantes son: la calidad del mantenimiento, la disponibilidad de refacciones, el tiempo de respuesta en operaciones, captación de quejas y atención de disturbios, capacitación del recurso humano, etc.

Cuando se evalúa la confiabilidad a nivel sistema, los indicadores pueden ser de muy diversos tipos, como por ejemplo uno de ellos el TIU (tiempo de interrupción por usuario anual).

Por lo general se requieren de dos clases de indicadores; los de “diseño” y los de “operación”. Los primeros, son el resultado de un proceso analítico previsto a la existencia del sistema, obtenidos a partir del comportamiento de equipos similares; los segundos, resultan de medida del desempeño de un sistema existente, a partir de una estadística de fallas o de interrupciones.

Los indicadores de diseño son útiles para estimar el grado de confiabilidad esperando; los indicadores de operaciones, para mejorar el grado de continuidad del servicio y contrarrestar las causas sistemáticas o recurrentes.

Si se evalúa la confiabilidad del sistema eléctrico por subsistema, será posible observar la incidencia de cada parte del sistema en el resultado global y con ello, decidir dónde se requiere dedicar una atención prioritaria.

Además de todo lo anterior, es importante destacar dos aspectos importantes al evaluar la confiabilidad:

- ✓ El grado de confiabilidad no puede ser el mismo para todas las instalaciones y todos los usuarios.
- ✓ Existe la posibilidad de que con menos inversión se obtenga mayor confiabilidad, productos del análisis de diversas alternativas de solución.

### 2.3 MÉTODOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD

Los valores numéricos para las medidas de la confiabilidad se pueden obtener por métodos analíticos o con la simulación digital. El método de estado permanente es muy general pero llega a ser incómodo para los sistemas relativamente grandes. El método de la reducción de la red es aplicable cuando el sistema consiste de subsistemas en serie y paralelos. El método de corte está llegando a ser cada vez más popular en el análisis de la confiabilidad de las redes de transmisión y distribución [34,47].

-

### 2.3.1 Método de cortes mínimos

Este método puede ser aplicado a los sistemas con configuraciones simples así como con configuraciones complejas y es una técnica muy conveniente para el análisis de la confiabilidad de los sistemas de distribución. Un corte consiste en: "un grupo de componentes cuyas fallas causarían que el sistema falle," y un corte mínimo no tiene ningún subconjunto propio de componentes, cuyas fallas causarían que el sistema falle. Los componentes de un corte mínimo están en paralelo si todos ellos fallan en orden causando falla en el sistema y varios cortes en serie como cualquier corte mínimo pueden causar la falla del sistema.

Después de obtener el corte mínimo, las medidas de confiabilidad se pueden obtener por el uso de formulas [48], asumiendo la independencia del componente y denotando la probabilidad de falla de los componentes en el corte  $C_1$  por  $P(\overline{C}_i)$  [34].

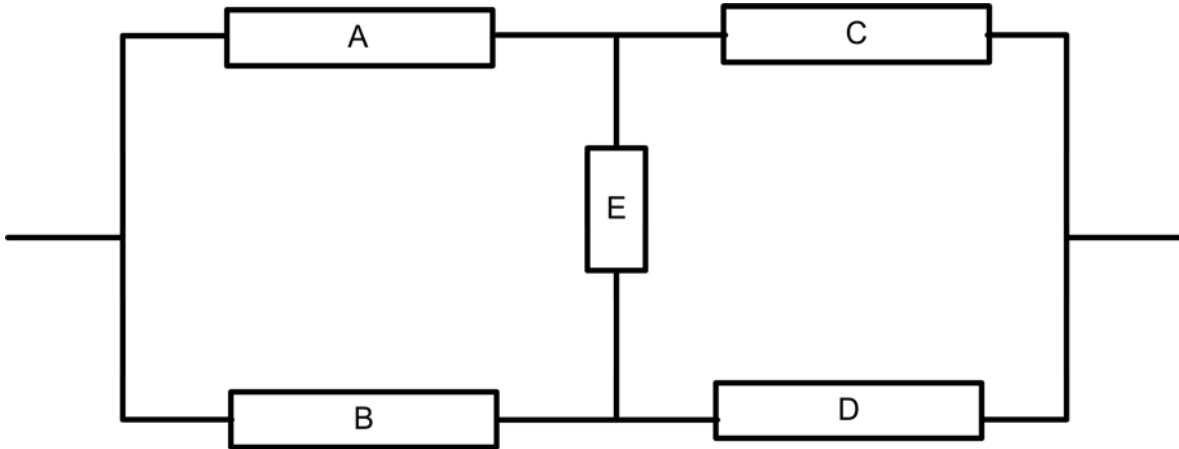
El método de cortes mínimos es una poderosa herramienta para evaluar la confiabilidad de un sistema por dos razones principales:

- a) Este puede ser fácilmente programado en una computadora digital proporcionando una solución eficiente y rápida de cualquier red.
- b) Los cortes están directamente relacionados con los modos de falla del sistema y por tanto se identifican las distintas formas en las que un sistema puede fallar.

*Los cortes son un conjunto de componentes que, cuando fallan, provocan la falla del sistema.* En términos de una red de confiabilidad conocido igualmente como diagrama de bloques o diagrama lógico, la anterior definición puede ser interpretada como un grupo de componentes que deben fallar para interrumpir todas las trayectorias entre la entrada y la salida. El mínimo subgrupo de cualquier grupo de componentes que causan la falla del sistema es conocido como los cortes mínimos.

*Los cortes mínimos son un conjunto de componentes del sistema que, cuando fallan, causan la falla del sistema, pero cuando cualquier componente del grupo no ha fallado, no causa la falla del sistema.* Esta definición significa que *todos* los componentes de un corte mínimo deben estar en el estado de falla para causar la falla del sistema. Para la aplicación de este método, consideremos el sistema de la figura 2.1 [46].

Figura 2.1 Sistema sin aplicar cortes mínimos



Utilizando la definición dada anteriormente, los cortes mínimos del sistema se muestran en la tabla 2.1

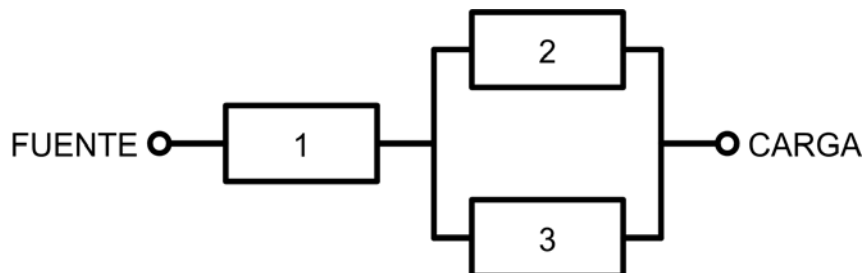
Tabla 2.1 CORTES MÍNIMOS DEL SISTEMA

NÚMERO DE CORTES MÍNIMOS	COMPONENTES DE LOS CORTES
C1	AB
C2	CD
C3	AED
C4	BEC

### 2.3.2 Método de estado permanente

El método de estado permanente puede ser utilizado cuando los componentes son independientes así como para los sistemas que implican modos dependientes de falla y de reparación. Los diversos pasos de esta aproximación se ilustran utilizando un ejemplo simple de un componente en serie con dos componentes paralelos, como es mostrado en la siguiente Figura 2.2

Figura 2.2 Un componente en serie con dos componentes en paralelo



a) Enumerar los estados posibles del sistema. Si se asume que cada componente puede estar en el estado arriba o de funcionamiento (U) o en el estado abajo o falla (D) y que los componentes son independientes, hay ocho estados posibles del sistema. Se numeran estos estados de 1 a 8 en la Figura 2.3, y la descripción de los estados de los componentes se indica en cada estado del sistema.

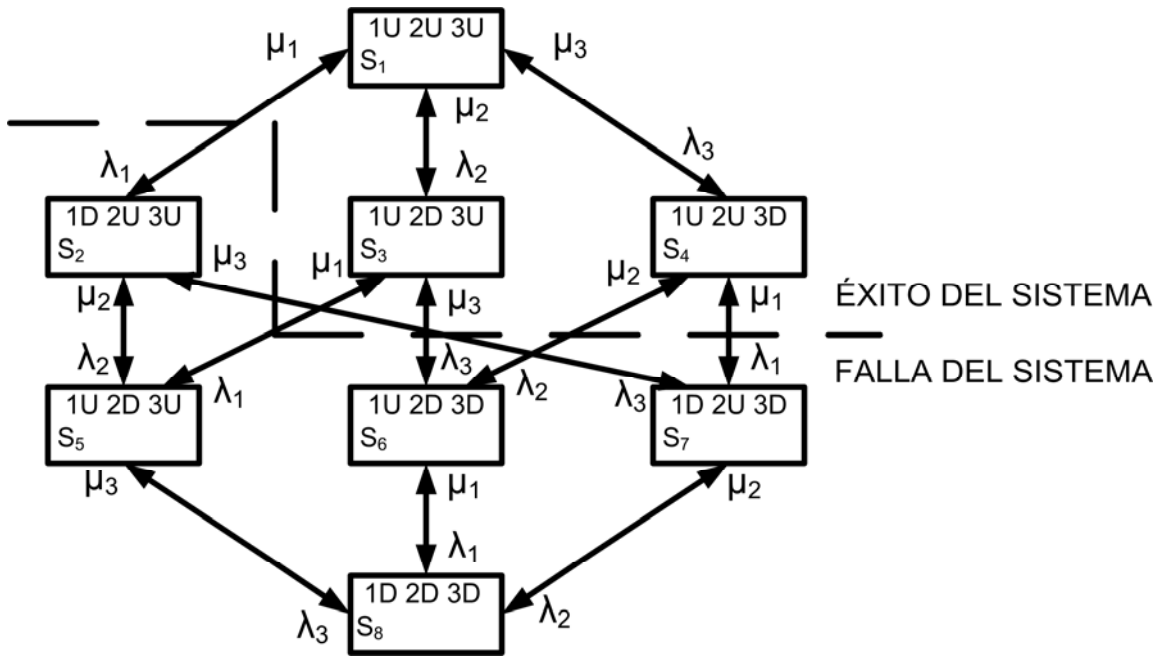
b) Determinar los índices de transición entre estados. El índice de transición de  $s_i$  (es decir, estado  $i$ ) a  $s_j$  es el índice del sistema que pasa de  $s_i$  a  $s_j$ . Por ejemplo, en la Figura 2.3 el sistema puede transitar desde  $s_1$  a  $s_2$  de la falla del componente 1 y la reparación del componente 1, pondrá al sistema nuevamente dentro de  $s_1$ . Por lo tanto, el índice de transición de  $s_1$  a  $s_2$  es  $\lambda_1$  y el índice de transición de  $s_1$  a  $s_2$  es  $\mu_1$ .

c) Determinar las probabilidades de estado. Cuando los componentes se pueden asumir independientes, las probabilidades de estado se pueden encontrar por la regla del producto según lo indicado en la ecuación:  $P(A_1 \cap A_2) = P(A_1) P(A_2)$ . Donde, sin embargo, los eventos  $A_1$  y  $A_2$  son independientes, esto es la ocurrencia de  $A_2$  no afecta a la ocurrencia de  $A_1$ . Donde, sin embargo, está implicada la dependencia estadística, y necesita solucionarse un sistema de ecuaciones simultáneas para obtener las probabilidades de estado.

Aquí se discute solamente el caso independiente y para esto, se dice que la probabilidad de estar en el estado 2 se puede determinar por:

$$P_2 = P_{1d}P_{2u}P_{3u} \tag{2.1}$$

Figura 2.3 Diagrama de transición de estado para el sistema en la Figura 2.2



Donde

$P_{iu}$  es la probabilidad del componente  $i$  estando en “up”, estado de operación

$$= \frac{d_i}{(d_i + r_i)} \quad (2.2)$$

$$= \frac{\mu_i}{(\lambda_i + \mu_i)} \quad (2.3)$$

y

$P_{id}$  es la probabilidad del componente  $i$  estando en “down”, estado de falla

$$= \frac{r_i}{(d_i + r_i)} \quad (2.4)$$

$$= \frac{\lambda_i}{(\lambda_i + \mu_i)} \quad (2.5)$$

d) Determinar las medidas de confiabilidad. Se identifican los estados que contribuyen a la falla, o al éxito, o cualquier otro acontecimiento de interés. Para el sistema mostrado en la Figura 2.2, si los acoplamientos 2 y 3 son completamente redundantes, la falla del sistema puede ocurrir si el componente 1, o los componentes 2 y 3, o si todos los componentes fallan.

### 2.3.3 Método de la probabilidad condicional

Consiste en reducir, de forma secuencial, el sistema en subsistemas que tengan estructuras conectadas en serie-paralelo y recombinar estos subsistemas usando el método de la probabilidad condicional.

El método de la probabilidad condicional es una herramienta útil para la evaluación de la confiabilidad y es utilizada en diversas aplicaciones. Sin embargo, éste puede presentar dificultades al programarse en una computadora digital para la solución de redes generales debido a la inherente dificultad de generalizar la descomposición de la red en estudio [4].

Esta técnica que puede ser utilizada para evaluar la confiabilidad de un sistema complejo consiste en reducir secuencialmente el sistema en subsistemas que tengan estructuras conectadas en serie/paralelo y entonces recombinar estos subsistemas usando el método de la probabilidad condicional.

Esta técnica emplea la ecuación de la probabilidad condicional.

$$P(A) = \sum_{i=1}^N P(A / B_i) \cdot P(B_i) \quad (2.6)$$

$P(\text{éxito o falla del sistema}) = P(\text{éxito o falla del sistema si el componente X está bien})$   
 $* P(X \text{ esté bien}) + P(\text{éxito o falla del sistema si el componente X está mal}) * P(X \text{ esté mal})$

La aplicación de esta técnica se ilustra mediante los siguientes ejemplos:

Considere de nuevo el sistema de la figura 2.4 (b); en la cual el éxito requiere que al menos una de las trayectorias, AB, BC, AED, BEC esté bien. Evaluar una expresión general para el éxito del sistema y la confiabilidad del mismo si cada componente tiene una confiabilidad de 0.99.

Para aplicar el método de la probabilidad condicional es necesario primeramente escoger el componente X el cual será considerado “bien” o considerado “mal”. Pueden escogerse cualquiera de los componentes desde A hasta E sin embargo, la “correcta” selección del

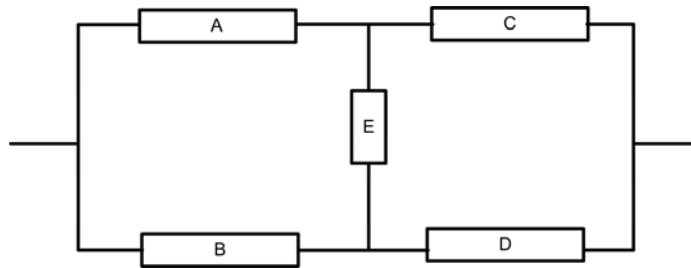
-

componente puede simplificar enormemente la solución. El mejor componente para escoger como X es E para este caso.

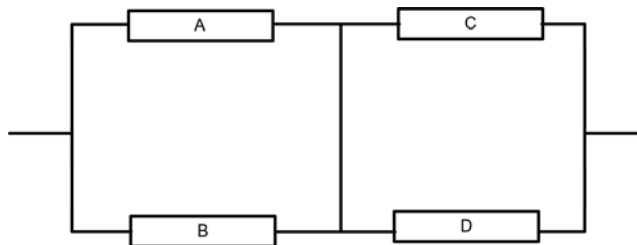
El sistema de la figura se subdivide en dos subsistemas, uno con E considerada bien, que significa que no puede fallar, y el otro con E considerada mal, que significa que siempre está fallado. Esta subdivisión queda de la siguiente manera. Figura 2.4

**Figura 2.4 Subdivisión del sistema o red tipo puente**

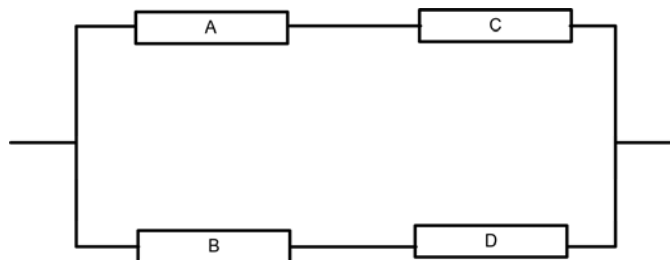
**2.4 a) Sistema E completo**



**2.4 b) Sistema E sin fallar**



**2.4 c) Sistema E fallando**



El sistema original ha sido descompuesto en dos subsistemas cada uno de estos con estructuras simples serie/ paralelo, con E considerada bien, A y B están en paralelo, C y D están en paralelo y las dos ramas paralelas están en serie. Con E considerada mal, A y C están en serie, B y D están en serie y las dos ramas serie están en paralelo.

Estos dos subsistemas son mutuamente exclusivos ya que ninguno puede existir simultáneamente y por tanto ellos pueden ser combinados usando el principio de probabilidad condicional.

En algunos sistemas de ingeniería, uno o más de los subsistemas pueden necesitar subdivisiones subsecuentes antes de obtener una estructura serie/paralelo. Después de crear un grupo de subsistemas en los cuales todos los componentes están conectados en serie y paralelo, éstos pueden ser evaluados usando los principios de sistemas serie/paralelo y la confiabilidad total utilizando la probabilidad condicional.

Para este caso, la confiabilidad total del sistema será:

$$R_s = R_s (\text{sí E esta bien}) R_E + R_s (\text{sí E esta mal}) Q_E \quad (2.7)$$

(a) Condición: DADO QUE E está bien

$$R_s = (1 - Q_A Q_B)(1 - Q_C Q_D) \quad (2.8)$$

(b) Condición: DADO QUE E está mal

$$R_s = 1 - (1 - R_A R_C)(1 - R_B R_D) \quad (2.9)$$

Por lo tanto la confiabilidad del sistema es

$$\begin{aligned} R_s &= (1 - Q_A Q_B)(1 - Q_C Q_D) R_E + (1 - (1 - R_A R_C)(1 - R_B R_D)) Q_E \\ R_s &= R_A R_C + R_B R_D + R_A R_D R_E + R_B R_C R_E - R_A R_B R_C R_D - R_A R_C R_D R_E \\ &\quad - R_A R_B R_C R_E - R_B R_C R_D R_E - R_A R_B R_D R_E + 2 R_A R_B R_C R_D R_E \end{aligned} \quad (2.10)$$

Si consideramos  $R_A = R_B = R_C = R_D = R_E = R$ , Tenemos:

$$R_s = 2R^2 + 2R^3 - 2R^4 + 2R^5 \quad (2.11)$$

Y, si  $R=0.99$ , se obtiene:

$$R_s = 0.99979805$$

-



El método de probabilidad condicional es una herramienta útil para evaluación de la confiabilidad y es utilizada en diversas aplicaciones. Sin embargo, éste puede presentar dificultades para programarse en una computadora digital en la solución de redes generales debido a la inherente dificultad de generalizar la descomposición.

#### 2.3.4 Método de reducción de la red

El método de reducción de la red es útil para los sistemas que consisten de subsistemas en series y paralelos. Este método consiste en el reducir sucesivamente las estructuras en serie y paralelo por componentes equivalentes. El conocimiento de las formulas para la reducción en serie y paralelo es esencial para el uso de esta técnica.

### 2.4 CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Como se menciona anteriormente, si se evalúa la confiabilidad del sistema eléctrico por subsistema, será posible observar la incidencia de cada parte del sistema en el resultado global y con ello, decidir dónde se requiere dedicar una atención prioritaria.

En un sistema eléctrico, en forma general, los subsistemas que pueden ser considerados son: GENERACIÓN, vienen siendo la central generadora, TRANSMISIÓN, el cual incluye las subestaciones de potencia y la red de subtransmisión y DISTRIBUCIÓN, donde se incluye la distribución primaria únicamente.

Cada subsistema tiene un “*grado de confiabilidad natural*”, el cual depende de sus características y del comportamiento de cada uno de sus componentes, así como de su arquitectura.

En este trabajo nos enfocaremos más al área de distribución, por razones que veremos mas adelante.

Creemos que el análisis de confiabilidad de distribución debe examinarse como un tópico diferente y como una parte del análisis de confiabilidad de generación y transmisión, porque las responsabilidades de distribución transmisión y generación generalmente serán divididas en las compañías eléctricas y por que la confiabilidad de distribución necesita diferentes datos y metodología a los empleados en el análisis de confiabilidad en generación y transmisión.

Desde hace mucho tiempo la confiabilidad en distribución, no se le a dado gran importancia ni a capturado la imaginación de los científicos e ingenieros como la hace la confiabilidad

de la generación. En parte esto se debe a que las consecuencias de una falla en distribución es localizable y reparable y además afecta solo a una pequeña parte de los usuarios y nunca

-

va a causar una ruina financiera o política como es el caso cuando ocurre una falla en generación.

Sin embargo en años recientes ha resurgido el interés en el análisis de la confiabilidad en distribución y esto se debe a que las fallas en distribución, dominan las causas de falta de energía de los usuarios; como se observa en la figura 2.5

Figura 2.5 Subsistemas Eléctricos Generación- transmisión- distribución

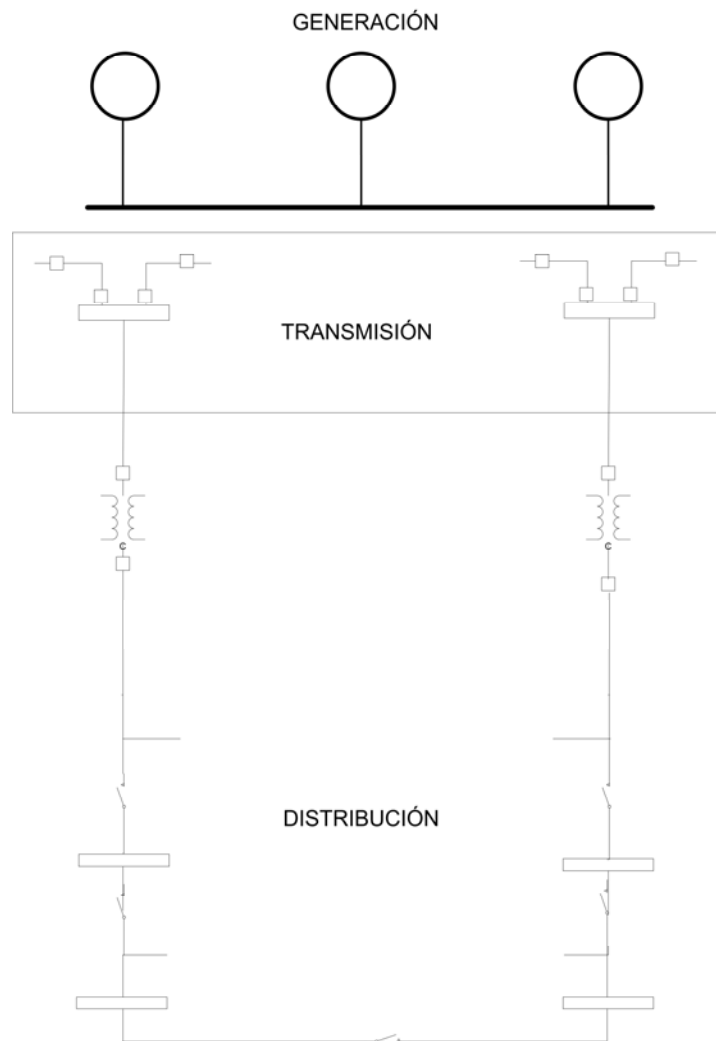
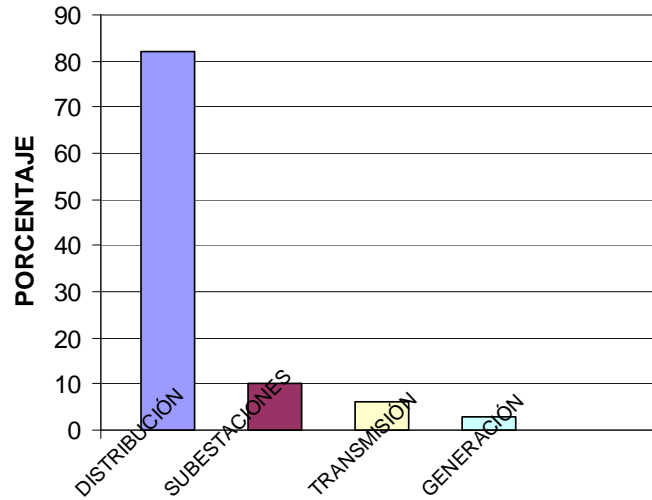


Figura 2.6 Porcentaje de fallas en los diferentes subsistemas eléctricos.



En la figura 2.6 se pueden apreciar los porcentajes de fallas, según el bloque en donde ocurren según la división de la C.F.E. (Comisión Federal de Electricidad).

La configuración del sistema de distribución y su filosofía de operación afecta la confiabilidad, más aún los gastos de operación y mantenimiento doblan a los de transmisión, esto no nos sorprende, el cambio de necesidades y de expectativas respecto a la confiabilidad del suministro, en una era de oficinas en casa, computadoras personales, equipo electrónico, fabricación de chips, etc.

Además el análisis de la confiabilidad en la distribución puede ayudar a mejorar la confiabilidad del sistema, dirigiendo los gastos y evitando la sobre inversión.

El análisis de confiabilidad en el sistema de generación de potencia tiene objetivos simples, como podría ser, el tratar de minimizar lo más posible los costos de producción. En el caso de una planta nuclear los objetivos están enfocados a la operación segura.

En contraste el análisis de confiabilidad en distribución es más complejo y ambiguo en su intento, aunque el objetivo del análisis está normalmente relacionado con la confiabilidad del sistema para suministrar la energía eléctrica a la carga, la definición precisa del objetivo no es tan simple.

Una primera cuestión básica que debemos tomar en cuenta, es si nuestro estudio esta enfocado a la confiabilidad de un solo usuario o vamos a considerar a todo el sistema. Aunque los grados de confiabilidad pueden ser calculados en ambos casos, la medición más apropiada y la mejor metodología, puede cambiar según sea el caso.

Aunque las medidas de la confiabilidad del sistema en forma general, pueden ser satisfactorias, no necesariamente significa que en lo que se refiere a un usuario específico sea satisfactorio o lo contrario.

Al hacer el análisis de confiabilidad en distribución, nos damos cuenta que este ofrece varios beneficios. En particular nos permite determinar la confiabilidad, el costo, la identificación de la falla y los factores que mas contribuyen a esta, de una manera lógica y consistente. Tal proceso facilita la comparación de alternativas posibles y protege contra el hacer inversiones o cargos sin una justificación coherente.

Vamos a ahora a ver más allá de estas generalidades para examinar posibles objetivos para el análisis de la confiabilidad en más detalle. Un objetivo puede ser predecir índices de confiabilidad para un suministro de energía a usuarios específicos o para el sistema completo.

Una comparación de estos índices podría indicarnos donde la confiabilidad del suministro de estos usuarios o sistema es adecuada y donde debe hacerse mejoras.

Este análisis simple de la confiabilidad puede entonces extenderse a la identificación de los puntos débiles en el diseño, operación o mantenimiento del sistema de distribución, al identificar las causas dominantes de las fallas y acertar donde son necesarias las mayores mejoras en confiabilidad al menor costo o con pasos simples (podar árboles, reemplazar aisladores rotos, poner tierras faltantes, etc.).

También es posible usar este análisis para predecir algún cambio en cuanto a confiabilidad, que puede resultar de cambios en el diseño, operación y mantenimiento del sistema de distribución. Esto es, el impacto en la confiabilidad y al agregar dispositivos de protección, o implantar un programa de poda, instalar un sistema de localización de rayos para estimar la severidad de las tormentas, la movilización del personal tanto de instalación como de mantenimiento, tomar acciones para reducir el tiempo de restauración después de las fallas, o reemplazar equipo obsoleto y deteriorado, etc. Todo esto puede determinarse, logrando con esto identificar que tan buenos son los efectos de las mejoras.

Los índices de confiabilidad pueden ser usados para valorar los planes de salida, prediciendo la confiabilidad del sistema, y reconfigurándolo para acciones de mantenimiento. Tal análisis puede ayudar a determinar donde el mantenimiento propuesto tiene mayores problemas y desarrollar posibles alternativas.

Se pueden introducir los costos y la economía a la confiabilidad de tres maneras. La primera es identificar que conjunto de cambios y mejoras importantes para los

-

procedimientos de operación y mantenimiento nos permiten alcanzar las metas de confiabilidad predichos al mínimo costo. Puede ser a veces estresante que no esta implicada una correlación entre estos y confiabilidad. Buscamos solamente como mejorar un nivel predicho de confiabilidad a costo mínimo.

Una variación en este tema de integración de costos y confiabilidad es la identificación del conjunto de medidas que resultarían en el, la más grande mejora de confiabilidad para un dado gasto presupuestado. Este asunto es claramente aquel que puede tomarse si una dada suma de presupuesto esta acotado para mejorar la confiabilidad.

El final y mas comprensible modo o manera en la cual integrar confiabilidad y economía es asignar un valor a la confiabilidad (o costo de las fallas) y entonces optimizar el sistema con respecto a la confiabilidad al mismo tiempo que se minimiza el costo total.

El valor de la confiabilidad o costo de la desconfiabilidad y se refleja como el costo sobre la compañía o los usuarios, de las interrupciones.

También se puede apreciar del análisis que no hay soluciones simples y baratas con las cuales mejorar significativamente la confiabilidad.

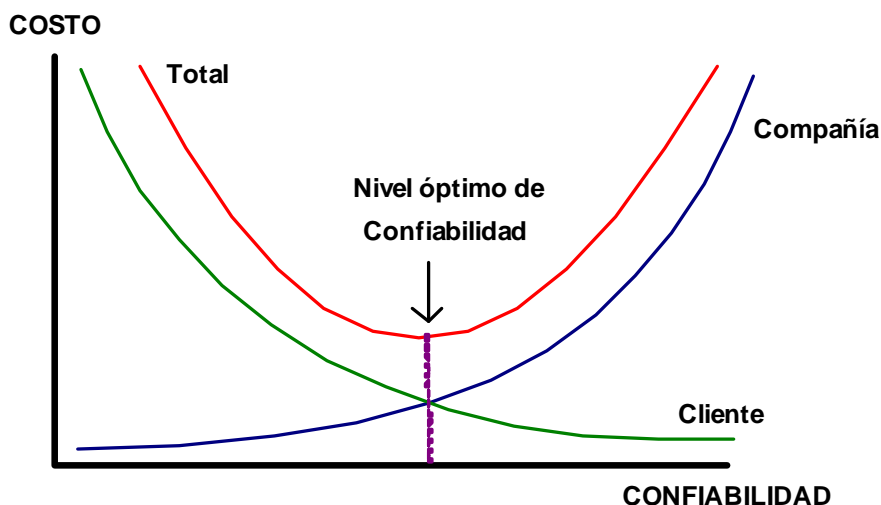
Aun más, no hemos visto de cerca el impacto que en los usuarios tiene la desconfiabilidad. Las fallas en el sistema de distribución resultan de la salida e interrupciones en el suministro de energía a los usuarios.

## **2.5 EL COSTO CONTRA EL VALOR DE LA CONFIABILIDAD**

Los Estudios del dimensionamiento del sistema son parte de la valoración global requerida, los factores económicos de infraestructura alternativa juegan un papel importante en el proceso de toma de decisiones, el método mas sencillo que se puede utilizar para relacionar los factores económicos con la confiabilidad consiste en relacionar los costos de inversión, en este método se evalúa el incremento en la confiabilidad considerando varias alternativas, junto con el costo asociado con cada esquema, se divide este costo entre el incremento de la confiabilidad para dar el costo incremental de confiabilidad. Para poder decir el costo por unidad del incremento de la confiabilidad. Este método es útil para comparar alternativas dado a la confiabilidad de una sección del sistema de transmisión es inadecuado, en este caso el que tiene la alternativa con el costo incremental de confiabilidad mas bajo es el mas efectivo en términos de costo, aun hay un espacio grande entre comparar alternativas y tomar grandes decisiones de inversión de capital utilizando técnicas determinísticas. La debilidad de este método es que no se relaciona con la tasa de recuperación de la inversión o con el beneficio real al consumidor, la utilidad y la sociedad. Para una valoración consistente de factores económicos y la confiabilidad, aunque solo la conformidad, se necesita comparar el costo de la confiabilidad (es decir el costo de inversión necesario para tener un cierto nivel de conformidad con el valor de la confiabilidad,) es decir el beneficio derivado por la empresa suministradora al consumidor y a la sociedad. Un paso en esta

dirección se puede lograr al poner un nivel de costo incremental el cual se cree aceptable por los consumidores, esquemas que tengan un costo menor a este nivel se considera aceptable, esquemas que tengan un costo mayor son rechazados, una solución completa necesita un conocimiento detallado del valor de conformidad este tipo de valoración económica, es fundamental e importante en el área de la ingeniería y se puede hacer este tipo de evaluación a tres niveles jerárquicos, una meta a futuro debería ser extender esta comparación de conformidad dentro de la misma estructura jerárquica para incluir seguridad, por lo tanto llegara a valores confiabilidad-valor y confiabilidad-costo. La extensión del análisis cuantitativo de la confiabilidad a la evaluación del valor de servicio parece sencillo, pero hay mucho potencial para la misma aplicación, el concepto básico es relativamente sencillo y se puede ilustrar utilizando las curvas de costo-confiability, figura 2.7 aquí se muestra que los costos de utilidad generalmente incrementarían cuando se proporciona a los consumidores un servicio de mayor confiabilidad, de otro modo los costos a los consumidores por interrupciones decrecen, cuando la confiabilidad incrementa, el costo total para la sociedad es la suma de estos dos costos individuales, este costo total tiene un punto mínimo en el cual el nivel óptimo de confiabilidad se logra. Ha habido muchos estudios en la materia de interrupción y costos por salida de servicio, estos análisis muestran que aunque las tendencias son parecidas en casi todos los casos los costos varían en una amplia gama, y depende de el país a analizar y el tipo de consumidor, es obvio entonces que es necesario hacer investigación acerca de los costos por interrupción en sistemas de transmisión y distribución, estas investigaciones deberían incluir tanto los costos directos como los indirectos que se asocian con la pérdida de suministro de energía [43,45].

Figura 2.7 Curvas de relación costo- confiabilidad.



## 2.6 EVALUACIÓN DEL VALOR DE LA CONFIABILIDAD

La función básica de un sistema de energía es satisfacer la carga y requerimientos energéticos de la forma más económica posible, con un nivel de razonable de confiabilidad, continuidad y calidad. El suministro de energía eléctrica a un relativo bajo costo y un nivel de confiabilidad relativamente alto, son dos aspectos que generalmente se encuentran en conflicto directo y causa problemas a los administradores de sistemas de potencia, planificadores y operadores de estos sistemas, con un sinfín de problemas, las empresas suministradoras de energía también enfrentan mas incertidumbre debido a los límites o restricciones ambientales, sociales políticos y económicos, cuando están planeando y operando sus sistemas, por lo tanto hay mas exigencia para justificar extensiones y nuevas facilidades, y mas énfasis sobre la optimización de la confiabilidad y costos de los sistemas. Al momento de aplicar capital y recursos operativos, es el costo de confiabilidad y el valor de la confiabilidad, la capacidad de evaluar los costos asociados con un servicio confiable, esta establecido y aceptado; en contraste la habilidad de evaluar el valor de un servicio confiable no esta bien establecido y se necesita mucho trabajo para establecer metodologías que sean 100% aceptables, establecer el valor de la confiabilidad de un servicio es una tarea difícil y subjetiva, porque la elaboración directa no parece factible en estos tiempos, una alternativa practica que esta siendo utilizada ampliamente consiste en evaluar los impactos y las perdidas económicas incurridas en los clientes por fallas en el suministro de energía eléctrica, los costos de interrupción a los clientes da un elemento valioso para el valor actual de la confiabilidad del suministro de energía [61,63].

## 2.7 EVALUACIÓN EXPLICITA E IMPLICITA DE LA CONFIABILIDAD

El problema general de plantación en un sistema de suministro de energía eléctrica, consiste tradicionalmente en comparar varias alternativas para el desarrollo del sistema, las decisiones se toman en base al costo del sistema hay dos métodos fundamentales para calcular el costo, el primero es uno que se ha usado por muchos años y se puede decir que es bastante confiable en los sistemas para consumidores en países desarrollados, en este método la inversión en el sistema esta dado por un (Criterio) método determinístico o por índices cuantitativos de confiabilidad fijos, seleccionado con base a la experiencia y juicio, el costo capital de la infraestructura propuesta mas el costo de operación y mantenimiento están comparado con el supuesto de cada alternativa, da un mismo valor de confiabilidad, basado en la utilización de técnicas probalísticas y determinísticas. Este método implica que un costo socioeconómico implícito esta asociado con la selección de criterio de confiabilidad, por lo tanto los criterios determinísticos o probabilísticos adoptados por alguna empresa suministradora de energía, están basados en la necesidad publica y afectados por políticas económicas o regulatorias, que puede incluir el reconocimiento de los costos socioeconómicos, por lo tanto la utilización de tales criterios debe reflejar el balance optimo entre el costo de alcanzar el nivel de confiabilidad requerido y los beneficios a la sociedad.

El segundo método conocido como la técnica de costos explícitos incorpora confiabilidad en el proceso de costeo por medio de comparar los costos globales incluyendo los costos

-

sociales causados por la falta de confiabilidad, en ambos métodos los costos son los involucrados por la empresa en cada periodo de tiempo considerado, utilizando el método de valor presente. El método de costos explícitos utiliza medidas objetivas y subjetivas de pérdidas económicas de los clientes originadas por fallas en el suministro de energía eléctrica, el loee a veces expresado como la energía esperada no suministrada, normalmente se usa como el índice para obtener la desconfiability del sistema y el valor de confiabilidad, el costo unitario de las pérdidas por la energía no suministrada es un parámetro compuesto, formado por los diferentes tipos de clientes afectados una interrupción de suministro dado, se ha investigado mucho buscando procedimientos para asesorar sobre pérdidas económicas a los clientes, causadas por fallas en el suministro actualmente se puede encontrar literatura que aborda el tema.

El método de costos explícitos ese puede emplear en la valoración del valor de la confiabilidad para obtener datos valiosos de dos formas distintas. Se puede utilizar para cuantificar la necesidad fundamental de la utilización de energía eléctrica con un valor aceptable de confiabilidad a los tres niveles jerárquicos, también se puede utilizar de una manera mas practica y directa en una amplia gama de procesos de toma de decisiones, como se observa en la figura 2.8 el costo de utilidad incluye la inversión de capital y los incrementos de mantenimiento y operación cuando el nivel de confiabilidad incrementa, las pérdidas socioeconómicas que impactan directamente en los clientes bajan cuando la confiabilidad incrementa, el costo total social es la suma de los costos de la empresa suministradora y los costos del los clientes, el nivel optimo de confiabilidad ocurrirá cuando el costo total sea mínimo [43,45].

## **2.8 EVALUACIÓN DEL COSTO POR FALLA DE SUMINISTRO PARA EL CLIENTE**

Se han utilizado varios métodos para evaluar los impactos en los clientes por las interrupciones en el servicio de energía eléctrica, estos métodos se pueden agrupar dependiendo el método metodológico utilizado en tres amplias categorías, varias evaluaciones analíticas indirectas, estudios de casos de cortes de servicio y entrevistas y cuestionarios con clientes, ningún método ha sido adoptado universalmente. Las empresas suministradoras favorecen las encuestas a clientes como medida para determinar información específica para sus propuestas, un paso preliminar para determinar el costo por fallas es entender la naturaleza y variedad de impactos al cliente como resultado de cortes de servicio, los impactos se pueden clasificar como directos o indirectos económicos u otros, por ejemplo sociales, a corto o largo plazo; impactos directos son los que resultan directamente por la falta de suministro; los impactos indirectos resultan de la respuesta de una interrupción, entonces en los impactos económicos directos se incluye producción perdida, recursos inactivos pero pagados; ejemplo: materia prima, mano de obra, los costos de reemprender un proceso, merma de materias primas o alimentos, daños a equipo, costos directamente asociados con salud y seguridad pública y costos de la empresa asociados con la interrupción. Los impactos directos sociales incluyen inconveniencia por falta de transportación, la pérdida de tiempo o tiempo muerto, incomodidad por la temperatura en edificios y miedo o heridas personales.

-



Las pérdidas indirectas normalmente son consecuencia y puede ser difíciles categorizarlas como sociales o económicas, ejemplo de tales costos puede ser una protesta civil ante un corte por un largo periodo de tiempo, o por la falla de un dispositivo de seguridad industrial en alguna planta industrial o cuando se necesita evacuar el área colindante, la diferencia final entre corto y largo plazo depende de la inmediatez de la consecuencia, específicamente los impactos de largo plazo son frecuentemente identificados como respuestas adaptivas o mitigación, hechos para reducir o evitar costos por cortes o fallas en el futuro, la instalación de nobreaks, equipo de regulación, cogeneración, generadores de emergencia entrarían en esta categoría, también sería la reubicación de plantas industriales a una zona con mayor confiabilidad en el servicio de suministro eléctrico, en general el costo de interrupción desde la perspectiva del cliente se relaciona con la severidad de la consecuencia de las actividades que se interrumpen, dependen del suministro eléctrico. Entorno a esta interdependencia, esta en función de las características del cliente y de la interrupción. Las características del cliente incluye el tipo de consumidor, la naturaleza de sus actividades el tamaño de su operación y otros datos demográficos, demanda y requerimientos de energía, etc.

Características de interrupción incluye la duración, la frecuencia y la hora de ocurrencia de dichas interrupciones, si una interrupción es completa o parcial, si hay algún aviso del corte o de la duración por parte de la empresa suministradora y si el área afectada por el corte es el autorizado o mas grande, finalmente el impacto del corte es parcialmente dependiente de la actitud y de que tan precavidos son los clientes [43,45].

## 2.9 MÉTODOS BÁSICOS DE EVALUACIÓN

Muchos de los métodos usados para evaluar los costos por interrupción, se pueden categorizar en general como métodos analíticos indirectos, los cuales infieren valores del costo de interrupción de índices o variables asociados, ejemplos de tales métodos de sustitución incluyen los siguientes: 1.- las tarifas de suministro de energía eléctrica se usan para derivar el valor de la confiabilidad del servicio, el presupuesto mínimo de la disponibilidad del cliente para pagar esta basada en las tarifas del servicio, y el máximo se basa en el costo del equipo de emergencia para la generación de energía eléctrica.

2.- El valor de la producción perdida se determina a razón de tomar el producto bruto neto anual por el total del consumo eléctrico, en términos monetarios por kilovatio-hora y atribuyendo a él, el valor de la confiabilidad del servicio, otro método de valor agregado se ha utilizado para desarrollar un modelo analítico, el cual con ajustes apropiados se puede aplicar a diferentes categorías de clientes, este método usa datos detallados y específicos como: datos de ventas, datos de valor agregado, datos de empleados y muchas supuestas interrelaciones de consumo promedio, precio y elasticidad de precio.

3.- El valor del tiempo perdido basado en los SUELDOS de los clientes, se ha utilizado en varias evaluaciones el costo de interrupción al suministro residencial, este se basa de la noción que los consumidores toman decisiones sobre las cantidades óptimas de ocio y trabajo, y que los ingresos son iguales. Algunas derivaciones son basadas en estimaciones,

mini encuestas o en pláticas y se supone que incluye pérdidas actuales, actividades caseras y tiempos ociosos, otros hacen supuestos para simplificar y basan sus resultados principalmente en sus tiempos de ocio perdido.

4.- las tasas de depreciación por hora de todos los electrodomésticos no disponibles por causa de un corte en el suministro de energía, también se ha utilizado como la base de costos de corte en zonas residenciales.

Las ventajas de estos y otros métodos parecidos es que son razonablemente fáciles de aplicar y utilizan datos que son disponibles o bien fáciles de obtener y por lo tanto resulta económico implementarlos, sus desventajas es que la mayoría son hechos basados en supuestos bastante limitantes, la mayoría genera resultados globales mas que específicos y por lo tanto no muestra variaciones de costo entre parámetros específicos como los necesitan las empresas generadoras, por lo tanto la utilidad de los resultados para las empresas generadoras por las propuestas de plantación, esta bastante reducida.

Otra categoría de evaluación de costos por cortes o fallas en el suministro consiste en conducir un estudio del caso después de los hechos, corte o apagón específico, este método ha sido limitado a grandes apagones como el de 1977 en New Cork , este estudio intento evaluar los costos de corto plazo tanto directos como indirectos, en los costos directos se incluyeron los costos por perdida de comida, perdidas por sueldos, perdidas por ventas, perdidas por impuestos, etc., en los costos indirectos se incluyeron costos por la emergencia, costos por problemas civiles, vandalismo, robo, etc., y perdidas de los gobiernos y los seguros a causa del desorden social, el estudio también considero una amplia gama de impactos sociales y organizacionales, tales impactos son significativos pero difíciles de evaluar en términos económicos, aunque los datos específicos obtenidos en muchos casos fueron basados en supuestos e incompletos en muchos aspectos, resultaron algunas conclusiones importantes, especialmente que los costos indirectos son mucho mas altos que los costos directos.

La tercer metodología que se ha utilizado para evaluar los costos directos a corto plazo del cliente por interrupción es el de encuestas a los consumidores, en este método se les pide a los clientes evaluar los costos de sus perdidas derivadas por los cortes de servicio, con periodos de duración, frecuencia variable y en diferentes épocas del año y a diferente hora del día; la ventaja de este método es que el cliente es quien se encuentra en la mejor posición para poder evaluar las perdidas , los costos directos son relativamente fáciles de determinar para algunas categorías de clientes, por ejemplo los industriales pero las opiniones de los clientes son importantes cuando se trata de evaluar perdidas que no son tan tangibles, por ejemplo la inconveniencia para otra categoría como la residencial. Otra ventaja es que el método se puede adaptar fácilmente para buscar información específica dependiendo de las necesidades particulares de la empresa generadora, obviamente este método tiene todos los problemas que van asociados con cuestionarios y el costo y esfuerzo es mucho mas alto que utilizar los métodos mencionados anteriormente. A pesar de todo esto, este método es el as favorecido por las empresas suministradoras que necesitan información por interrupciones en el suministro para propósitos de plantación [43,45].

## 2.10 ENCUESTAS DEL COSTO POR INTERRUPCIÓN

### CONSIDERACIONES.

Las encuestas sobre el costo por interrupción normalmente se hacen con objetivos específicos, ejemplo por expansión, mejoras al sistema o para revisión de tarifas; típicamente los clientes están divididos por sectores o categorías, por ejemplo: residencial, industrial, comercial, agrícola etc., para usar herramientas específicas dependiendo la categoría del cliente. El sistema de clasificación industrial estándar para la identificación de clientes es comúnmente utilizado debido a que es ampliamente aceptada por la industria y el gobierno, recientemente ha sido tomado también por las compañías suministradoras por otras razones. El desarrollo de instrumentos de medición para cada uno de los sectores de clientes es un paso importante en el proceso, es necesario comprender las problemáticas que se pueden encontrar al realizar encuestas para la preparación de los cuestionarios y procedimientos, por lo tanto la selección del tamaño de la muestra y el diseño de cuestionarios que no traten de inducir respuestas, y equilibrando el tamaño y el contenido del cuestionario para asegurar respuestas satisfactoria. El diseño de cuestionarios debe estar fundamentado en una base teórica clara y con objetivos claros [43,45].

## 2.11 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE COSTOS

La consideración mas importante en el diseño de un cuestionario es la elección de la metodología para evaluar el costo de la interrupción, debido a que el objetivo primario de la encuesta es la obtención de tal costo, es en esta área donde hay variaciones mas grandes, si uno acepta que los métodos analíticos indirectos son inadecuados y que el cliente es la mejor fuente de información deseada el problema aun existe, y es en manera se solicita la información al cliente. Parece que hay congruencia en que algunos métodos son mas aptos que otros para sectores particulares, pero no hay un acuerdo universal de cuales son estos métodos, el mas obvio es solicitar directamente al cliente sus costos originados por la interrupción del servicio en diferentes condiciones de corte de suministro, se puede guiar al cliente en que debe y que no debe incluir en sus estimación de costo, para que el resultado no sea ambiguo. Este método da resultados consistentes y razonables en tales situaciones donde las perdidas son tangibles y fácilmente identificables y cuantificables. Investigadores independientes han derivado evaluaciones que son muy parecido en magnitud. El método es apto para el sector industrial, la mayoría de grandes clientes y para el sector comercial, por ejemplo tiendas de menudeo y servicios; también se ha utilizado para grandes instituciones y edificios con oficinas. Su mayor debilidad esta en donde los impactos tienden a ser menos tangibles y la pérdida económica no es tan fácil de identificar. Otro método consiste en preguntar a los clientes cuanto estarían dispuestos a pagar para evitar interrupciones en el servicio, e inversamente que cantidad aceptan pagar, con el entendimiento de que habrán interrupciones en el suministro de energía, la base de este método es la disponibilidad del pago incremental, constituye una evaluación de los

incrementos o decrementos marginales de la confiabilidad. La teoría sugiere que las cantidades por la disponibilidad de pagar debe ser casi igual a las valoraciones de disponibilidad para aceptar las interrupciones, pero las valoraciones actuales muestra consistentemente que la disponibilidad para pagar es menor que la disponibilidad para aceptar los cortes de energía. A este resultado apoya al argumento anterior que dice que el suministro de electricidad y su confiabilidad no actúa como un mercado normal, aunque otros factores pueden estar presentes. A pesar de todo, las valoraciones basadas en la disponibilidad de los clientes para pagar más o de aceptar las interrupciones son medidas validas, posiblemente como limites, si las limitaciones son aceptadas. El tercer método consiste en la valoración indirecta del valor, si la valoración directa no es posible el cliente puede escoger alternativas, se pueden utilizar respuestas obtenidas por métodos indirectos para obtener un valor, el propósito es encontrar un método apto para reducir los problemas asociados al antagonismo relacionado a las tarifas y la falta de experiencia en evaluar el valor de la confiabilidad; Se logra a través de una serie de preguntas que el cliente puede relacionar en el contexto de su experiencia, una limitación es la posibilidad de que el valor derivado no es un estimado del valor, pero alguna otra entidad asociada con el método indirecto. Algunas de las formas posibles de usar o que se deben de utilizar son: 1.- el costo de pólizas de seguro hipotéticos para compensar los efectos de la interrupción y la recompensa pagable por el reclamo de un corte. 2.- La opinión de los clientes sobre los costos por interrupción de suministro, que las empresas suministradoras deberían usar en su planeación. 3.- Las predicciones de los clientes en cuanto a que medidas preventivas tomar por si hubiesen interrupciones recurrentes. 4.- La selección de los clientes de opciones interrumpibles con tarifas reducidas, los cuales en efecto son altas proyecciones de su disponibilidad de aceptar tarifas menores a cambio de una reducción de la confiabilidad. 5.- los clientes ponen en orden jerárquico un numero de alternativas, con cifras de confiabilidad y tarifa, para q el escoja el mas apto para sus necesidades. Se debe notar que varias de las opciones usa una forma de sustitución en servicios o en términos monetarios, aunque el concepto de sustitución es parecido a lo discutido anteriormente la diferencia es que la sustitución es razonablemente directo y lo mas importante es que la selección se hace por el cliente y no por el analista, un asunto preocupante para la mayoría de los métodos mencionados es la pregunta de que tan confiable es la relación entre las acciones de los clientes y su predicción de las acciones, o dicho de otra forma, es que tan valida es la percepción del cliente. Quizás la cosa mas fuerte en este asunto es que lo que se busca es la percepción del cliente; y hay mercados en que la selecciones de los clientes están más basados en su percepción que en evidencias. Un comentario hasta este momento es que la mayoría de los métodos mencionados intentan establecer un mercado, o al menos un mercado inferido para la confiabilidad. Se cree que las respuestas del mercado ante pequeñas variaciones alrededor del valor de la confiabilidad actual son razonables aunque obviamente solo pueden ser tan precisos como una sustitución particular puede lograr; intentar variaciones grandes del nivel actual quizás no de resultados significativos, mas que nada porque un nivel de confianza en el servicio puede o no responder como un mercado verdadero como se comento anteriormente, adicionalmente la percepción del cliente es dudosa en situaciones extremas debido a la falta de experiencia y la gama útil de la mayoría de las sustituciones es cuestionable.

-

Se ha utilizado mucho el método de acciones reparativas porque al parecer da resultados razonables, este método se ha utilizado en encuestas para áreas residenciales y agrícolas en Canadá e Inglaterra en encuestas para áreas residenciales, con este método se le pregunta al consumidor una lista de acciones que uno puede hacer para prepararse para las interrupciones recurrentes y mitigar los efectos de las mismas; una cifra razonable del costo para comprar cosas y aplicar cada una de las medidas se asigna y se incluye en la lista, la lista cubre desde no hacer absolutamente nada hasta comprar un generador para cubrir toda la carga eléctrica. Los respuestas indican las acciones que ellos tomarían ante diferentes escenarios de fallas o cortes en el suministro de energía, durante el análisis los costos de las acciones escogidas se utilizan como una estimación de los gastos que los consumidores están dispuestos a hacer por su propia cuenta para prevenir o nulificar los efectos de las interrupciones en el servicio, esto representa un estimado indirecto del valor de la confiabilidad, los gastos derivados son la percepción del usuario del valor de evitar las consecuencias de la interrupción. Las entrevistas durante el desarrollo del cuestionario son esenciales para asegurar que los entrevistados aceptan el método global y que considera la elección de acciones adecuadas y que los costos citados son razonables [43,45].

## **2.12. EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

A continuación se describirá como evaluar el costo de la interrupción al cliente a través de la función de daño al consumidor, dato que puede ser utilizado para representar el valor de la confiabilidad del sistema eléctrico de potencia.

### **2.12.1 Funciones de daño al consumidor**

#### **Conceptos**

Una manera conveniente de mostrar los costos de interrupción al consumidor es en forma de las funciones de daño al cliente (FDC) [62, 63,70] el FDC se puede determinar por un tipo de cliente dado y agregado, para producir funciones de daño al consumidor para sectores de los diferentes tipos de clientes de un sistema. La tabla siguiente muestra una serie de FDC para varios sectores expresada en Kilowatts de demanda pico anual, estos valores se obtuvieron de una encuesta canadiense [49,50] y valores similares fueron obtenidos en una encuesta en el Reino Unido [51,52].

**Tabla 2.2 Función de daño a los diferentes tipos de clientes**  
 (Costo de interrupción estimado del sector (FDC) expresado en pico de demanda anual en \$KW).

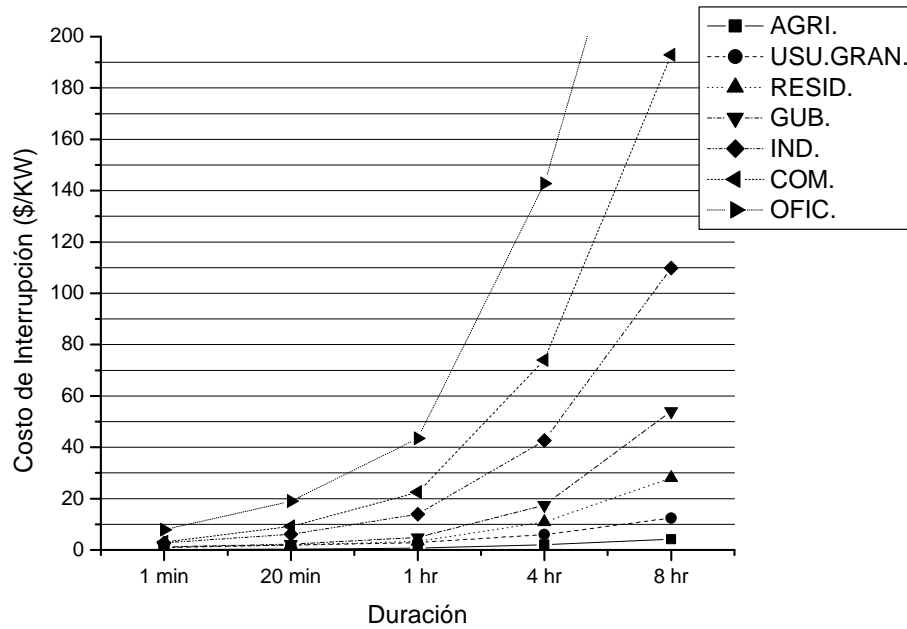
Duración de la interrupción.

<b>Usuario del sector</b>	<b>1 minuto</b>	<b>20 minutos</b>	<b>1 hora</b>	<b>4 horas</b>	<b>8 horas</b>
<b>Usuarios grandes</b>	1.005	1.508	2.225	3.968	8.240
<b>Industriales</b>	1.625	3.868	9.085	25.163	55.808
<b>Comerciales</b>	0.381	2.969	8.552	31.317	83.008
<b>Agricultores</b>	0.060	0.343	0.649	2.064	4.120
<b>Residenciales</b>	0.001	0.093	0.482	4.914	15.690
<b>Gubernamentales</b>	0.044	0.369	1.492	6.558	26.040
<b>Oficinas</b>	4.778	9.878	21.065	68.830	119.160

El FDC sectorial se puede agregar a cualquier punto de carga en el sistema para producir una función de daño al cliente compuesta, a este punto de carga, se supone en este caso que todos los cortes de carga serán distribuidos en todos los clientes del sector, el peso que se usa para calcular la función de daño normalmente se hace en términos de la energía por unidad por cada sector, la demanda pico por unidad a veces se utiliza para interrupciones de corta duración.

La Tabla 2.2 muestra la función de daño al sector de los consumidores (en \$/KW) para las siete categorías de clientes, basado en pruebas a los clientes de Canadá. La Figura 2.8 proporciona una grafica que representa a la FDSC [44].

Figura 2.8 Costos estimados de la interrupción al sector de consumidores



### 2.12.2 Función compuesta de daño a1 consumidor (FCDC)

Una FCDC es la medida del costo de la interrupción como una función de la duración de la interrupción para el cliente mixto como un bus, área de servicio, o el sistema entero. Debe conocerse al cliente mixto en términos de energía consumida o porcentajes de la demanda máxima, así pueden ser calculados proporcionalmente los costos de interrupción de cada una de las varias categorías de usuarios. En el caso de las duraciones más cortas que 0.5 hr, el factor de carga es el porcentaje de la carga pico anual. En el caso de duraciones más grande que 0.5 hr, el factor de carga es el porcentaje de la energía anual consumida. Los costos de carga son sumados para cada duración de interrupción para dar el costo total por el cliente mixto para esa duración. La Tabla 2.3 muestra una carga mixta en términos de la energía consumida y de la demanda pico. La Tabla 2.4 presenta la función compuesta de daño al consumidor basado en la función de daño al sector de consumidores en la Tabla 2.2 y en la distribución de clientes mixtos en la Tabla 2.3. La Figura 2.9 proporciona una grafica que representa a la FCDC [45].

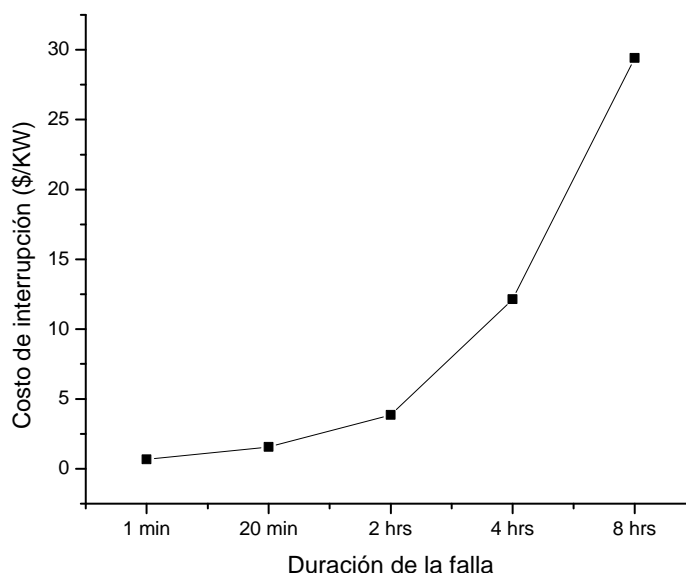
**Tabla 2.3 Distribución de clientes mixtos por energía consumida y demanda pico**

Categoría del Cliente	Energía (%)	Demanda Pico (%)
Agricultura	2.5	4.0
Usuarios grandes	31.0	30.0
Residencial	31.0	34.0
Gubernamental	5.5	6.0
Industrial	19.0	14.0
Comercial	9.0	10.0
Oficina	2.0	2.0

**Tabla 2.4 Función compuesta de daño al consumidor para el cliente mixto**

Duración de la Interrupción	Costo de la Interrupción (\$/KW)
1 min	0.67
20 min	1.56
2 hrs	3.85
4 hrs	12.14
8 hrs	29.41

**Figura 2.9 Función compuesta de daño al consumidor**



El costo de interrupción estimado puede ser utilizado como un sustituto para el valor de la confiabilidad del sistema eléctrico de potencia. En la aplicación de la FDC, deben apreciarse tres puntos. Primero, como con otro dato de confiabilidad, primero es requerido un suficiente número de muestras de clientes para una exactitud razonable. Segundo, las pruebas al cliente deben actualizarse continuamente. Tercero, los costos de interrupción son socioeconómicos/demográfico/geográfico. En otras palabras, la función de daño al consumidor varía para diferentes áreas, regiones y países [43].



# CAPÍTULO III

## MÉTODOS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA

### 3.1 INTRODUCCIÓN

Es muy deseable que al mejorar la confiabilidad en un sistema, se tenga también un beneficio económico, que se refleje directamente en la empresa que esta realizando la inversión que implica el mejorar la confiabilidad de dicho sistema.

El análisis económico es una parte importante para medir la confiabilidad, por lo que el ingeniero en confiabilidad debe familiarizarse con el lenguaje y técnicas del análisis económico [53-55].

En este capítulo se presentan los métodos de evaluación económica tales como, el valor presente neto (VPN), valor anual equivalente (VAE), tasa interna de rendimiento (TIR), relación costo beneficio (RCB), con el uso de los mismos se determina que proyecto es el más rentable entre una gama de diferentes posibles soluciones. Considerando factores importantes como el valor del dinero a través del tiempo y el flujo de liquidez.

### 3.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para la selección de un proyecto se tiene problema de asignación de escasos recursos, incluyendo capital, capacidad de manejo, administración y otros factores . Sin embargo hay muchas formas de satisfacer una demanda eléctrica, como es la construcción de nuevas obras para fortalecer la red, muchos proyectos son propuestos por la necesidad de mejorar la calidad del suministro de energía para alcanzar una mejor confiabilidad. Algunos proyectos son justificados por consideraciones económicas y ambientales. Con la globalización, serán posibles los fondos de inversión en la industria eléctrica para mercados locales y globales, por eso la selección, análisis y evaluación de proyectos están teniendo mayor importancia [56].

#### 3.2.1 Conceptos básicos de evaluación económica

A continuación se definirán algunos conceptos básicos de la evaluación económica [57].

##### 3.2.1.1 Proyecto

Es un plan que pretende dar solución al planteamiento de un problema con la finalidad de resolver una necesidad individual o colectiva. Por tanto, un proyecto se origina como respuesta a una idea que busca dar solución a un problema económico.

### 3.2.1.2 Inversión

Este concepto se define desde varios puntos de vista, sin embargo, se definirá desde la perspectiva económica y financiera:

- **Inversión económica:** considera que la inversión representa la formación o incremento neto de capital, es decir, es la parte del ingreso que se utiliza para obtener un producto y un ingreso futuro, toda vez que dicho ingreso se invierte en bienes económicos destinados a tareas productivas. Ejemplo: la adquisición de transformadores, equipos de medición, etc.
- **Inversión financiera:** considera que la inversión es la colocación en el sistema financiero de los excedentes de ingresos que no son consumidos.

### 3.2.1.3 Proyecto de inversión

Es un plan al que si se le asigna un monto de capital y se le proporciona insumos, se obtendrá un bien o servicio, útil para la satisfacción de necesidades individuales o colectivas.

### 3.2.1.4 Decisiones básicas de un proyecto de inversión

Una decisión de un proyecto de inversión genera una serie de desembolsos y de ingresos de efectivo que al combinarse forman el flujo neto de efectivo del proyecto. Este flujo es la representación monetaria de la utilidad del proyecto, más todas aquellas cantidades que fueron descontadas a la utilidad y que no representaron salidas de fondos o recursos (depreciación y amortización).

### 3.2.1.5 Clasificación de los proyectos de inversión

Aunque cada estudio de un proyecto de inversión es único y distinto a todos los demás, la metodología que se aplica a cada uno de ellos tiene la particularidad de adaptarse a cualquier proyecto. La clasificación en la que se puede aplicar la metodología de la formulación y evaluación de proyectos se puede hacer desde diferentes enfoques, pero solo se mencionarán tres [58].

- Por sector de actividad económica.
- Por su naturaleza.
- Por sus resultados.

### 3.2.2 Evaluación económica y financiera

La reciente tendencia de evaluación en el sector eléctrico, no ha dejado a México fuera de este movimiento, mostrándose entre otras, la necesidad de adecuar la metodología de planificación y evaluación, a las nuevas realidades políticas y económicas.

Debido a la escasez de fondos de inversión, la evaluación económica se vuelve fundamental, ya que la decisión de invertir en un proyecto, significa de una u otra forma perder la oportunidad de invertir en una gama de opciones diferentes.

Antes de comprometerse a una inversión, es necesario un estudio de todas las consideraciones, incluyendo el desempeño financiero y económico en el futuro de un proyecto. La extensión de los detalles de dicho estudio depende del tamaño, costo y complejidad del proyecto. Un estudio que analiza estos aspectos se conoce como estudio de factibilidad, su propósito principal es explorar la solidez del proyecto. El estudio de factibilidad investiga todos los aspectos de relevancia directa o indirecta para el proyecto.

Las evaluaciones financieras y económicas son los principales factores de un estudio de factibilidad. La evaluación financiera analizará principalmente los aspectos monetarios del proyecto, sus remuneraciones y la rentabilidad financiera para los inversionistas. La evaluación económica va más allá de esto e intentará relacionar el proyecto con la economía nacional: sus implicaciones económicas, sociales y ambientales. Los proyectos que se analizan, como la construcción de una línea de transmisión, demandan un estudio completo que además de las consideraciones financieras y de ingeniería, investiguen los impactos económicos, sociales y ambientales que emanan de emprender el proyecto desde el punto de vista económico. Tal estudio es llamado “evaluación económica”.

Es más difícil y elaborado realizar una evaluación económica que un estudio de evaluación financiera. Mientras un estudio financiero puede normalmente ser emprendido por analistas financieros e ingenieros, un estudio de evaluación económica demanda el involucramiento de disciplinas económicas, ambientales, y un análisis que está más allá de los ingenieros, contadores y analistas financieros.

La industria eléctrica es altamente intensiva en capital. Las decisiones como la de construir una central eléctrica, involucra inversiones de cientos de millones de pesos, debido a que intervienen diseñadores, ingenieros, arquitectos, economistas, analistas financieros y ambientalistas, e investigar muchas consideraciones que pueden parecer no estar relacionadas con el proyecto. Las técnicas de la evaluación económica de proyectos son de más importancia debido a los aspectos ambientales.

La mayoría de las decisiones de inversión cotidianas en la industria eléctrica involucran seleccionar la solución de menor costo y la temporización de los proyectos. La solución de menor costo incluye la consideración de todas las alternativas reales capaces de satisfacer los objetivos del proyecto y el costo de estas alternativas.

La evaluación económica de proyectos se sustenta precisamente en el concepto del valor del dinero a través del tiempo, cabe mencionar que esto es válido aún cuando no existiera inflación, un proyecto de inversión puede representarse a través de flujos de efectivo que muestran la serie de reembolso o costos requeridos, así como los ingresos o beneficios generados en cada periodo o año de su vida útil.

### 3.2.2.1 Rentabilidad

Este término es utilizado para reflejar la conveniencia de llevar a cabo una inversión, si es rentable es aceptable y viceversa, tanto en proyectos con fines de lucro, como en proyectos con fines sociales.

Sin embargo, la definición de rentabilidad, se relaciona con dos grandes componentes que son las utilidades o beneficios y las inversiones mismas o costos establecidos.

La rentabilidad se entiende como la búsqueda y obtención de máximas utilidades con respecto a un volumen de inversión dado. La maximización de esta relación aumenta la rentabilidad con respecto al parámetro fijado, esto es, muchos beneficios con pocos desembolsos. La minimización de dicha relación disminuye la rentabilidad.

Así, para que las inversiones resulten rentables deben aumentar los ingresos y/o reducir los costos y deben estar protegidas con respecto a la inflación, obteniendo beneficios por encima de estos y en forma rápida, por lo que también siempre esta aparejado un riesgo.

La rentabilidad se expresa como una tasa de rendimiento generalmente anual, la cual revela las unidades monetarias obtenidas por los desembolsos iniciales. La tasa de rendimiento es equivalente a una tasa de interés, normalmente conocida como Tasa de Rendimiento Mínima Atractiva (TREMA).

Teóricamente existen tasas de rendimiento libres de riesgo, esto es, las que ofrece el mercado de dinero a través de los bancos con un rendimiento fijo, lo único que se tiene que hacer es comprar certificados, bonos o pagares y esperar a que transcurra el tiempo para poder obtener un rendimiento por el capital depositado. Se dice que no hay riesgo, sin embargo, frente a condiciones de inestabilidad económica se presentan dos grandes riesgos, la devaluación y la inflación, por lo que invertir en estas condiciones en los instrumentos bancarios mencionados tiene un gran riesgo que muchos analistas e inversionistas no valoran bien para tomar decisiones.

Suponiendo que existan condiciones de estabilidad económica, entonces la TREMA, tasa de rendimiento de cualquier inversionista que decida realizar una empresa será:

$$\text{TREMA} = i + X_p \quad (3.1)$$

Donde  $i$  es la tasa que otorgaría el banco libre de riesgos, y  $X_p$  ó riesgo, serían los puntos adicionales que el inversionista desea ganar por arriesgar el dinero en un proyecto fuera del banco, que van de 1 a 10 puntos dependiendo del nivel de riesgo o las ganancias que se deseen obtener.

### 3.2.3 El valor del dinero a través del tiempo

Debido a que el dinero puede ganar un cierto interés cuando se invierte durante un cierto periodo, usualmente un año, es muy importante reconocer que un peso que se reciba en el futuro tendrá un valor menor que un peso que se tenga actualmente. Es exactamente esta relación entre el “interés” y “el tiempo”, lo que conduce al concepto del valor del dinero a través del tiempo [59,60].

Por lo tanto, el valor del dinero a través del tiempo significa que cantidades iguales de dinero no tienen el mismo valor si se encuentra en puntos diferentes en el tiempo, y si la tasa de interés es mayor que cero. La cantidad total en porcentaje obtenida de estos dos puntos, es precisamente la tasa de interés  $i$  que se le da al dinero para que valga en términos reales, ya sea en el futuro o en el presente.

Todo lo anterior es importante debido a que la evaluación económica de proyectos se sustenta precisamente en el concepto del valor del dinero a través del tiempo. Cabe destacar que esto es válido aun cuando no existiera inflación. Para el análisis económico que se realiza en esta tesis no se considera la inflación, solo se considera la tasa de interés.

### 3.2.4 Tipos de intereses y tasas de descuento para evaluar el proyecto de inversión

Una de las variables que más influyen en el resultado de la inflación de un proyecto es la tasa de descuento empleada en la actualización de los Flujos Netos de Efectivo (FNE) generados por el proyecto. Es decir, el hecho de utilizar una tasa de descuento inapropiada en la evaluación de un proyecto puede conducir a resultados equivocados, aun cuando las demás variables se hayan proyectado adecuadamente. Definimos la tasa de descuento como la tasa de interés que se usa para encontrar el valor presente de una serie de entradas futuras de efectivo generadas por un proyecto. La importancia de este tema radica en que constituye la interconexión de las dos decisiones financieras básicas de un proyecto de inversión, ya que determina el costo del financiamiento y es el elemento racional que permite aceptar o rechazar alguna propuesta de inversión (decisión de inversión).

El interés puede ser simple o compuesto. La diferencia fundamental entre ambos, radica en que el interés compuesto está devengando un interés sobre el capital y el interés generado anteriormente. Cuando se usa el interés simple, los intereses son únicamente en función del monto inicial, el número de periodos y la tasa de interés.

### 3.2.5 Métodos de evaluación económica de proyectos

Existen varios métodos para realizar la evaluación económica de proyectos de inversión, ya sea Valor Presente Neto (VPN), Tasa Interna de Rendimiento (TIR), o Relación Costo Beneficio (RCB), donde básicamente todos tienen una constante, que es el concepto del valor del dinero a través del tiempo, aunque existan otros métodos que no lo representen, como el caso del método del periodo de recuperación de la inversión. A continuación se darán de forma resumida los principales fundamentos de cada uno de los métodos [43,59,60].

#### 3.2.5.1 Método del período de recuperación (PR)

Es el número de años que una empresa necesita para recuperar su inversión original a partir de los flujos netos de efectivo.

Aunque el período de recuperación es muy fácil de calcular, puede conducir a decisiones erróneas, debido a que este método ignora:

- El hecho de que algunos ingresos se materializan después que transcurre el periodo de recuperación, y
- El hecho de que un peso que se recibe ahora tiene más valor que un peso que se recibe en el futuro.

La formula del método de recuperación es la siguiente:

$$\text{Periodo de recuperación} = \frac{\text{Inversión inicial neta}}{\text{Aumento uniforme en el flujo anual de efectivo}} \quad (3.2)$$

Conforme al método de recuperación, las empresas con frecuencia escogen un periodo de corte. Son aceptables todos aquellos proyectos que tiene un periodo de recuperación menor al de corte. Se rechazan aquellos que tengan un periodo de recuperación más allá del de corte.

Los proyectos con periodos de recuperación más cortos dan a la compañía mayor flexibilidad, por que los fondos para otros proyectos están disponibles más pronto.

Los partidarios del método de recuperación alegan que es una medición práctica (1) cuando no es crucial la precisión en las estimaciones de rentabilidad y se necesita una filtración preliminar de muchas propuestas; y (2) cuando los flujos de efectivo pronosticados para años posteriores son muy inciertos.

A continuación se describen algunas razones que deben considerarse para utilizar el método de periodo de recuperación:

- Cuando una empresa tiene problemas de efectivo, necesariamente debe dar importancia a la pronta recuperación de sus fondos para que éstos puedan aplicarse en otra parte o puedan usarse para satisfacer otras necesidades.
- Los proyectos con periodos de recuperación más rápidos por lo general tienen efectos más favorables a corto plazo, aunque se sacrifica el crecimiento futuro por el ingreso, y en general no se incrementará el valor de la empresa.
- Este método es muy fácil de aplicar, en una empresa donde se toman decisiones de pequeñas de inversión.

### 3.2.5.2 Método del valor anual equivalente (VAE)

Este método consiste en transformar en anualidades equivalentes uniformes todos los ingresos y gastos, incluyendo la inversión inicial en toda la vida útil del proyecto. Si la suma del total de esta anualidad es positiva, significa que los beneficios son mayores que los costos y en consecuencia el proyecto resulta rentable [43] La ecuación 3.3 nos da el VAE.

$$VAE = \sum_{n=0}^n Px \frac{i(1+i)^{n-1}}{(1+i)^n - 1} \quad (3.3)$$

Cabe destacar que este método toma en cuenta el valor del dinero a través del tiempo, ya que incorpora el elemento de la tasa de descuento o actualización  $i$ , que considera el uso alternativo que se pudiera dar a ese dinero, así como el riesgo de realizar dicha inversión  $Px$ , que se expresa en puntos con relación a la tasa  $i$ , por lo regular a esta tasa se le denomina como TREMA (Ecuación 3.1).

Para el caso de que se tengan varios proyectos, o casos de estudio en los cuales se deba seleccionar una y solamente una alternativa (proyectos mutuamente excluyentes), se selecciona aquel que tenga el mayor valor anual equivalente con signo positivo.

En el caso de que todas las alternativas de inversión presenten valores de anualidades equivalentes negativas, no se deberá realizar o seleccionar ningún proyecto.

### 3.2.5.3 Método del valor presente neto (VPN)

El valor presente neto es un método de medición y comparación de costos que ocurren en diferentes puntos en el tiempo. El valor presente neto es basado en el principio fundamental económico que el dinero recibido hoy es más valioso que el dinero recibido mañana, y está calculado basado en una tarifa de descuento,  $i$ .

Este método consiste en transformar todos los gastos y beneficios de un proyecto de inversión, vía tasa de actualización o TREMA, a un determinado año de referencia. La diferencia entre el VPN de los costos y el VPN de los beneficios, es precisamente lo que determina la rentabilidad del proyecto. Es decir, si la diferencia resulta positiva, significa



que los beneficios puestos al VPN a un año de referencia son mayores a los costos que ocasiona el funcionamiento del proyecto, lo que significa que el proyecto es rentable.

El valor presente para un costo  $C$ , en un año  $t$  puede ser calculado como sigue:

$$\text{Valor presente} = C \cdot (1 + i)^{-t} \quad (3.4)$$

El valor presente neto de un proyecto total es calculado sumando los valores presentes de todas las transacciones de efectivo individuales [43]. Este puede incluir ambos costos, los cuales tienen un valor actual negativo, y réditos, que tienen un valor actual positivo.

$$VPN = \sum_{i=1}^m R_i (1 + d)^{-t_{r,i}} - \sum_{j=1}^n C_j (1 + d)^{-t_{c,j}} \quad (3.5)$$

donde:

VPN = Valor presente neto

R = Rédito

C = Costo

$t_{r,i}$  = Año en que el rédito  $i$  es realizado

$t_{c,j}$  = Año en que el costo  $j$  es realizado

Para la realización de la evaluación económica en los proyectos presentados en esta tesis se utilizó la formula 3.7 [43].

$$VPN = -I_0 + \sum_{n=0}^n \frac{P}{(1 + i)^n} \quad (3.6)$$

ó

$$VPN = -I_0 + \frac{P((1 + i)^n - 1)}{i(1 + i)^n} \quad (3.7)$$

donde:

$-I_0$  = inversión inicial

$P$  = Flujo de efectivo

$i$  = Tasa de interés

$n$  = Número de años

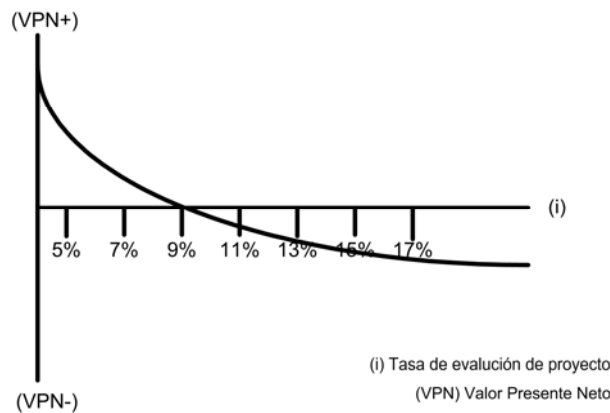
Cuando los flujos de efectivo son una anualidad, se puede resolver por medio del valor presente de una anualidad que se expresa en la ecuación 3.6 y cuando los flujos de efectivo son mixtos será necesario resolverlo con la sumatoria de los flujos de efectivo como se expresa en la ecuación 3.7.



El valor VPN tiene ciertas características que lo hacen adecuado como base de comparación, tales como:

- Considera el valor del dinero en el tiempo de acuerdo al valor de “ $i$ ” escogido.
- Sitúa el valor equivalente de cualquier flujo de efectivo en un punto particular en el tiempo  $t = 0$ .
- Cualquiera que sea la sucesión de ingresos y egresos del flujo de fondos el VPN será único para un valor dado de “ $i$ ”.

**Figura 3.1 Comportamiento del VPN variando la tasa de interés “ $i$ ”**



Para proyectos típicos que demandan desembolsos en su etapa inicial y generan ingresos en lo sucesivo, el VPN para diferentes valores de “ $i$ ” se comporta como aparece en la Figura 3.1, aunque para otro tipo de flujos cabe la posibilidad de tener comportamientos diferentes [60].

De la Figura 3.1 se observa que el VPN de un proyecto decrece conforme se utilizan tasas de descuento “ $i$ ” más altas, debido a que requieren más beneficios y por tanto es cada vez más difícil obtenerlos.

#### 3.2.5.4 Método de la tasa interna de rendimiento (TIR)

En todos los criterios de decisión, se utiliza alguna clase de índice, medida de equivalencia, o base de comparación capaz de resumir las diferencias de importancia que existe entre las alternativas de inversión. Es importante distinguir entre criterio de decisión y una base de comparación. Esta última es un índice que contiene cierta clase de información sobre la serie de ingresos y gastos a que da lugar a una oportunidad de inversión.

Los cálculos del valor actual requieren del uso de tipo de descuento. Los tipos de descuentos son escogidos, pueden tener un profundo impacto cuando son comparados con las soluciones. Esto es porque un alto índice de descuento favorecerá fuertemente las opciones que difieren en las inversiones hasta los últimos años. Esto no sería un problema,

excepto que los valores de los índices de descuento son bastante “suaves”. Esto puede evitarse usando la tasa interna de rendimiento.

La tasa interna de rendimiento (TIR) es definida como el índice de descuento que resulta en un tiempo (índice de rentabilidad ampliamente aceptado) un valor presente neto de cero para un grupo de transacciones (ingresos o egresos) [60]. Dicho de otra manera, La TIR es el índice de descuento el cual hará al valor actual de todos los costos iguales al valor actual de todo el rédito [61], o de otra manera, representa el porcentaje o tasa de interés que se gana sobre el saldo no recuperado de una inversión, en forma tal que al final de la vida del proyecto el saldo no recuperado es igual a cero.

La TIR es calculada iterativamente [43], para comenzar, es escogido un índice de descuento arbitrario, resultando de ello un valor presente neto. Después, el índice de descuento es modificado y un segundo valor presente neto es calculado. El siguiente índice es calculado por una interpolación o extrapolación de esos dos valores y el proceso se repite hasta que se obtiene un valor presente neto de cero (o el más cercano).

$$TIR = i \quad \text{que hace el} \quad VPN = -I_0 + \sum_{n=0}^n \frac{P}{(1+i)^n} = 0 \quad (3.8)$$

ó

$$TIR = -I_0 + \frac{P((1+i)^n - 1)}{i(1+i)^n} = 0 \quad (3.9)$$

### 3.2.5.5 Método de la relación costo beneficio (RCB)

El análisis costo beneficio es una medida de cuánto valor producirá un proyecto concerniente a cuánto cuesta el proyecto [43]. Similar al índice de la tasa interna de rendimiento, un radio costo beneficio considera el hecho de que los beneficios grandes no son atractivos cuando se asocian a grandes costos.

Este método consiste en dividir el VPN de los beneficios o ingresos de un proyecto, entre el VPN de los costos o egresos del mismo (valores absolutos). El criterio de decisión es emprender el proyecto cuando la relación beneficio/costo sea mayor que uno, ya que esto indica que el VPN de los beneficios es mayor al de los costos. Para comparar proyectos desde una perspectiva de B/C, se usa la siguiente formula [43]:

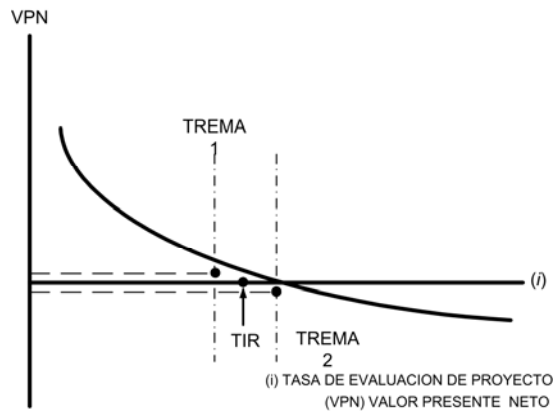
$$RCB = \frac{VPN_{\text{beneficios}}}{VPN_{\text{costos}}} \quad (3.10)$$

Cabe notar que cuando la RCB es igual a uno, el VPN y la anualidad equivalente son cero, en tanto la TIR es igual a TREMA, lo cual indica que el proyecto es rentable, pero se encuentra en su limite.

El análisis costo beneficio es una buena forma para priorizar proyectos y muchas empresas están haciendo el uso de las medidas B/C en sus procesos de presupuesto. Esto es valioso especialmente cuando los presupuestos son limitados y solo un número limitado de proyectos propuestos pueden ser aprobados, en tales situaciones, todos los proyectos pueden ser categorizados basados en sus análisis B/C y pueden ser aprobados en el orden hasta que los límites del presupuesto sean alcanzados.

### 3.2.6 Evaluación de un proyecto individual

Figura 3.2 Valor presente neto y su relación con el método de la TIR



Con el método de la TIR, es necesario calcular la tasa de interés  $i$  que satisface cualquiera de las ecuaciones 3.8 y 3.9 y compararlas con la TREMA. Cuando  $i$ , sea mayor que TREMA, conviene que el proyecto sea emprendido [60].

El método de la TIR y los diferentes métodos de evaluación, son equivalentes es decir, que para un mismo proyecto, con cada uno de estos métodos se llegaría a la misma decisión [59]. Lo anterior puede ser comprendido si se observa la Figura 3.2. A través de esta figura se puede comparar la equivalencia del método de la TIR y el método del VPN.

Por ejemplo, en la Figura 3.2 se puede apreciar que si  $i$  es mayor que la TREMA, entonces el VPN (TREMA 1) es mayor que cero. Por el contrario, si  $i$  es menor que TREMA, entonces el VPN (TREMA 2), es menor que cero. Por consiguiente, es obvio que con ambos métodos se llegaría a la misma decisión de aceptar o rechazar el proyecto [60].

Debido a esto, en esta tesis se utilizan ambos métodos (VPN y TIR) ya que un resultado lleva a otro y se demuestra que el proyecto es realmente aceptable o viceversa, con el método de RCB.

### 3.2.6.1 Evaluación de proyectos mutuamente exclusivos

En la evaluación de proyectos mutuamente exclusivos por el método de la TIR, existen dos principios que se deben tomar en cuenta. Estos son:

- Cada incremento de inversión debe ser justificado, es decir, la alternativa de mayor inversión será la mejor, siempre y cuando la TIR del incremento en la inversión sea mayor que la TREMA.
- Solamente se puede comparar una alternativa de mayor inversión con una de menor inversión, si esta ya ha sido justificada.

El criterio de selección al utilizar este método, es escoger el proyecto de mayor inversión para el cual todos los incrementos de inversión fueron justificados [60]. Debe notarse que cuando el método de la TIR se utiliza al seleccionar el proyecto de mayor TIR, podría conducir a condiciones subóptimas.

La aplicación del criterio de decisión que se recomienda utilizar con el método de la TIR, implica determinar la TIR del incremento de inversión. Esta tasa de rendimiento puede ser encontrada por cualquiera de las siguientes alternativas:

- Encontrar la tasa de interés para la cual los valores anuales equivalentes de las dos alternativas son iguales.
- Encontrar la tasa de interés para la cual los valores presentes de las dos alternativas son iguales.
- Encontrar la tasa de interés para la cual el valor presente del flujo de efectivo neto de la diferencia entre las dos alternativas es igual a cero.

### 3.2.6.2 Proyectos sin tasas de rendimiento

Se debe de reconocer que existen algunos proyectos para los cuales no existe la TIR. El ejemplo común de esta situación se presenta en los casos en que el flujo efectivo esta formado en su totalidad, ya sea por ingresos o egresos.

Generalmente, los casos más comunes de este tipo son los proyectos para los cuales se conocen solamente los egresos. Para este caso, no es posible determinar la TIR de cada proyecto en forma individual [60].

### 3.2.6.3 Proyectos con una sola tasa de rendimiento

Es deseable y fácil analizar las propuestas con una sola TIR, pero para tal caso es necesario conocer las condiciones que se tienen que cumplir para que se garantice la existencia de

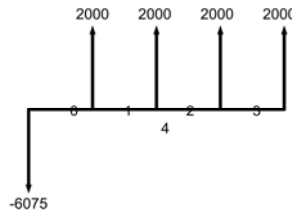
una sola TIR. Se puede decir por norma general, que toda propuesta de inversión cuyos desembolsos ocurran en los primeros periodos de su vida, y los ingresos en los periodos posteriores, y además se cumpla que la suma absoluta de los ingresos sea mayor que la suma absoluta de los egresos, tendrá una función de valor presente similar a la presentada en la Figura 3.2 es decir, la propuesta tendría una sola tasa de rendimiento [60].

### 3.2.6.4 Proyectos con múltiples tasas internas de rendimiento

La mayoría de las propuestas de inversión que son analizadas en una empresa, consisten de un desembolso inicial, o una serie de desembolsos iniciales, seguidos por una serie de ingresos positivos. Para estas situaciones, la existencia de una sola tasa de rendimiento facilita grandemente el procedimiento de toma de decisiones. Sin embargo, no todas las propuestas generan flujos de efectivo de este tipo. Para algunas propuestas, los reembolsos requeridos no están restringidos a los primeros periodos de vida de la inversión. Por consiguiente, es posible que en los flujos de efectivo netos existan varios cambios de signo. Para estos casos, es posible que la propuesta presente el fenómeno de tasas múltiples de rendimiento [60].

### 3.2.7 Ejemplo del análisis económico

Figura 3.3 Representación del flujo de efectivo del proyecto



**Ejemplo:** la sustitución de un equipo eléctrico, en un proyecto costará \$6,075.00 pesos y la tasa de interés mínima deseada es del 10%, este equipo incrementará la eficiencia del sistema y generará un ahorro de efectivo de \$2,000.00 pesos al año, considerando el estudio para un periodo de 4 años. La figura 3.3 muestra los flujos de efectivo.

Se desea conocer cual es el valor de la tasa interna de retorno (TIR), así como ver si es recomendable llevar a cabo el proyecto.

Como primer paso se obtiene el VPN:

$$VPN = -6075.0 + \frac{2000((1 + 0.1)^4 - 1)}{0.1(1 + 0.1)^4} = 264.73$$

El resultado que se obtiene es positivo por lo tanto el proyecto es rentable. La TIR esta definida como la tasa de interés que reduce a cero el valor presente, por lo tanto para realizar el cálculo se debe ir cambiando el valor de la tasa de interés, tomando como punto de origen la tasa de interés (10%) hasta que el VPN sea igual que cero.

Al ir variando la tasa de interés en la ecuación anterior, se encuentra que la TIR es igual 12%, debido a que es la tasa que hace cero al VPN:

$$TIR = -6075.0 + \frac{2000((1 + 0.12)^4 - 1)}{0.12(1 + 0.12)^4} = -0.301 \approx 0$$

También se puede comprobar que el proyecto es rentable con el método RCB:

$$RCB = \frac{6339.73}{6075} = 1.0435$$

Se observa que el resultado es mayor que la unidad por lo tanto el proyecto es rentable.

Los valores obtenidos fueron desarrollados detalladamente de forma manual, en la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos por el programa desarrollado en lenguaje FORTRAN, en el cual se introduce la inversión inicial, los ingresos anuales y la tasa de interés, obteniendo los siguientes valores que son similares a los obtenidos anteriormente.

VPN =	\$264.73
TIR =	12%
RCB =	\$1.04

Se han visto conceptos para el análisis de rentabilidad de los proyectos. La aplicación de los proyectos de inversión en esta tesis es independiente y a su vez comparativa, con una sola tasa de interés, es decir, se evalúan los proyectos de forma individual (para cada proyecto propuesto) y se comparan con la red existente, en donde el objetivo es justificar económicamente el incremento de la confiabilidad mediante la adición de cuchillas desconectoras y restauradores en la sección principal de la red.

### 3.3 EJEMPLO DEL COSTO CONTRA EL VALOR DE LA CONFIABILIDAD

A continuación se describirá como evaluar el costo de la interrupción al cliente a través de la función de daño al consumidor, dato que puede ser utilizado para representar el valor de la confiabilidad del sistema eléctrico de potencia.

El objetivo básico de un ingeniero en la planeación de redes de distribución es desarrollar un sistema que satisfaga los requisitos del cliente con el costo más bajo posible. La técnica más común para evaluar las alternativas de distribución es estimar el rédito futuro requerido como resultado de un capital de inversión en términos del valor presente de cada alternativa. El desarrollo que requiere el menor rédito se considera como el más económico. Los requisitos del rédito para un sistema particular no es el único costo que el cliente hace frente como resultado de la selección de ese sistema. La calidad del servicio afecta a las operaciones del cliente y en algunos casos puede incluir pérdidas debido a problemas como el trabajo de marcha lenta, daño del equipo, producto estropeado, etc. Estas pérdidas, que

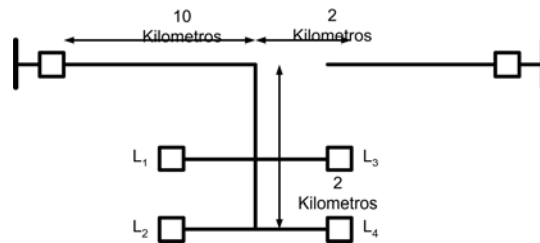
en la mayoría de los casos van inadvertidas para las empresas, son costos adicionales realizados por el cliente.

El sistema de distribución desarrollado depende sobre la filosofía básica de la empresa y por la confiabilidad de los componentes seleccionados. La información necesaria para una evaluación de la confiabilidad son los índices de falla y tiempo promedio de reparación. Utilizando esta información el sistema puede ser pronosticado. El ingeniero en planeación puede optimizar el desarrollo del sistema de distribución utilizando un equivalente del valor de un dólar para el costo de una interrupción de energía, por ejemplo como el utilizado por un grupo de compañías de electricidad, que en 1969 como resultado de un examen, definió el costo de interrupciones de energía como \$0,20 por el KW interrumpido más \$0,50 por KWH de energía no suministrada. El ingeniero en planeación, utilizando los valores monetarios para las interrupciones de energía, puede seleccionar el sistema de distribución que sea el más económico al cliente en lugar de intentar ajustar los índices mínimos de confiabilidad forzados sobre la empresa por la opinión pública. Los resultados pueden indicar que el sistema más económico es en el cual la confiabilidad excede de manera significativa al mínimo requerido. Algunos clientes pueden encontrar que un sistema menos confiable sería adecuado para sus necesidades [62].

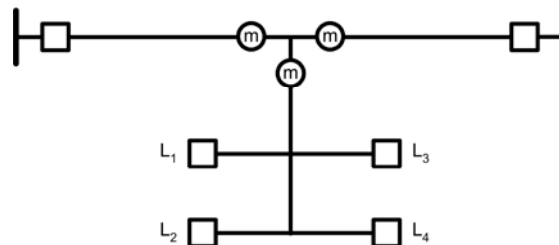
### 3.3.1 Evaluación

Para ilustrar la evaluación de dos alternativas, se utilizan los sistemas de distribución mostrados en las Figuras 3.4 y 3.5 para proveer el servicio a una subdivisión industrial [62].

**Figura 3.4 Sistema actual para la evaluación**



**Figura 3.5 Sistema propuesto para la evaluación, construir dos kilómetros de línea e instalar un interruptor automático de transferencia**



### 3.3.2. Datos

$L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = 500 \text{ KW}$                       100% factor de carga

Características de falla:

Principal primario                                      0.10 fallas/circuito kilómetro-año  
 3.0 horas, tiempo kilómetro de reparación

Lateral primario                                        0.25 fallas/circuito kilómetro-año  
 1.0 horas, tiempo promedio de reparación

Interruptor automático de transferencia    0.03 fallas/año  
 3.0 horas, tiempo promedio de reparación

Costo de la interrupción de energía:        \$0.28 por KW interrumpido  
 \$0.70 por KWH

Nota: derivado del costo utilizado por empresas eléctricas en 1969. Ahora a precios de 1975.

Costo de construcción:                              Una línea nueva \$10,000 por kilómetro  
 Interruptor automático de transferencia \$6.000

Cargos del suministro de energía:            Cargos en distribución 10.82%

Nota: los cargos del suministro de energía es el nivel del costo fijo anual estimado expresado en (1975) compra de energía y así se ha asumido la tasa de inflación o índice de la escala del cero por ciento. Con esta suposición se ha asumido un costo del dinero (excepto el efecto de la inflación) de 6%. El cargo del suministro de energía en un sistema de distribución puede ser resumido como sigue:

Vida activa estimada    -    25 años

Interés	6.00%
Depreciación	1.82
Otros impuestos	.70
Reemplazos interinos	.20
Seguridad	.10
Contingencia	.25
Operación y mantenimiento	<u>1.75</u>
	10.82%



Valor presente: es el valor presente de una serie de cargos anuales del suministro de energía sobre un número de años, dado por la formula:

$$P = \frac{R((1+i)^n - 1)}{i(1+i)^n}$$

donde

$P$  = Valor presente

$R$  = Costo anual

$i$  = Costo del dinero (interés)

$n$  = Número de años

### 3.3.3 Cálculos del sistema existente

De la Figura 3.4 el número promedio de interrupciones al año de la subdivisión industrial es 1,5 - una interrupción al año debido al principal primario y 0,5 interrupciones al año debido al lateral primario. La longitud media acumulativa de la interrupción por año son 3,5 horas - 3 horas debido al principal primario y 0,5 horas debido al lateral primario.

Por lo tanto, el costo de la interrupción de energía es

$$\begin{aligned} \$0.28 \times 2000 \times 1.5 &= \$ 840.00 \\ \$0.70 \times 2000 \times 3.5 &= \underline{\$4900.00} \\ & \$5,740.00 \text{ por año} \end{aligned}$$

Sobre una vida de 25 años el valor presente del costo de la interrupción de energía es

$$P = \frac{5740((1.06)^{25} - 1)}{0.06(1.06)^{25}} = \$73,377.00$$

### 3.3.4 Cálculos del sistema propuesto

De la Figura 3.5 se eliminan las interrupciones debidas al lateral primario. Sin embargo, se agregan las interrupciones debido a la falla del interruptor automático de transferencia.

La subdivisión industrial por lo tanto considerará 0,53 interrupciones al año, con una longitud media acumulativa de interrupciones por año de 0,59 horas.

Por lo tanto, el costo de la interrupción de energía es

$$\begin{aligned}
 & \$0.28 \times 2000 \times 0.53 = \$ 296.00 \\
 & \$0.70 \times 2000 \times 0.59 = \underline{\$ 826.00} \\
 & \qquad \qquad \qquad \$1,122.80 \text{ por año}
 \end{aligned}$$

Sobre una vida de 25 años el valor presente del costo de la interrupción de la energía es

$$P = \frac{1122.8((1.06)^{25} - 1)}{0.06(1.06)^{25}} = \$14,353.00$$

El capital adicional invertido para el sistema propuesto es de \$26,000.00.

Por lo tanto, el cargo anual del suministro de energía es de  $26,000.00 \times 0.1082 = \$2,813.20$

Sobre una vida de 25 años el valor presente del cargo de suministro de energía es

$$P = \frac{2813.20((1.06)^{25} - 1)}{0.06(1.06)^{25}} = \$35,962.00$$

El costo total del sistema propuesto es de \$50,315.00

El sistema de distribución mostrado en la Figura 3.5 ahorrará al cliente en la subdivisión industrial \$23,062.00 sobre períodos de 25 años comparados al sistema mostrado en la Figura 3.4. Éste toma en consideración el hecho de que la empresa de servicio público tendrá que recoger \$35,962.00 adicionales en forma de rédito a los clientes para una inversión de capital de \$26,000.00. Por lo tanto, si se conocen los índices mínimos de confiabilidad del sistema en la Figura 3.4 deberán invertirse \$26,000.00 según la Figura 3.5 para mejorar a futuro la confiabilidad del sistema y para reducir el costo de las operaciones al cliente.



# CAPÍTULO IV

## OPTIMIZACIÓN DEL COSTO DE LA CONFIABILIDAD UTILIZANDO UN ALGORITMO GENÉTICO

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Un sistema de distribución es relativamente económico y las salidas tienen un efecto muy identificado. El análisis de las estadísticas de falla del cliente en la mayoría de las empresas muestra que el sistema de distribución hace una contribución individual a la indisponibilidad del suministro al cliente. Esto se muestra estadísticamente en la Tabla 4.1 en la cual los datos son relacionados en particular a una empresa de distribución en Inglaterra [63].

**Tabla 4.1 Estadísticas de indisponibilidad típica del cliente**

Contribuidor	Promedio de la indisponibilidad por año del cliente	
	(minutos)	(%)
Generación/transmisión	0.5	0.5
132 KV	2.3	2.4
66 KV y 33 KV	8.0	8.3
11 KV y 6.6 KV	58.8	60.7
Bajo voltaje	11.5	11.9
Salidas planeadas	15.7	16.2
Total	96.8 minutos	100.0

Deben considerarse otros aspectos en la necesidad de evaluar la confiabilidad de los sistemas de distribución. En primer lugar, aunque un esquema reforzado puede ser relativamente barato, las sumas grandes de dinero se expenden colectivamente en tales sistemas. En segundo lugar, es necesario asegurar un balance razonable en la confiabilidad de los componentes de un sistema de energía, es decir la generación, transmisión, y distribución. En tercer lugar, son disponibles un número de alternativas al ingeniero de distribución para alcanzar una confiabilidad aceptable para el cliente, incluyendo los esquemas alternativos reforzados, asignación de repuestos, mejoras en la política del mantenimiento, políticas de operaciones alternativas. No es posible comparar cuantitativamente los méritos de tales alternativas, ni comparar su efecto por unidad monetaria expendida sin utilizar la evaluación cuantitativa de la confiabilidad.



Ahora se reconocen estos problemas y un número mayor de empresas a través del mundo están introduciendo y utilizando rutinariamente técnicas cuantitativas de confiabilidad [91,92]. Simultáneamente, las técnicas adicionales de evaluación continuamente están desarrollándose, mejorando y aumentando. Esto se puede ver por el crecimiento de las publicaciones escritas sobre esta área [66,67].

Las técnicas requeridas para analizar un sistema de distribución dependen del tipo del sistema que es considerado y de la profundidad del análisis.

A continuación se describirán los algoritmos que se utilizaron para lograr evaluar la confiabilidad de las redes de estudio, así como el cálculo de los índices de confiabilidad y rentabilidad. Describiendo también las técnicas que se utilizaron para la localización de dispositivos de seccionamiento (Cuchillas desconectadoras y restauradores).

## 4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO PARA EL ANÁLISIS DE LA CONFIABILIDAD

A continuación se describe como modelar una red de distribución, asignando los componentes de la red al grafo modelador, el cual permitirá analizar la confiabilidad de la red.

### 4.2.1 Modelado de la red de prueba

El modelado de la red es sencillo y consta de dos fases: la creación del grafo modelador y la asignación de parámetros de confiabilidad de las componentes de la red de distribución radial a los elementos del grafo.

#### 4.2.1.1 Asignación de los componentes de la red al grafo modelador

En base a la terminología de redes se establecen los nombres para representar los componentes de la red en el grafo modelador. Los componentes son descritos de la siguiente manera [68]:

- La fuente es la que suministra la energía a la red que se desea analizar. En el diagrama unifilar la fuente se representa con el nombre de FUENTE seguida de una flecha como se muestra:
- 

FUENTE →

Esta fuente se representa en el grafo por un NODO FUENTE como se indica en la siguiente figura:





- El punto de carga es donde se consume la energía. En el diagrama unifilar se representa por un bus llamado CARGA como se muestra:



Este punto de carga se representa en el grafo por un NODO POZO O NODO DESTINO mediante un círculo lleno negro como se indica en la siguiente figura:

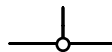


- NODOS INTERMEDIOS.- Estos se dividen en:

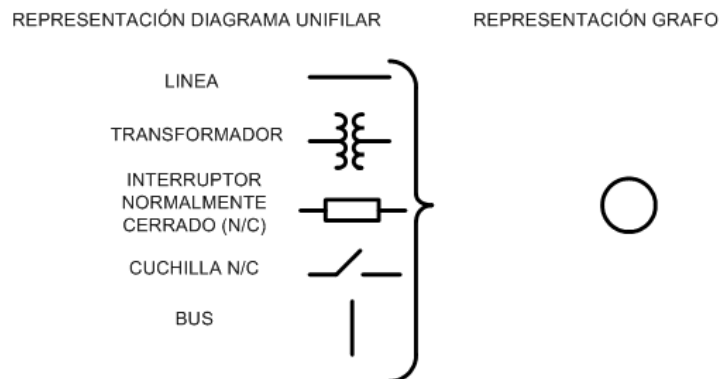
- A) PUNTO DE UNION.- El punto de unión en el diagrama unifilar es la unión de varias líneas como se muestra:



El punto de unión se representa en el grafo por un NODO FICTICIO. Este nodo sirve de conexión entre otros componentes de la red y cuyo modelado depende de las características de conectividad de la red. Estos nodos ficticios no se toman en cuenta para ningún evento de falla. La representación de los nodos ficticios en el grafo es mediante un círculo en blanco pequeño como se indica en la siguiente figura:



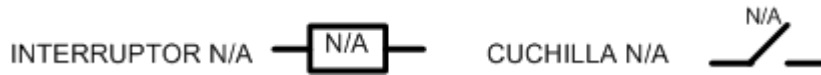
- B) COMPONENTES DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN RADIAL.- Los componentes en el diagrama unifilar tales como transformadores, líneas, interruptores normalmente cerrados (N/C), cuchillas, buses (que sirven solamente de interconexión y que no son puntos de carga), etc., son representados en el grafo mediante un círculo en blanco como se indica en la siguiente figura:



La diferencia entre una componente y un nodo ficticio es que el nodo ficticio no representa ningún evento de falla y la componente si.



C) COMPONENTES NORMALMENTE ABIERTOS.- Los componentes normalmente abiertos (N/A), como interruptores y cuchillas, se representan en el diagrama unifilar como se muestra:



La representación en el grafo de los componentes anteriores es mediante un círculo en blanco con una diagonal y las letras N/A como se indica en la siguiente figura:



ARISTAS.- Las aristas únicamente sirven de interconexión entre los nodos del grafo y como transportadoras de flujo de energía entre los nodos.

#### 4.2.1.2 Creación del grafo modelador

La creación del grafo modelador consiste en hacer la interconexión de todos los componentes mencionados anteriormente.

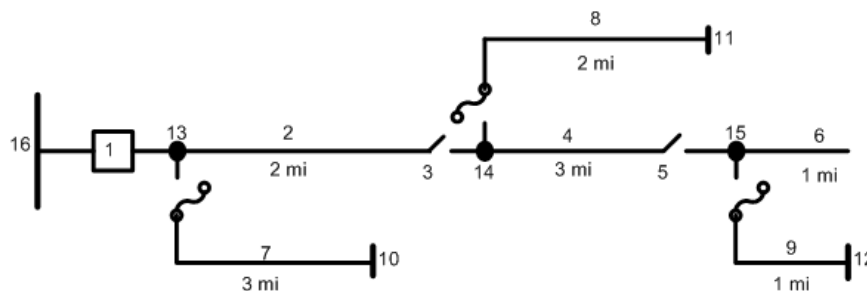
El modelado de la red es flexible, por lo que el ingeniero en planeación puede hacer los cambios necesarios en el grafo modelador, agregando, cambiando o quitando componentes para verificar si con esto favorece la confiabilidad total del sistema en estudio.

#### 4.2.2 Ejemplo de modelado de redes de prueba

Para mostrar la flexibilidad del grafo modelador se presenta la siguiente red [68].

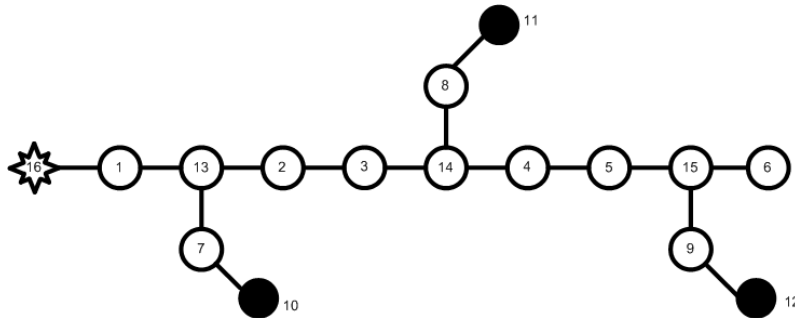
En la Figura 4.1 se muestra una red radial, alimentada por una fuente (16), que tiene tres líneas principales (2, 4 y 6), tres líneas laterales (7, 8 y 9), dos cuchillas desconectoras normalmente cerradas (3 y 5), un interruptor general normalmente cerrado (1) y tres puntos de carga (10, 11 y 12).

**Figura 4.1 Red de distribución radial**





**Figura 4.2 Grafo asociado a la red de distribución de la Figura 4.1**



La creación del grafo modelador se lleva a cabo conectando todos los componentes asignados en la misma forma que se encuentran en el diagrama unifilar de la red. Como se muestra en la Figura 4.2:

Note que, los números asociados al grafo son idénticos a los del diagrama unifilar de la Figura 4.1. Los nodos 13, 14 y 15 (Figura 4.2) representan puntos de unión con otros componentes y se especifican como nodos ficticios.

En el modelado de cada red es necesario tener un conocimiento de la operación de las protecciones para tener una buena representación de la red, asignando a cada nodo la tarea correcta y así tener un análisis de confiabilidad lo más real posible.

#### **4.2.3 Asignación de parámetros de confiabilidad de la red de distribución radial a los elementos del grafo modelador**

La asignación de parámetros consiste en dar a cada elemento del grafo los parámetros estadísticos de confiabilidad de la red de distribución de tipo radial de cada componente representado [68-70].

Estos parámetros son los siguientes:

$\lambda_i$  = Tasa de falla promedio del nodo  $i$ .- Es la frecuencia de falla del componente " $i$ " en la red.

$r_i$  = Tiempo promedio de reparación del nodo  $i$ . Es el tiempo promedio que toma reparar la componente " $i$ " en la red con falla pasiva.

$S_i$  = Tiempo promedio del seccionamiento de apertura y cierre de dispositivos de seccionamiento (N/C)

$S_i''$  = Tiempo promedio de apertura y cierre de cuchillas (N/A) del suministro alternativo del nodo  $i$ .



$D_i$  = Demanda promedio del nodo pozo  $i$ . Es la demanda promedio en MW del punto de carga de la red de distribución radial.

$USU_i$  = Número de usuarios conectados al nodo  $i$  de carga de la red de distribución radial.

Para ejemplificar la asignación de parámetros de confiabilidad de los componentes de la red a los elementos del grafo que representa, se tomará como ejemplo la red de la Figura 4.1 y su grafo 4.2. En la Tabla 4.2 se indican los parámetros que se asignan a cada componente.

**Tabla 4.2 Parámetros de confiabilidad asignados a cada componente de la Figura 4.1**

Componente	Parámetro Asignado	
	$\lambda$ (fallas/milla)	r (hrs.)
Alimentador principal	0.1	3.0
Laterales primarios	0.25	1.0

El tiempo del seccionamiento manual para cualquier acción de apertura o cierre de cuchilla N/C es de 0.5 horas.

El tiempo promedio de operación del suministro alternativo del nodo  $i$  es de 0.5 horas.

La demanda promedio en los nodos de carga es de 10 MW

El número de usuarios conectados a los nodos de carga es: 250 usuarios para el nodo de carga 10, 100 usuarios para el nodo de carga 11 y 50 usuarios para el nodo de carga 12.

### 4.3 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE CORTES

Los cortes son un conjunto de componentes que cuando fallan provocan la falla del sistema. El método más conveniente, para redes complejas y de dimensiones grandes, es el método de cortes mínimos.

El algoritmo para calcular los cortes consiste en los siguientes pasos [69-71]:

Paso 1.- Creación del grafo modelador y asignación de parámetros de confiabilidad de cada componente de la red de distribución radial a los elementos del grafo.

Paso 2.- Formación de todas las trayectorias mínimas a todos los nodos pozo del grafo.

Paso 3.- Formación de todos los cortes mínimos de todos los nodos pozo del grafo.





### 4.3.1 Formación de trayectorias mínimas

El procedimiento para la obtención de trayectorias en este algoritmo se lleva a cabo tomando uno por uno cada nodo pozo (punto de carga) con el siguiente procedimiento [68-71]:

Paso 1.- Determinación del árbol.

Paso 2.- Formación de trayectorias.

Paso 3.- Minimización de trayectorias.

#### 4.3.1.1 Determinación del árbol

1. Ponga el nodo pozo arriba del árbol (nivel 1).
2. Ponga los componentes conectados al nodo pozo en el siguiente nivel debajo del árbol (nivel 2) y haga el paso 3 al comenzar el nivel 2.
3. Para cada nodo en cada nivel mientras este no sea un nodo fuente (pozo), el procedimiento es el siguiente:

3.1 Obtenga los componentes conectados a cada nodo de este nivel (2, 3, 4,.....)

3.2 Para cada componente conectado a cada nodo comprobar lo siguiente:

3.2.1 Si el componente conectado es igual a cualquier otro nodo en la trayectoria mínima trazada desde el nodo fuente hasta el nodo actual, Si es así, vaya al paso 3.2 para el continuar con el siguiente componente (es decir, este componente conectado es omitido debido a una **repetición local**).

3.2.2 Si El componente conectado es el mismo que cualquier otro nodo ramificado de los nodos en la trayectoria mínima trazada desde el nodo pozo hasta el presente nodo; Si es así, ponga el nodo conectado en el siguiente nivel e indique al nodo encerrándolo en un círculo(es decir, el componente conectado es un punto doble en las trayectoria, esto es una **repetición global**) Si no es así, entonces poner el componente conectado en el siguiente nivel.

3.2.3 Ir al paso 3.2 para el siguiente componente conectado al nodo actual.

3.2.4 Si no hay más componentes conectados al nodo actual repita el paso 3 para el siguiente nodo en el nivel actual.

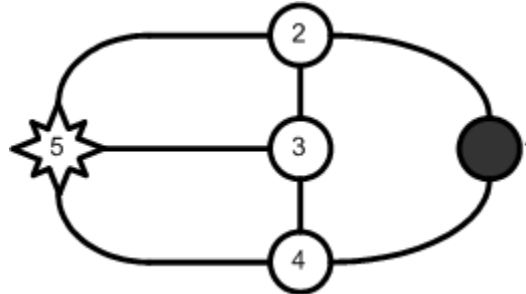
4. Si no hay más nodos en el nivel actual, repetir el paso 3 para los nodos en el siguiente nivel (es decir, nivel 3, 4,.....).

5. Repita el paso 4 hasta que cada nodo en el ultimo nivel sea un nodo fuente o sea un punto doble (es decir, encerrado por un círculo)



Ejemplo: Para ilustrar el procedimiento dado anteriormente, considere el grafo mostrado en la figura 4.3.

Figura 4.3 Grafo usado para ilustrar el árbol de trayectorias



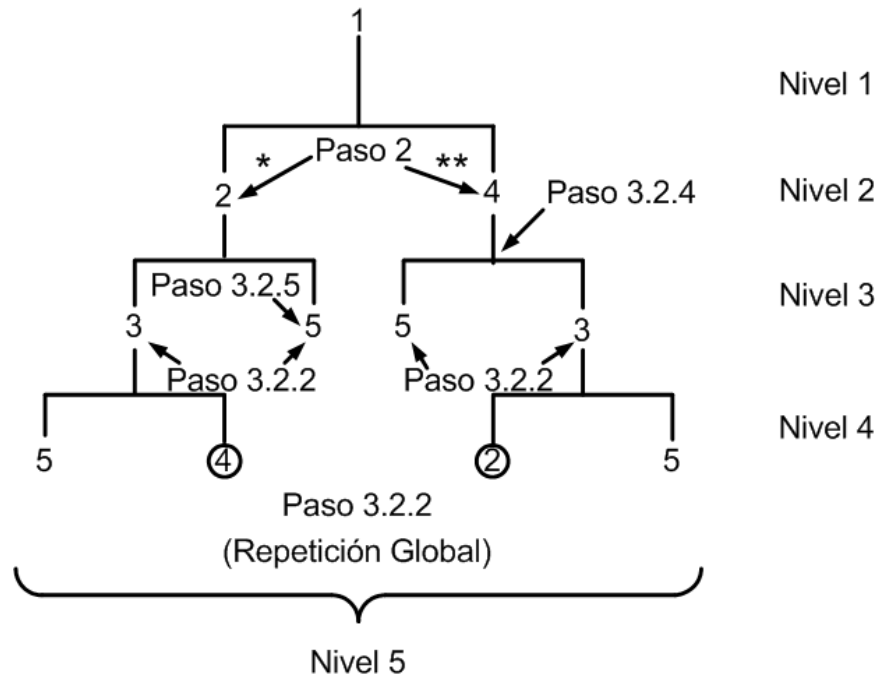
La figura 4.4 es el árbol del grafo de la Figura 4.3 el cual muestra todos los nodos conectados.

Figura 4.4 Estructura del árbol para el grafo de la Figura 4.3 para ilustrar la repetición local y global como se explica en los pasos 3.2.1 y 3.2.2





Figura 4.5 Árbol para el grafo de la Figura 4.3



El árbol se deduce de la estructura del árbol de la Figura 4.4 utilizando el procedimiento del paso 3 como sigue:

Trayectorias formadas por repetición global

\* 1-2-3-(4)-5

\*\* 1-4-3-(2)-5

Las trayectorias formadas a partir del árbol de la Figura 4.5 son:

1-2-3-(4)-3-2 — etc. (esta no es una trayectoria debido a que el nodo 3 se repite, el cual forma un ciclo).

1-2-3-(4)-5

1-2-3-5

1-2-5

1-4-3-(2)-3-(4) — etc. (esta no es una trayectoria)

1-4-3-(2)-5

1-4-3-5

1-4-5

De la lista anterior se eliminan todas aquellas trayectorias que contengan ciclos, es decir nodos repetidos, las cuales quedan:

1-2-3-(4)-5

1-2-3-5

1-2-5

1-4-3-(2)-5

1-4-3-5

1-4-5



### 4.3.1.2 Obtención de las trayectorias mínimas

A partir de las trayectorias formadas en el punto anterior se obtienen las trayectorias mínimas para el nodo pozo en análisis de la siguiente manera:

Las trayectorias mínimas cumplen las siguientes condiciones:

- 1.- No tienen nodos encerrados en un círculo debido a una repetición global.
- 2.- No tienen subconjuntos.

El algoritmo para obtener las trayectorias mínimas a partir de las trayectorias formadas con el árbol es el siguiente:

- 1.- Buscar los nodos fuente en cada nivel del árbol comenzando desde el nivel más abajo.
- 2.- Obtener las trayectorias para el nodo pozo en análisis desde cada nodo fuente (último nivel del árbol) hasta el nodo pozo (nivel 1).
- 3.- Eliminar las trayectorias obtenidas si cualquier nodo de esta trayectoria en análisis tiene un nodo fuente conectado directamente a ella. (Del ejemplo anterior, la trayectoria 1-2-3-5 no es una trayectoria mínima debido a que el nodo 2 tiene conectado el nodo fuente 5 directamente).

Las trayectorias son:

1-2-3-(4)-5	1-2-3-5
1-2-5	1-4-3-(2)-5
1-4-3-5	1-4-5

De las anteriores, las trayectorias 1-2-3-(4)-5 y 1-4-3-(2)-5 se eliminan debido a que tienen un nodo encerrado por un círculo debido a una repetición global, y las trayectorias 1-2-3-5 y 1-4-3-5 también se eliminan debido a que los nodos 2 y 4 respectivamente tienen conectado directamente el nodo pozo 5. Por lo tanto el juego de trayectorias restantes son las trayectorias mínimas para el grafo de la Figura 4.3:

5-2-1  
5-4-1

De la misma forma se deducen todas las trayectorias mínimas para todos los nodos pozo de un grafo.



### 4.3.2 Deducción de cortes

A partir de las trayectorias mínimas se deducen todos los cortes que causan la salida del nodo pozo en análisis. Los diferentes tipos de cortes que se pueden obtener son [68]:

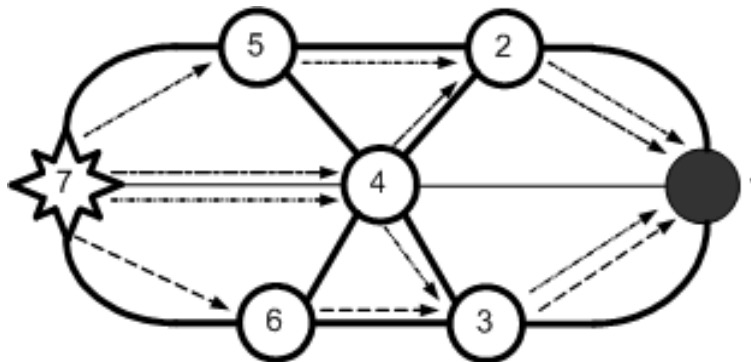
- Cortes pasivos de primero, segundo y tercer orden.
- Cortes activos de primero, segundo y tercer orden.
- Cortes activos con bloqueo al abrir el interruptor normalmente cerrado de primero, segundo y tercer orden.
- Cortes pasivos con bloqueo al cierre de interruptor normalmente abierto de primero y segundo orden.
- Cortes activos con bloqueo al cierre de interruptor normalmente abierto de primero y segundo orden.

Como el caso de estudio de esta tesis es analizar redes de distribución de tipo radial, se tomarán en cuenta los cortes pasivos de primer orden causantes de la salida de cada nodo de carga.

#### 4.3.2.1 Deducción de cortes pasivos

Para explicar la deducción de cortes pasivos se toma como ejemplo el grafo de la Figura 4.6.

Figura 4.6 Grafo para explicar la deducción de cortes pasivos



De este grafo las trayectorias mínimas, son:

- 7-4-2-1 Trayectoria mínima 1 — — — — — ➔
- 7-5-2-1 Trayectoria mínima 2 ······ ➔
- 7-4-3-1 Trayectoria mínima 3 ······ ➔
- 7-6-3-1 Trayectoria mínima 4 — — — — — ➔



#### **4.3.2.1.1 Procedimiento para obtener cortes pasivos de primer orden**

Para deducir estos cortes se tiene el siguiente procedimiento:

- 1.- Se cuenta el número de veces que cada nodo del grafo aparece en todas las trayectorias mínimas asociadas al nodo pozo en análisis. Por ejemplo para el grafo de la Figura 4.6 los nodos 7 y 1 aparecen en las cuatro trayectorias mínimas. Los nodos 2, 3 y 4 aparecen en dos trayectorias y los nodos 5 y 6 en una trayectoria.
- 2.- Los nodos que aparezcan igual número de veces al número de trayectorias mínimas asociadas al nodo pozo en análisis se toman como cortes pasivos de primer orden. En este caso como los nodos 7 y 1 aparecen en todas las trayectorias mínimas se consideran cada uno cortes pasivos de primer orden.
- 3.- Para los cortes pasivos de primer orden formados en el paso 2 se verifica que no sean nodos ficticios, si lo son, se eliminan de la lista de cortes.

Cabe mencionar que los ejemplos anteriores fueron para ilustrar el procedimiento para la obtención de cortes, ya que en este trabajo se realizó algo más sencillo, debido a la topología de las redes de distribución radial.

### **4.4 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA CONFIABILIDAD.**

A continuación se describe la metodología que se utilizó para la implementación del Algoritmo Genético, tomando esta técnica por haber demostrado dar buenos resultados en problemas de optimización en redes de distribución. En el apéndice C se describe más a detalle el algoritmo evolutivo.

#### **4.4.1 Interpretación del problema real al Algoritmo Genético**

En este trabajo se encuentra el número óptimo de dispositivos de seccionamiento en la sección principal de la red, esto para lograr mejorar la confiabilidad; los dispositivos que se consideran en el análisis son: Cuchillas desconectadoras y Restauradores. Para ello se considera la parte económica, basándose en un estudio de evaluación económica, por medio del cual se determinará si el proyecto es rentable o no.

Para poder implementar un algoritmo evolutivo en la solución de un problema tiene que existir la posibilidad de interpretar el problema real en términos de este tipo de algoritmos, es decir, se tiene que interpretar el problema en forma de cadenas cromosómicas.

Como primer paso se realiza el modelado de la red de distribución que será de interés para el análisis y evaluación (Sección 4.2), una vez creado el grafo correspondiente a la red se puede conocer cuantas posibles localizaciones se tiene para colocar un dispositivo de desconexión, dicho numero de localizaciones será el tamaño de la longitud del cromosoma,



el cual dará información del sistema como por ejemplo, que dispositivos se encuentran conectados y en que posición de la red.

#### 4.4.1.1 Creación de la población inicial

Debido a que en la primera fase del algoritmo genético nos proporciona cromosomas de forma lógica es decir F y T (falso y verdadero) y para solucionar el problema necesitamos también el valor de 2, realizamos subcadenas para interpretar a todos los dispositivos que se pueden conectar en la sección principal de la red. La interpretación de estas subcadenas se ilustra en la Tabla 4.3

**Tabla 4.3 Interpretación de las subcadenas**

<b>Cadena lógica</b>	<b>Subcadena</b>
FF TF TT FT	0 1 2 1

Se puede observar que para realizar las cadenas en términos de 0's y 1's y 2's necesitamos considerar el doble de la longitud (en las cadenas lógicas), es decir si consideramos cuatro posibles localizaciones en donde podemos colocar un dispositivo de desconexión, la longitud del cromosoma debe ser ocho, ya que para representar un dispositivo se toman los valores de las cadenas lógicas de dos en dos. De tal manera que serán estas subcadenas (cromosomas) las que representen al sistema en la evaluación de la confiabilidad y rentabilidad. Cabe mencionar que para no perder una combinación se considero en la interpretación TF y FT de la cadena lógica como un 1.

Una vez que se interpreta al primer cromosoma, se realiza un procedimiento análogo con el resto de los cromosomas hasta completar el número de individuos que formarán a la población inicial, haciendo notar que cada individuo es una posible solución del problema.

Para tener una idea más clara del procedimiento antes mencionado considerar que en la sección principal de la red de la Figura 4.1 se tienen cuatro posibles localizaciones en donde colocar o no un dispositivo de desconexión, por lo tanto la longitud del cromosoma sería de cuatro. Observar la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4 Cromosoma generado de acuerdo a la estructura de la sección principal**

<b>Cadena lógica</b>	<b>Creación de la subcadena (cromosoma)</b>	<b>Dispositivos conectados en la sección principal de la red</b>
TF FF FT TT	1 0 1 2	Cuchilla, Ningún dispositivo, Cuchilla, Restaurador

Se puede observar que si existe colocado una cuchilla en la primer localización (de izquierda a derecha), el valor del alelo toma un valor de 1, si existe colocado un restaurador el alelo tomará un valor de 2 y si no se tiene un dispositivo colocado el alelo será un 0, esto se verá de manera más detallada en una sección posterior (Sección 4.5.1).



#### **4.4.1.2 Selección de los individuos**

La selección de los mejores individuos se realiza mediante la técnica de la ruleta (sección C.6), pero para ello se necesita conocer el valor de las aptitudes de los individuos que conforman a la población, para encontrar estos valores se realiza lo siguiente:

Solo para la primera generación se toma al primer individuo como el sistema base, esto para realizar el análisis de confiabilidad y la evaluación económica con respecto a los demás individuos.

Para las siguientes generaciones se toma como sistema base (de comparación) a la cadena que haya tenido el valor de aptitud más bajo en la generación anterior, garantizando con esto que los demás individuos sean mejor que esta y se puedan obtener de esta manera aptitudes altas. Además que de esta manera se le da mayor oportunidad de mejorar a las cadenas más débiles, por medio de los operadores genéticos.

Para este trabajo las aptitudes son los valores que se obtuvieron en la evaluación económica y la función objetivo es el valor que un sistema pueda proveer con una alta confiabilidad (es decir, buenos parámetros e índices de confiabilidad) pero con un costo de inversión pequeño. Es decir que la función objetivo no fue una función en si, si no que fue maximizar la confiabilidad minimizando el costo inicial del proyecto.

Una vez que se obtuvieron los valores de las aptitudes de todos lo individuos se realiza la selección de dos de ellos para que sean los padres, los cuales propagarán su material genético a la siguiente generación, generando de esta manera mejores soluciones. Para este caso tomamos a los individuos con la aptitud mas bajo con la finalidad de darles la oportunidad de incrementar su aptitud, ya que de tomar a los de aptitud alta se corre el riesgo de que el algoritmo converja rápidamente obteniendo un optimo local en vez de una solución optima para el sistema.

#### **4.4.1.3 Creación de la nueva población**

La nueva población se realizó utilizando a los operadores genéticos: cruzamiento y mutación (sección C.6). Una vez que se seleccionaron a los individuos con aptitud mas baja (padres) por medio de la técnica de la ruleta, se crean a los nuevos individuos (hijos) que conformarán a la nueva población, creando de esta manera nuevas soluciones que mantienen el material genético de los padres, no necesariamente idénticos debido a que el material genético puede sufrir modificaciones debido al funcionamiento de los operadores genéticos, los cuales operan de manera probabilística y aleatoria.

Una vez generada la nueva población se continúa el ciclo evolutivo, de tal manera que las aptitudes de los individuos van mejorando de generación en generación encontrando cada vez cromosomas con mejores aptitudes, es decir soluciones que proporcionan mejores resultados; ciclo que termina hasta cumplir con el criterio de terminación. Cabe mencionar que el tipo de cruzamiento que se utilizó en este trabajo fue el de punto simple.





#### 4.4.1.4 Criterio de terminación

En este trabajo se utilizó como criterio de terminación un número máximo de generaciones (maxgen), de tal manera de que cuando se cumple este número el algoritmo se detiene y se procede a encontrar al individuo (solución) que tenga la mejor aptitud entre varios pobladores. Teniendo de esta manera un abanico de posibles soluciones (las mejores) para poder elegir de ellas cual es la que mejor satisface las necesidades requeridas o la que cumple con ciertas posibles limitaciones del proyecto, como por ejemplo el económico; ya que si la mejor solución sobrepasará una posible limitación económica se pudiera elegir a otra solución que sea buena y que no pase esta limitación. Tomando en cuenta para ello una tabla en la cual se observan a los individuos con varios datos importantes que serán de importancia en la elección del mejor proyecto.

#### 4.4.2 Técnica para la evaluación de costos de interrupción al cliente

Los costos obtenidos debido a la interrupción al cliente servirán para realizar el estudio de rentabilidad, ya que se sumarán con otros costos, como es el del KW del sistema o el costo de un restaurador, solo por mencionar. Una vez obteniendo todos los costos, se analizará la rentabilidad del sistema bajo estudio por medio de métodos de evaluación económica (capítulo 3).

El costo de interrupción al cliente  $ICOST_k^l$  para la combinación de cuchillas desconectadas y/o restauradores, se calcula utilizando una técnica de análisis de costos de confiabilidad [72].

$$\begin{aligned}
 ICOST_k^l &= \left( \sum_{i=1}^{Np} L_i \sum_{j=1}^{Ne} C_{ij} \lambda_{ij} \right)_k^l \\
 i &= 1, 2, 3, \dots, Np \\
 j &= 1, 2, 3, \dots, Ne
 \end{aligned}
 \tag{4.4}$$

donde:

$L_i$  = Carga promedio al punto de carga  $i$  (KW).

$\lambda_{ij}$  = Tasa de falla al punto de carga  $i$  debido al modo de falla  $j$ .

$C_{ij}$  = Costo de interrupción en p.u. (KW) al punto de carga  $i$  debido al modo de falla  $j$ .

$N_p$  = Número total de puntos de carga del sistema.

$N_e$  = Número total de modos de falla en el sistema de distribución.

$C_{ij}$  = Es la función de costo no-lineal de daño al consumidor compuesta debido a la interrupción  $r_{ij}$ .

$$C_{ij} = \lambda_{ij}(r_{ij}) \tag{4.5}$$

El número total de combinaciones de dispositivos de seccionamiento es finito y el número de dispositivos de seccionamiento es fijo, por consiguiente el problema de optimización es de solución finita.



## 4.5 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN

A continuación se describe el algoritmo de forma general de acuerdo a lo descrito en las secciones 4.3 y 4.4.

### 4.5.1 Técnica de enumeración

La localización óptima de los dispositivos de seccionamiento y el costo mínimo del sistema es un problema de optimización, que es normalmente complicado [72].

Para aplicar la técnica de enumeración a este problema los dispositivos de seccionamiento en cada localización  $i$  estarán representados mediante la variable  $S_i$ . Donde  $S_i = 2$ , si existe la posibilidad de colocar un restaurador en la posición  $i$ ,  $S_i = 1$ , si existe la posibilidad de colocar un dispositivo de seccionamiento en la posición  $i$  en este caso una cuchilla desconectadora y  $S_i = 0$ , si no existe un dispositivos de seccionamiento en la posición  $i$ . Siendo la variable  $S_i$  el valor del alelo en el cromosoma.

El procedimiento para determinar la localización óptima de dispositivos de seccionamiento con la técnica de enumeración se realiza con los siguientes pasos:

- a) Interpretar el problema real en la forma estructural del Algoritmo Genético (sección 4.4.1).
- b) Formar la población inicial ( $i=0$ ), tomando en cuenta el número de las posibles localizaciones en donde se pueden colocar un dispositivo de desconexión y los diferentes tipos de dispositivos (sección 4.4.1.1).
- c) Se evalúa la confiabilidad del primer cromosoma y se obtienen los parámetros de los componentes (tasa de falla y tiempo de reparación) de la red, posteriormente se calculan los índices de confiabilidad, datos que servirán para la futura evaluación económica con los demás individuos (secciones 4.2, 4.3).
- d) Hacer un análisis del costo de la confiabilidad y evaluar los costos de inversión para la población inicial, encontrando de esta manera el valor de las aptitudes de la generación  $i$  (sección 3.2.5).
- e) Una vez encontrando el valor de las aptitudes (VPN, TIR y RBC) de los individuos, se eligen a los individuos con menor aptitud, para que sean los padres que propaguen su material genético a la siguiente generación, con la finalidad de que mejoren con cada generación (sección 4.4.2).



- f) Generación de la nueva población que sustituirá a la anterior, formada por los padres elegidos en el punto anterior, la formación de la nueva población se realiza por medio de los operadores genéticos: cruzamiento y mutación (sección 4.4.1.3).
- g) Repetir el ciclo generacional ( $i=i+1$ ) a partir del punto c) hasta cumplir con el criterio de terminación, con la única diferencia de que ahora se considera al primer cromosoma para la evaluación al individuo que tuvo la menor aptitud en la generación anterior (sección 4.4.1.2).
- h) Una vez cumplido el criterio de terminación, se elige al cromosoma con la mejor aptitud, es decir que red proporciona una mejor RBC, un mayor beneficio con un costo de inversión pequeño o a la solución que mejor se ajuste a las limitaciones o necesidades requeridas (sección 4.4.1.4).

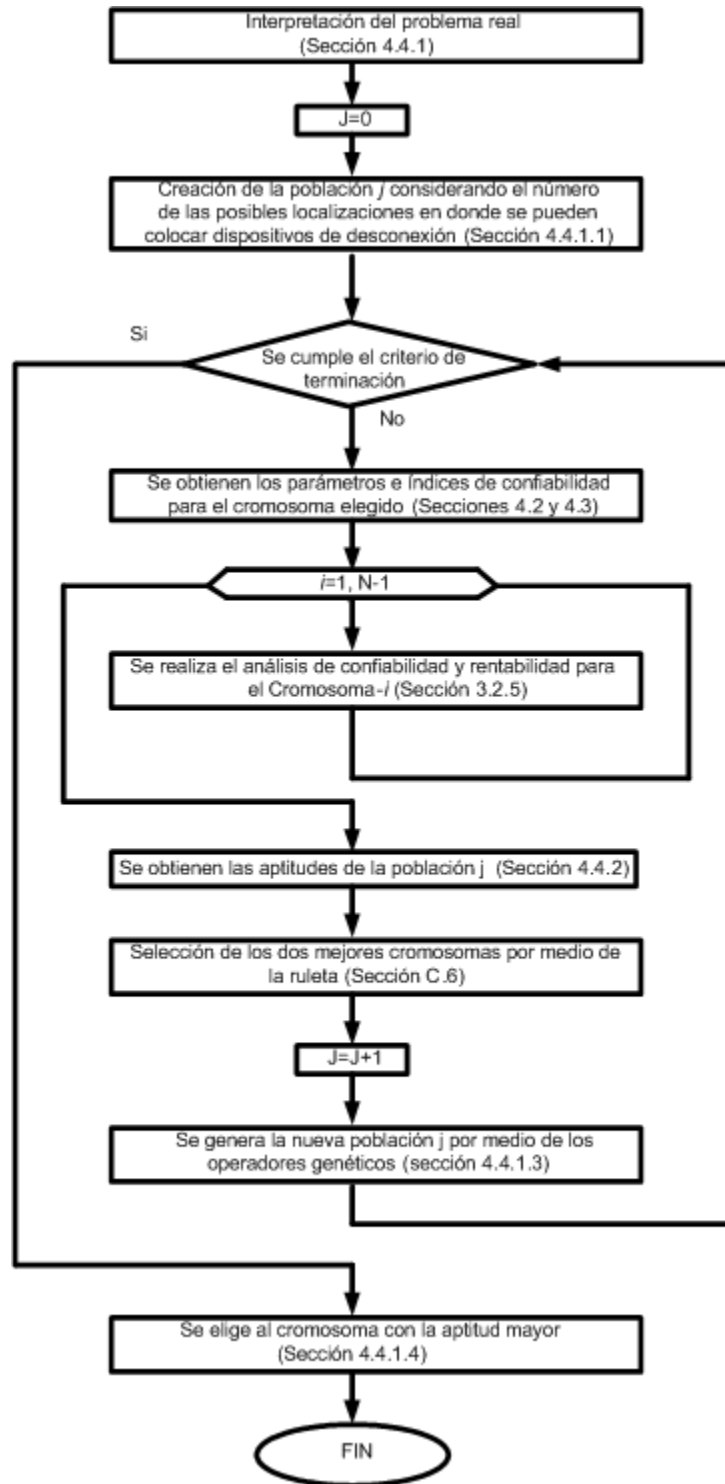
Lo anterior da la oportunidad de tomar una decisión acerca de cual es el proyecto que mejor se adecua a los requerimientos o límites de la red, como por ejemplo, el capital de inversión o la topología del sistema.

Cabe mencionar que el programa desarrollado para resolver el problema de optimización puede realizar el análisis de confiabilidad y rentabilidad para cualquier red de distribución, siempre y cuando sea de tipo radial (también para los sistemas de tipo malla que son operados como sistemas radiales).

Para comprender lo mencionado en las secciones 4.4 y 4.5, se puede observar la Figura 4.7, donde se muestra el funcionamiento general del programa de optimización y de las subrutinas.



Figura 4.7 Funcionamiento general del programa de optimización y las subrutinas



# CAPÍTULO V

## VALIDACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS

### 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se escriben los resultados de las pruebas realizadas a redes de distribución de tipo radial (2 sistemas de estudio), esto para la validación del algoritmo desarrollado, explicado en el capítulo anterior. Cada red fue evaluada para dos casos, el primero sin considerar el suministro alternativo y el segundo caso tomando en cuenta el suministro alternativo, los resultados obtenidos se comprobaron con cálculos manuales y otras técnicas como Bisección y búsqueda directa o exhaustiva.

### 5.2 SISTEMA DE ESTUDIO 1

A continuación se observará al sistema de estudio número uno, mediante el cual se realizará el análisis de confiabilidad y rentabilidad.

#### 5.2.1 Caso de prueba No.1

La primera red de distribución que se toma en cuenta para el estudio, es de tipo radial sin suministro alternativo y se puede ver en la Figura 5.1, así también su correspondiente grafo modelador en la Figura 5.2 [70].

**Figura 5.1 Red de distribución tipo radial (Sistema de estudio 1)**

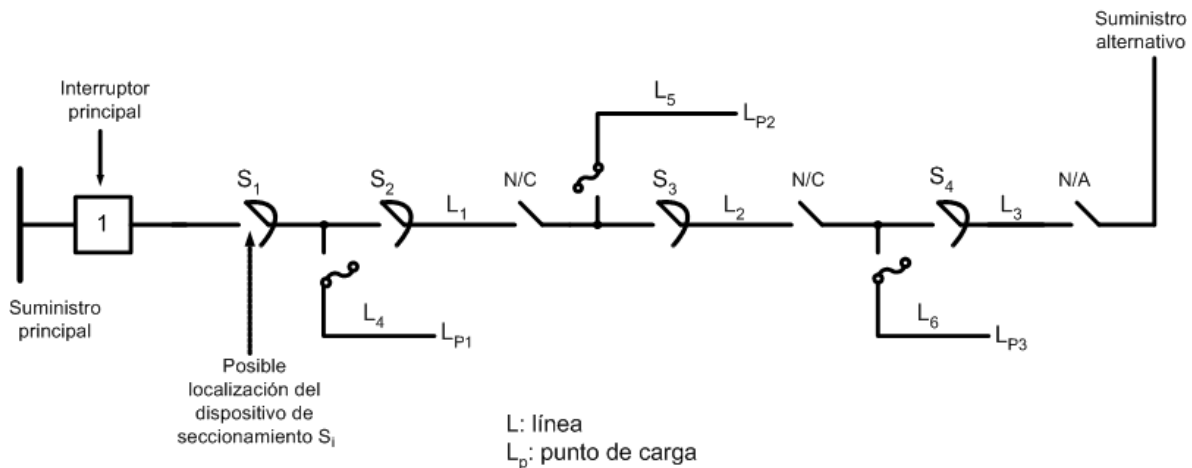


Figura 5.2 Grafo modelador de la red de distribución en la Figura 5.1

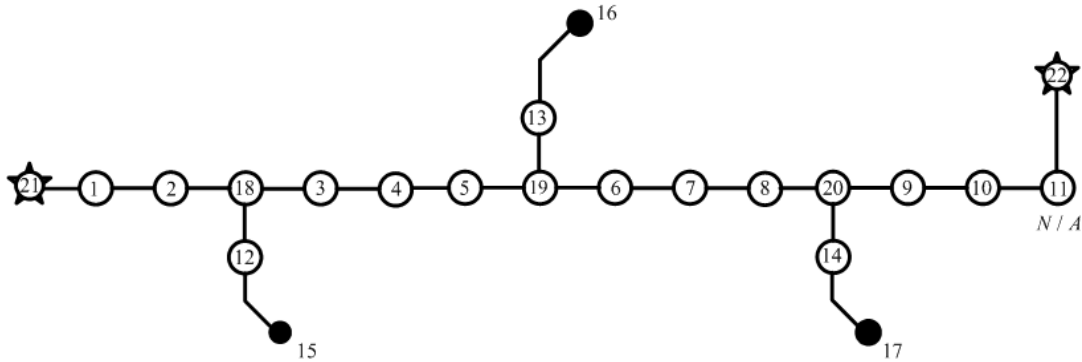


Tabla 5.1 Precios supuestos de los dispositivos de seccionamiento y su mano de obra

Dispositivo de seccionamiento		Precios supuestos (\$ pesos)
Cuchilla desconectadora	c/u	\$ 18,600.00
Restaurador	c/u	\$ 30,000.00
Mano de obra de la cuchilla	c/u	\$ 16,400.00
Mano de obra del restaurador	c/u	\$ 18,000.00

El costo por dispositivos de seccionamiento, como también la mano de obra de la instalación para cada dispositivo, se observa en la Tabla 5.1 datos que serán de gran importancia para el desarrollo de la evaluación económica.

En la red de estudio número 1 se cuenta con 6 secciones de líneas de transmisión de las cuales las primeras tres se consideran como líneas principales, son representados en el grafo modelador por los números 4, 7 y 10. Las otras líneas laterales están representadas por los números 12, 13, 14.

Los puntos de carga se representan en el grafo modelador con los números 15, 16 y 17, las 4 posibles localizaciones de dispositivos de seccionamiento ( $S_1, \dots, S_4$ ), con los números 2, 3, 6 y 9, las cuchillas normalmente cerradas y abiertas están identificadas por los números 5, 8 y 11, éstos dispositivos se consideran totalmente confiables en el análisis de la red.

Los datos de los componentes, los de confiabilidad, los datos de carga y el número de usuarios en cada punto de carga, se pueden observar en las Tablas 5.2, 5.3 y 5.4, respectivamente [44]. El tiempo de la acción de apertura y cierre de los dispositivos N/C para aislar la falla es de 0.5 horas, para la acción de la cuchilla desconectadora será de 0.5 horas y para el del restaurador se tomará un tiempo de cero. El tipo de clientes conectados es 40% comercial y 60% residencial en cada punto de carga.

**Tabla 5.2 Datos individuales de los componentes para el sistema de estudio 1, caso 1**

Componente	Tasa de falla $\lambda$ (fallas/Km./año)	Tiempo de reparación $r$ (hrs.)
Alimentador principal	0.1	3.0
Laterales primarios	0.25	1.0

**Tabla 5.3 Parámetros de confiabilidad del sistema de estudio 1, caso 1**

Sección de línea	Tasa de falla $\lambda$ (fallas/año)	Tiempo de reparación $r$ (hrs.)
Interruptor general	0.23	11.0
<b>Sección principal</b>		
1	0.2	3.0
2	0.3	3.0
3	0.1	3.0
<b>Sección lateral</b>		
4	0.75	1.0
5	0.5	1.0
6	0.25	1.0

**Tabla 5.4 Parámetros en los puntos de carga para el sistema de estudio 1, caso 1**

Puntos de carga	Número correspondiente en el grafo modelador	Número de usuarios	Demanda (KW)
1	15	250	10,000.00
2	16	100	10,000.00
3	17	50	10,000.00
Total		400	30,000.00

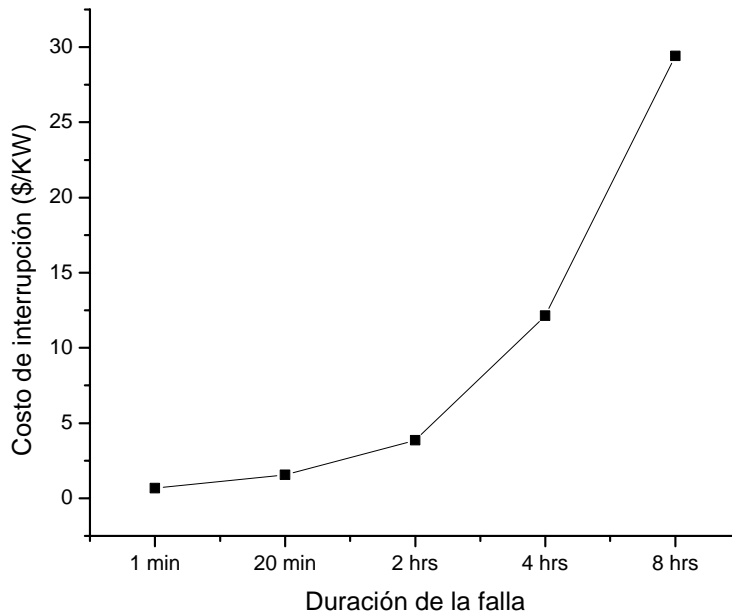
**Tabla 5.5 Duración de interrupción y su respectivo costo (\$/KW) para diferentes sectores**

DURACIÓN DE LA INTERRUPCIÓN	1 MIN.	20 MIN.	2 HRS.	4 HRS.	8 HRS.
<b>Costo de la interrupción (\$/KW)</b>	0.67	1.56	3.85	12.14	29.41

En la Tabla 5.5, se muestran los datos para la curva compuesta de daño al consumidor para los diferentes sectores como son: industrial, comercial, agrícola, residencial, oficinas, instituciones gubernamentales, y usuarios grandes, su representación grafica se muestra en la Figura 5.3 [44].



**Figura 5.3 Curva compuesta de daño al consumidor**



**Tabla 5.6 Datos para la evaluación económica**

Cuchilla desconectadora	c/u	Ver Tabla 5.1.
Restaurador	c/u	Ver Tabla 5.1.
Mano de obra para la cuchilla	c/u	Ver Tabla 5.1.
Mano de obra para el restaurador	c/u	Ver Tabla 5.1.
Costo por KW interrumpido*		\$0.48
Costo por KWh*		\$0.90
KW del sistema**		30,000.00
Tasa de interés		0.1
Años de estudio para el sistema		20

\*\$ pesos

\*\* El KW máximo y promedio son iguales (solo para el sistema de estudio 1)

El costo de daño al consumidor se toma en cuenta para la evaluación económica, siendo sumado con los precios de los dispositivos que se colocarán en la red, dependiendo esto, de la topología de la red bajo estudio. Los datos para la evaluación económica se pueden observar en la Tabla 5.6.

Los valores de probabilidad de mutación, cruzamiento, tamaño de la población y número máximo de generaciones se observan en la tabla 5.7 y son tomados de las referencias, donde el algoritmo genético presenta buenos resultados [73-75].





**Tabla 5.7 Datos para el algoritmo genético**

DATOS	
Máxima generación	50 generaciones
Tamaño de la población	50-100 individuos
Probabilidad de mutación	0.03
Probabilidad de cruzamiento	0.6

Realizando la optimización se obtiene los resultados que se pueden apreciar en las Tablas 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 y 5.12. Cabe mencionar que las tablas 5.8 y 5.9 son resultados de los parámetros e índices de confiabilidad en donde se tomaron cadenas al azar para validar los resultados.

En la Tablas 5.10 y 5.11 se pueden observar los reportes de la generación 1 y 50 respectivamente, en donde se pueden observar los individuos (cromosomas) en forma lógica y binaria, así también su respectivo costo de inversión inicial de dicho proyecto (se ilustraron solo dos generaciones debido al tamaño de los archivos).

En las Tablas 5.12 y 5.13 se pueden observar los datos de las poblaciones en las generaciones 0 y 50 respectivamente. Se puede observar la mejoría entre dichas poblaciones, por ejemplo, obsérvese el valor promedio de la aptitud poblacional y de la sumatoria de la aptitud de la población, las mejorías son considerables.

Reacomodando los datos de la Tabla 5.11 obtenemos la Tabla 5.14, en la cual se puede realizar la elección del proyecto que mejor convenga. En esta tabla se pueden apreciar a las cadenas (cromosomas) generadas en la última generación, en forma lógica y binaria, con sus respectivos valores de aptitud y costo de inversión inicial. De tal manera que con esta tabla se puede hacer la elección del proyecto que mejor convenga. De la tabla se puede observar que la mejor solución es el individuo 0220, ya que es el que tiene el valor de aptitud mayor, es decir, que su relación costo beneficio de ese proyecto es el más alto, pero en caso de que existiera alguna posible restricción económica en la inversión inicial, se podría elegir otra buena opción que se ajuste a este costo restringido, por ejemplo, la siguiente mejor opción sería el individuo 0120 que proporcionaría niveles de confiabilidad un poco mas bajos que la mejor opción pero su costo inicial de ese proyecto es menor al de la mejor opción disminuyendo de 118,779 a 98,476 pesos, lo cual podría ser una buena solución para la restricción económica.

En la Tabla 5.15 se puede observar la información que proporciona cada cromosoma con respecto al sistema de estudio 1 del caso 1. Se puede ver en cada proyecto la colocación de los dispositivos en la sección principal de la red, la cantidad y el tipo de dispositivos. En dicha tabla se puede interpretar que los puntos más frágiles del sistema que hay que reforzar para mejorar la confiabilidad es el S<sub>2</sub> y S<sub>3</sub> debido a que en todas las posibles soluciones aparecen dispositivos colocados en estas localidades de la red.

**Tabla 5.8 Resultados de los parámetros (tasa de falla e indisponibilidad) obtenidos por el programa de optimización para el sistema de estudio 1 caso 1**

Cadenas	Parámetros en cada punto de carga (PC)		
	PC 15	PC 16	PC 17
0000	$\lambda=1.58, \lambda_r=4.08$	$\lambda=1.33, \lambda_r=4.58$	$\lambda=1.58, \lambda_r=4.58$
1100	$\lambda=1.58, \lambda_r=3.58$	$\lambda=1.33, \lambda_r=4.58$	$\lambda=1.08, \lambda_r=4.58$
0010	$\lambda=1.58, \lambda_r=4.08$	$\lambda=1.33, \lambda_r=3.83$	$\lambda=1.08, \lambda_r=4.58$
1020	$\lambda=1.58, \lambda_r=3.93$	$\lambda=1.33, \lambda_r=3.68$	$\lambda=1.08, \lambda_r=4.58$
0120	$\lambda=1.58, \lambda_r=4.08$	$\lambda=1.33, \lambda_r=3.68$	$\lambda=1.08, \lambda_r=4.58$
2001	$\lambda=1.58, \lambda_r=4.08$	$\lambda=1.33, \lambda_r=4.58$	$\lambda=1.08, \lambda_r=4.33$
0111	$\lambda=1.58, \lambda_r=3.58$	$\lambda=1.33, \lambda_r=3.84$	$\lambda=1.08, \lambda_r=4.33$
1121	$\lambda=1.58, \lambda_r=3.43$	$\lambda=1.33, \lambda_r=3.68$	$\lambda=1.08, \lambda_r=4.33$
2102	$\lambda=1.58, \lambda_r=3.53$	$\lambda=1.33, \lambda_r=4.53$	$\lambda=1.08, \lambda_r=4.28$
0212	$\lambda=1.58, \lambda_r=3.43$	$\lambda=1.33, \lambda_r=3.78$	$\lambda=1.08, \lambda_r=4.28$
1222	$\lambda=1.58, \lambda_r=3.28$	$\lambda=1.33, \lambda_r=3.63$	$\lambda=1.08, \lambda_r=4.28$
2222	$\lambda=1.58, \lambda_r=3.28$	$\lambda=1.33, \lambda_r=3.63$	$\lambda=1.08, \lambda_r=4.28$

**Tabla 5.9 Índices de confiabilidad obtenidos por el programa de optimización para el sistema de estudio 1 caso 1**

Cadenas	Índices de confiabilidad obtenidos por el programa			
0000	SAIFI=1.4550,	SAIDI=4.2675,	CAIDI=2.9330,	ASAI=0.9995129,
	ASUI=0.0004872,	ENS=132400.00,	AENS=331.0	
1100	SAIFI=1.4550,	SAIDI=3.9550,	CAIDI=2.7182,	ASAI=0.9995485,
	ASUI=0.0004515,	ENS=127400.0,	AENS=318.5	
0010	SAIFI=1.4550,	SAIDI=4.08,	CAIDI=2.8041,	ASAI=0.9995342,
	ASUI=0.0004658,	ENS=124900.0,	AENS=312.25	
1020	SAIFI=1.4550,	SAIDI=3.9488,	CAIDI=2.7139,	ASAI=0.9995492,
	ASUI=0.0004508,	ENS=121900.0,	AENS=304.75	
<b>0120</b>	<b>SAIFI=1.4550,</b>	<b>SAIDI=3.6363,</b>	<b>CAIDI=2.499,</b>	<b>ASAI=0.9995849,</b>
	<b>ASUI=0.0004151,</b>	<b>ENS=116900.00,</b>	<b>AENS=292.25</b>	
2001	SAIFI=1.4550,	SAIDI=4.2362,	CAIDI=2.9115,	ASAI=0.9995164,
	ASUI=0.0004836,	ENS=129900.00,	AENS=324.75	
0111	SAIFI=1.4550,	SAIDI=3.7362,	CAIDI=2.5679,	ASAI=0.9995735,
	ASUI=0.0004265,	ENS=117400.00,	AENS=293.5	
1121	SAIFI=1.4550,	SAIDI=3.6050,	CAIDI=2.6624,	ASAI=0.9995885,
	ASUI=0.0004115,	ENS=114400.00,	AENS=286.0	
2102	SAIFI=1.4550,	SAIDI=3.8737,	CAIDI=2.6624,	ASAI=0.9995578,
	ASUI=0.0004422,	ENS=123400.00,	AENS=308.5	
0212	SAIFI=1.4550,	SAIDI=3.6237,	CAIDI=2.4777,	ASAI=0.9995863,
	ASUI=0.0004137,	ENS=114900.00,	AENS=308.5	
1222	SAIFI=1.4550,	SAIDI=3.4925,	CAIDI=2.4003,	ASAI=0.9996013,
	ASUI=0.0003987,	ENS=111900.00,	AENS=287.25	
2222	SAIFI=1.4550,	SAIDI=3.4925,	CAIDI=2.4003,	ASAI=0.9996013,
	ASUI=0.0003987,	ENS=111900.0,	AENS=279.75	

Tabla 5.10 Reporte de la generación 1 (sistema de estudio 1 caso 1)

Cadenas Lógicas	Aptitud	Cadenas binarias	Costo de inversión	
1 FTTTTFTT	123.0000	5.991445	1 2 1 2	183727
2 FTTFTTTT	111.0000	6.798748	1 1 2 2	181700
3 FFFTTTTT	31.00000	8.420808	0 1 2 2	146700
4 TTFTTTTT	223.0000	6.344801	2 1 2 2	194700
5 TTTFTTFF	236.0000	7.348108	2 1 2 0	146476
6 FTFTTFTT	93.00000	6.760563	1 1 2 1	168253
7 FTTTTFTF	122.0000	5.882194	1 2 1 1	170504
8 FTTTTFTT	123.0000	5.991445	1 2 1 2	183727
9 TTTTTTTF	254.0000	6.250364	2 2 2 1	201556
10 FTFTTFTT	91.00000	5.831002	1 1 1 2	167806
11 TFFTTFFT	153.0000	5.696826	1 1 1 1	154583
12 FFFTTTTT	31.00000	8.420808	0 1 2 2	146700
13 TTFTTTFF	220.0000	7.348108	2 1 2 0	146476
14 FTTFTTFT	109.0000	6.760563	1 1 2 1	168253
15 FFFTTFTF	54.00000	7.401531	0 2 1 1	135504
16 FFFTTFTT	45.00000	8.536274	0 1 2 1	133253
17 FFFTTTTF	46.00000	8.536274	0 1 2 1	133253
18 FTFTFTFT	85.00000	5.696826	1 1 1 1	154583
19 FFFTTFTF	26.00000	7.364192	0 1 1 1	119583
20 FTTTTTTF	126.0000	6.681294	1 2 2 1	188556
21 TFTTFTTT	187.0000	5.991445	1 2 1 2	183727
22 FFFFTTTT	15.00000	5.518192	0 0 2 2	113040
23 TTTTTTTT	255.0000	6.271935	2 2 2 2	216464
24 TFFTTFFT	185.0000	5.882194	1 2 1 1	170504
25 FTTFFTTT	103.0000	5.831002	1 1 1 2	167806
26 FFFFTTTT	39.00000	7.367710	0 1 1 2	132806
27 FTTFTTTF	110.0000	6.760563	1 1 2 1	168253
28 FFFTTTTF	62.00000	8.204154	0 2 2 1	153556
29 FFFTTTTF	58.00000	7.401531	0 2 1 1	135504
30 TFFFTTFT	141.0000	3.914053	1 0 2 1	134370
31 FFFTTFTT	55.00000	7.401407	0 2 1 2	148727
32 FTFTTTF	92.00000	8.063779	1 1 2 0	133476
33 TFTTTTTT	191.0000	6.672669	1 2 2 2	203464
34 TFFTTFTT	173.0000	6.760563	1 1 2 1	168253
35 TTTFTTTF	238.0000	6.275676	2 1 2 1	181253
36 TFFTTFFT	185.0000	5.882194	1 2 1 1	170504
37 TTTFTTFF	236.0000	7.348108	2 1 2 0	146476
38 TFFTTFTT	183.0000	5.991445	1 2 1 2	183727
39 FTFTTFTT	91.00000	5.831002	1 1 1 2	167806
40 FFFTTTTF	58.00000	7.401531	0 2 1 1	135504
41 TFFTTFTT	181.0000	5.882194	1 2 1 1	170504
42 FTFTTFTT	91.00000	5.831002	1 1 1 2	167806
43 FTFTTTTT	95.00000	6.798748	1 1 2 2	181700
44 TTTTTTTF	254.0000	6.250364	2 2 2 1	201556
45 TTTTTFTT	251.0000	5.595523	2 2 1 2	196727
46 TTFTTTFT	221.0000	6.275676	2 1 2 1	181253
47 FTTFTTFT	109.0000	6.760563	1 1 2 1	168253
48 TFFTTTTF	188.0000	7.794518	1 2 2 0	153779
49 TTTFTFTT	235.0000	5.411752	2 1 1 2	180806
50 FTTTTTFT	121.0000	5.882194	1 2 1 1	170504

**Tabla 5.11 Reporte de la generación 50 (sistema de estudio 1 caso 1)**

<b>Cadenas Lógicas</b>	<b>Aptitud</b>	<b>Cadenas binarias</b>	<b>Costo de inversión</b>	
1 FFFTTTTFT	61.00000	4.779078	0 2 2 1	153556
2 FFFTTTTFT	29.00000	4.589408	0 1 2 1	133253
3 FFFTTTTTT	47.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
4 FFFTTTTFT	61.00000	4.779078	0 2 2 1	153556
5 FFFTTTTTT	47.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
6 FFFTTTTFT	59.00000	3.865128	0 2 1 2	148727
7 FFFTTTTFF	28.00000	5.589065	0 1 2 0	98476
8 FFFTTTTTT	47.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
9 FFFTTTTTT	63.00000	4.937043	0 2 2 2	168464
10 FFFTTTTFT	61.00000	4.779078	0 2 2 1	153556
11 FFFFTFTTF	22.00000	2.966130	0 1 1 1	119583
12 TFFFTTTTT	175.0000	3.904233	1 1 2 2	181700
13 FFFTTTTFF	60.00000	5.663471	0 2 2 0	118779
14 FFFFTFTTF	45.00000	4.589408	0 1 2 1	133253
15 FFFTTTTTT	63.00000	4.937043	0 2 2 2	168464
16 FFFTTTTTF	62.00000	4.779078	0 2 2 1	153556
17 FTTTTTTTT	127.0000	4.087770	1 2 2 2	203464
18 FFFTTTTTT	63.00000	4.937043	0 2 2 2	168464
19 FTTTTTTTT	127.0000	4.087770	1 2 2 2	203464
20 FFFFTTTTT	47.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
21 FTTTTTTTT	127.0000	4.087770	1 2 2 2	203464
22 FTTFTTTTT	111.0000	3.904233	1 1 2 2	181700
23 TFFTTTFTT	187.0000	3.128824	1 2 1 2	183727
24 FTTTTTTTT	127.0000	4.087770	1 2 2 2	203464
25 FFFFTTTTT	31.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
26 FFFTTTTTF	62.00000	4.779078	0 2 2 1	153556
27 FFFFTTTTT	31.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
28 FFFTTTTTF	62.00000	4.779078	0 2 2 1	153556
29 FFFFTTTF	44.00000	5.589065	0 1 2 0	98476
30 FFFFTTTTT	31.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
31 FFFTTTTTT	63.00000	4.937043	0 2 2 2	168464
32 FTTFTTTTT	111.0000	3.904233	1 1 2 2	181700
33 FTTTTTFT	125.0000	3.891983	1 2 2 1	188556
34 FFFFTTTTT	47.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
35 FFFTTTTTT	63.00000	4.937043	0 2 2 2	168464
36 FFFFTTFT	29.00000	4.589408	0 1 2 1	133253
37 FFFFTTFT	45.00000	4.589408	0 1 2 1	133253
38 FFFFTTTTT	31.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
39 FFFTTTTTT	63.00000	4.937043	0 2 2 2	168464
40 FFFTTTTTT	31.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
41 FFFFTTTTT	47.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
42 FTTFTTFT	109.0000	3.634722	1 1 2 1	168253
43 FFFFTTTTT	31.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
44 FFFFTTTTT	47.00000	4.835713	0 1 2 2	146700
45 FFFTTTTFT	61.00000	4.779078	0 2 2 1	153556
46 FTTFTTTTT	111.0000	3.904233	1 1 2 2	181700
47 FFFFTTFT	29.00000	4.589408	0 1 2 1	133253
48 FFFTTTTTT	63.00000	4.937043	0 2 2 2	168464
49 FFFFTTFT	29.00000	4.589408	0 1 2 1	133253
50 FFFFTTTTT	31.00000	4.835713	0 1 2 2	146700

**Tabla 5.12 Datos de la población en la generación 0 (sistema de estudio 1 caso 1)**

<b>Generación 0</b>	
Valor máximo de aptitud de la población inicial	0.2834768E+01
Valor promedio de aptitud de la población inicial	0.1348966E+01
Valor mínimo de aptitud de la población inicial	0.3648996E+00
Sumatoria de fitness de la población inicial	0.4316691E+02

**Tabla 5.13 Datos de la población en la generación 50 (sistema de estudio 1 caso 1)**

<b>Generación 50</b>	
Valor máximo de aptitud de la población	0.5663471E+01
Valor mínimo de aptitud de la población	0.2966130E+01
Valor promedio de aptitud de la población	0.4590912E+01
Sumatoria de aptitud de la población	0.2295456E+03

**Tabla 5.14 Tabla para la elección del proyecto de la generación 50(sistema de estudio 1 caso 1)**

<b>Frecuencia de cadenas</b>	<b>Cadenas Lógicas</b>	<b>Aptitud</b>	<b>Cadenas binarias</b>	<b>Costo de inversión</b>	
7	F F T T T T F T	61.00000	4.779078	0 2 2 1	1,53,556
6	F F F T T T F T	29.00000	4.589408	0 1 2 1	133,253
14	F F F F T T T T	47.00000	4.835713	0 1 2 2	146,700
1	F F T T T F T T	59.00000	3.865128	0 2 1 2	148,727
2	F F F T T T F F	28.00000	5.589065	0 1 2 0	98,476
7	F F T T T T T T	63.00000	4.937043	0 2 2 2	168,464
1	F F F T F T T F	22.00000	2.966130	0 1 1 1	119,583
4	T F T F T T T T	175.0000	3.904233	1 1 2 2	181,700
1	F F T T T T F F	60.00000	5.663471	0 2 2 0	118,779
4	F T T T T T T T	127.0000	4.087770	1 2 2 2	203,464
1	T F T T T F T T	187.0000	3.128824	1 2 1 2	183,727
1	F T T T T T F T	125.0000	3.891983	1 2 2 1	188,556
1	F T T F T T F T	109.0000	3.634722	1 1 2 1	168,253

**Tabla 5.15 Datos de los cromosomas para el sistema de estudio 1 caso 1**

<b>\$ Costo de Inversión</b>	<b>RCB</b>	<b>Cromosomas</b>	<b>Dispositivos</b>	<b>Localización en la red</b>
1,53,556	4.779078	0 2 2 1	2R, 1C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
133,253	4.589408	0 1 2 1	1R, 2C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
146,700	4.835713	0 1 2 2	2R, 1C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
148,727	3.865128	0 2 1 2	2R, 1C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
98,476	5.589065	0 1 2 0	1R, 1C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
168,464	4.937043	0 2 2 2	3R	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
119,583	2.966130	0 1 1 1	3C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
181,700	3.904233	1 1 2 2	2R, 2C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
118,779	5.663471	0 2 2 0	2R	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
203,464	4.087770	1 2 2 2	3R, 1C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
183,727	3.128824	1 2 1 2	2R, 2C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
188,556	3.891983	1 2 2 1	2R, 2C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
168,253	3.634722	1 1 2 1	1R, 3C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>

C= Cuchilla desconectadora

R = Restaurador



De acuerdo al resultado obtenido, se observa que el algoritmo optimiza la confiabilidad de la red tomando en cuenta el estudio de evaluación económica, dando el resultado más benéfico (es decir, una alta relación costo beneficio) para la red en estudio.

### 5.2.2 Caso de prueba No. 2

La segunda red que se toma en cuenta para el análisis, es la misma que se utilizó en el caso de prueba 1, con la excepción de que ahora se toma en cuenta el suministro alterno (ver Figuras 5.1 y 5.2).

Los datos para el análisis se pueden observar en las Tablas 5.1 (precios de los dispositivos de seccionamiento y su mano de obra), 5.2 (Datos individual es de los componentes), 5.3 (parámetros de confiabilidad de la red de prueba), 5.4 (Parámetros en los puntos de carga), para la curva compuesta de daño al consumidor se toma en cuenta los datos de la Tabla 5.5 (Duración de interrupción y su respectivo costo para diferentes sectores) y su grafica se observa en la Figura 5.3. Los datos utilizados para la evaluación económica se observan en la Tabla 5.6., y los datos para el algoritmo genético en la tabla 5.7. Como en la primera red de prueba el KW del sistema es el mismo para los cálculos, es decir, el KW promedio y el KW máximo son iguales.

Realizando la optimización de la segunda red (sistema de estudio 1 caso 2) se obtuvieron los resultados que se pueden apreciar en la Tablas 5.16-5.21. De nuevo se toma a la generación 0, generación 1 y a la generación 50 para ilustrar los resultados.

En la Tablas 5.16 y 5.17 se pueden observar los reportes de la generación 1 y 50 respectivamente (para el sistema de estudio 1 caso 2), en donde se pueden observar los individuos (cromosomas) en forma lógica y binaria, así también su respectivo costo de inversión inicial de dicho proyecto.

En las Tablas 5.18 y 5.19 se pueden observar los datos de las poblaciones en las generaciones 0 y 50 respectivamente. Se puede observar la mejoría entre dichas poblaciones.

Reacomodando los datos de la Tabla 5.17 obtenemos la Tabla 5.20, en la cual se puede realizar la elección del proyecto que mejor convenga. De tal manera que con esta tabla se puede hacer la elección del proyecto que mejor convenga. De la tabla se puede observar que la mejor solución es el individuo 2220, ya que es el que tiene el valor de aptitud mayor (su relación costo beneficio es el más alto), pero en caso de que existiera alguna posible restricción económica en la inversión inicial, se podría elegir otra buena opción que se ajuste a este costo restringido, la siguiente mejor opción sería el individuo 2120 que proporcionaría niveles de confiabilidad un poco mas bajos pero su costo inicial de ese proyecto es menor al de la mejor opción disminuyendo de 147,458 a 134,334 pesos, lo cual podría ser una buena solución para la restricción económica. En la Tabla 5.21 se puede observar la información que proporciona cada cromosoma con respecto al sistema de estudio 1 del caso 2. Se puede ver en cada proyecto la colocación de los dispositivos en la sección principal de la red, la cantidad y el tipo de dispositivos.

Tabla 5.16 Reporte de la generación 1(sistema de estudio 1 caso 2)

Cadenas Lógicas	Aptitud	Cadenas binarias	Costo de inversión	
1 TTTTTFFT	249.0000	23.99069	2 2 1 1	169160
2 TTFFTFTT	219.0000	23.85303	2 1 1 2	169111
3 TTTTTFFT	249.0000	23.99069	2 2 1 1	169160
4 TTFTTTTT	223.0000	23.56075	2 1 2 2	182111
5 TTTFTFFT	233.0000	25.21259	2 1 1 1	156111
6 TTFTTTTF	221.0000	24.79324	2 1 2 1	169111
7 TTTTFTFT	251.0000	22.81572	2 2 1 2	182160
8 TTFFTFFT	217.0000	25.21259	2 1 1 1	156111
9 TTFFTFTT	219.0000	23.85303	2 1 1 2	169111
10 TTFTTTTT	223.0000	23.56075	2 1 2 2	182111
11 TTFFTFTT	219.0000	23.85303	2 1 1 2	169111
12 TTTTTFFT	249.0000	23.99069	2 2 1 1	169160
13 TTFFTFFT	217.0000	25.21259	2 1 1 1	156111
14 TTTFTTFT	237.0000	24.79324	2 1 2 1	169111
15 TTFTTTTF	222.0000	24.79324	2 1 2 1	169111
16 TTTFTTFT	237.0000	24.79324	2 1 2 1	169111
17 TTTFTTTT	239.0000	23.56075	2 1 2 2	182111
18 TTTTFFFT	241.0000	27.37754	2 2 0 1	134831
19 TTTTFTFT	251.0000	22.81572	2 2 1 2	182160
20 TTFTTFFF	216.0000	31.93487	2 1 1 0	121334
21 TTTFTTFT	237.0000	24.79324	2 1 2 1	169111
22 TTTFTFFF	232.0000	31.93487	2 1 1 0	121334
23 TTTFTTFF	244.0000	29.74400	2 2 1 0	134384
24 TTTTTFFT	249.0000	23.99069	2 2 1 1	169160
25 TTFFTFTT	219.0000	23.85303	2 1 1 2	169111
26 TTFTTTTT	223.0000	23.56075	2 1 2 2	182111
27 TTFFTTTF	214.0000	25.21259	2 1 1 1	156111
28 TTFFTFTT	219.0000	23.85303	2 1 1 2	169111
29 TTTFTTFT	237.0000	24.79324	2 1 2 1	169111
30 TTFFTTFT	205.0000	26.48312	2 0 2 1	135228
31 TTFTTTTT	223.0000	23.56075	2 1 2 2	182111
32 TTFTTFFT	217.0000	25.21259	2 1 1 1	156111
33 TTTTFTFF	244.0000	29.74400	2 2 1 0	134384
34 TTFTTTTT	223.0000	23.56075	2 1 2 2	182111
35 TTTFTTFT	237.0000	24.79324	2 1 2 1	169111
36 TTTFTTFT	237.0000	24.79324	2 1 2 1	169111
37 TTTFTTFT	237.0000	24.79324	2 1 2 1	169111
38 TTTTTTTT	191.0000	21.74301	1 2 2 2	182259
39 TTTTTFFT	249.0000	23.99069	2 2 1 1	169160
40 TTFFTTFT	173.0000	23.97469	1 1 2 1	156111
41 TTFFTTFT	201.0000	27.34835	2 0 1 1	121558
42 TTTTFTFF	244.0000	29.74400	2 2 1 0	134384
43 TTFTTTTT	223.0000	23.56075	2 1 2 2	182111
44 TTFFTFTT	219.0000	23.85303	2 1 1 2	169111
45 TTTTTFFT	251.0000	22.81572	2 2 1 2	182160
46 TTFTTTFT	221.0000	24.79324	2 1 2 1	169111
47 TTFTTTTT	223.0000	23.56075	2 1 2 2	182111
48 TTFTTFFT	217.0000	25.21259	2 1 1 1	156111
49 TTTFTFFT	233.0000	25.21259	2 1 1 1	156111
50 TTTTTFFT	249.0000	23.99069	2 2 1 1	169160

Tabla 5.17 Reporte de la generación 50 (sistema de estudio 1 caso 2)

Cadenas Lógicas	Aptitud	Cadenas binarias	Costo de inversión	
1 TTTTTF	252.0000	5.208992	2 2 2 0	147458
2 TTFTTTT	223.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
3 TTTFTTF	238.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
4 TTFTTTT	221.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
5 TTTFTTT	239.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
6 TTTTTTT	255.0000	4.748126	2 2 2 2	195259
7 TTFTTTT	220.0000	4.807354	2 1 2 0	134334
8 TTTTTTF	252.0000	5.208992	2 2 2 0	147458
9 TTTTTTF	254.0000	4.550550	2 2 2 1	182235
10 TTFFTTT	215.0000	3.240166	2 1 1 2	169111
11 TTFTTTT	223.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
12 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
13 TTTTFTT	247.0000	3.679511	2 2 1 2	182160
14 TTFTTTT	220.0000	4.807354	2 1 2 0	134334
15 TTFTFTF	214.0000	2.883217	2 1 1 1	156111
16 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
17 TTTFTTT	239.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
18 TTFTTTT	223.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
19 TTTTTTT	255.0000	4.748126	2 2 2 2	195259
20 TTTTTTT	255.0000	4.748126	2 2 2 2	195259
21 TTTTTTF	254.0000	4.550550	2 2 2 1	182235
22 TTFTTTT	223.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
23 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
24 TTFTTTT	223.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
25 TTFTTTT	220.0000	4.807354	2 1 2 0	134334
26 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
27 FTFTFTF	90.00000	0.000000	1 1 1 1	143111
28 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
29 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
30 TTTTTTT	255.0000	4.748126	2 2 2 2	195259
31 TTFTTTT	223.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
32 TTTTTTT	255.0000	4.748126	2 2 2 2	195259
33 TTFTTTT	223.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
34 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
35 TTTTTTF	252.0000	5.208992	2 2 2 0	147458
36 TTTFTTT	239.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
37 TTFTTTT	220.0000	4.807354	2 1 2 0	134334
38 TTFTTTT	220.0000	4.807354	2 1 2 0	134334
39 TTFTTTT	220.0000	4.807354	2 1 2 0	134334
40 TTTTTTF	252.0000	5.208992	2 2 2 0	147458
41 TTTTTTF	254.0000	4.550550	2 2 2 1	182235
42 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
43 TTTTFTF	246.0000	3.383808	2 2 1 1	169160
44 TTFTTTT	223.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
45 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
46 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
47 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
48 TTTTTTT	255.0000	4.748126	2 2 2 2	195259
49 TTTFTTT	239.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
50 TTFTTTT	222.0000	4.180375	2 1 2 1	169111



**Tabla 5.18 Datos de la población en la generación 0 (sistema de estudio 1 caso 2)**

<b>Generación 0</b>	
Valor máximo de aptitud de la población inicial	0.2283553E+01
Valor promedio de aptitud de la población inicial	0.1114252E+01
Valor mínimo de aptitud de la población inicial	0.3917139E+00
Sumatoria de aptitud de la población inicial	0.8914019E+01

**Tabla 5.19 Datos de la población en la generación 50 (sistema de estudio 1 caso 2)**

<b>Generación 50</b>	
Valor máximo de aptitud de la población	0.5208992E+01
Valor mínimo de aptitud de la población	0.2883217E+01
Valor promedio de aptitud de la población	0.4419673E+01
Sumatoria de aptitud de la población	0.2165640E+03

**Tabla 5.20 Tabla para la elección del proyecto de la generación 50 (sistema de estudio 1 caso 2)**

<b>Frecuencia de cadenas</b>	<b>Cadenas Lógicas</b>	<b>Aptitud</b>	<b>Cadenas binarias</b>	<b>Costo de inversión</b>
4	T T T T T F F F 252.0000	5.208992	2 2 2 0	147458
12	T T F T T T T T 223.0000	4.419295	2 1 2 2	182111
14	T T T F T T T F 238.0000	4.180375	2 1 2 1	169111
6	T T T T T T T T 255.0000	4.748126	2 2 2 2	195259
6	T T F T T T F F 220.0000	4.807354	2 1 2 0	134334
3	T T T T T T T F 254.0000	4.550550	2 2 2 1	182235
1	T T F T F T T T 215.0000	3.240166	2 1 1 2	169111
1	T T T T F T T T 247.0000	3.679511	2 2 1 2	183160
1	T T F T F T T F 214.0000	2.883217	2 1 1 1	156111
1	F T F T T F T F 90.00000	0.000000	1 1 1 1	143111
1	T T T T F T T F 246.0000	3.383808	2 2 1 1	169160

**Tabla 5.21 Datos de los cromosomas para el sistema de estudio 1 caso 2**

<b>\$ Costo de Inversión</b>	<b>RCB</b>	<b>Cromosomas</b>	<b>Dispositivos</b>	<b>Localización en la red</b>
147458	5.208992	2 2 2 0	3R	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
182111	4.419295	2 1 2 2	3R, 1C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
169111	4.180375	2 1 2 1	2R, 2C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
195259	4.748126	2 2 2 2	4R	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
134334	4.807354	2 1 2 0	2R, 1C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
182235	4.550550	2 2 2 1	3R, 1C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
169111	3.240166	2 1 1 2	2R, 2C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
183160	3.679511	2 2 1 2	3R, 1C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
156111	2.883217	2 1 1 1	1R, 3C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
143111	0.000000	1 1 1 1	4C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
169160	3.383808	2 2 1 1	2R, 2C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>

C= Cuchilla desconectadora

R = Restaurador

### 5.3 SISTEMA DE ESTUDIO 2

El sistema de estudio número dos es el que se puede observar en la Figura 5.4 [76]. Tomando en cuenta solo a la red de distribución radial del alimentador 3 (Figura 5.5), para realizar el análisis de confiabilidad y rentabilidad. En la Figura 5.6 se puede observar su correspondiente grafo planar.

#### 5.3.1 Caso de prueba No. 1

Figura 5.4 Sistema de distribución (Sistema de estudio 2)

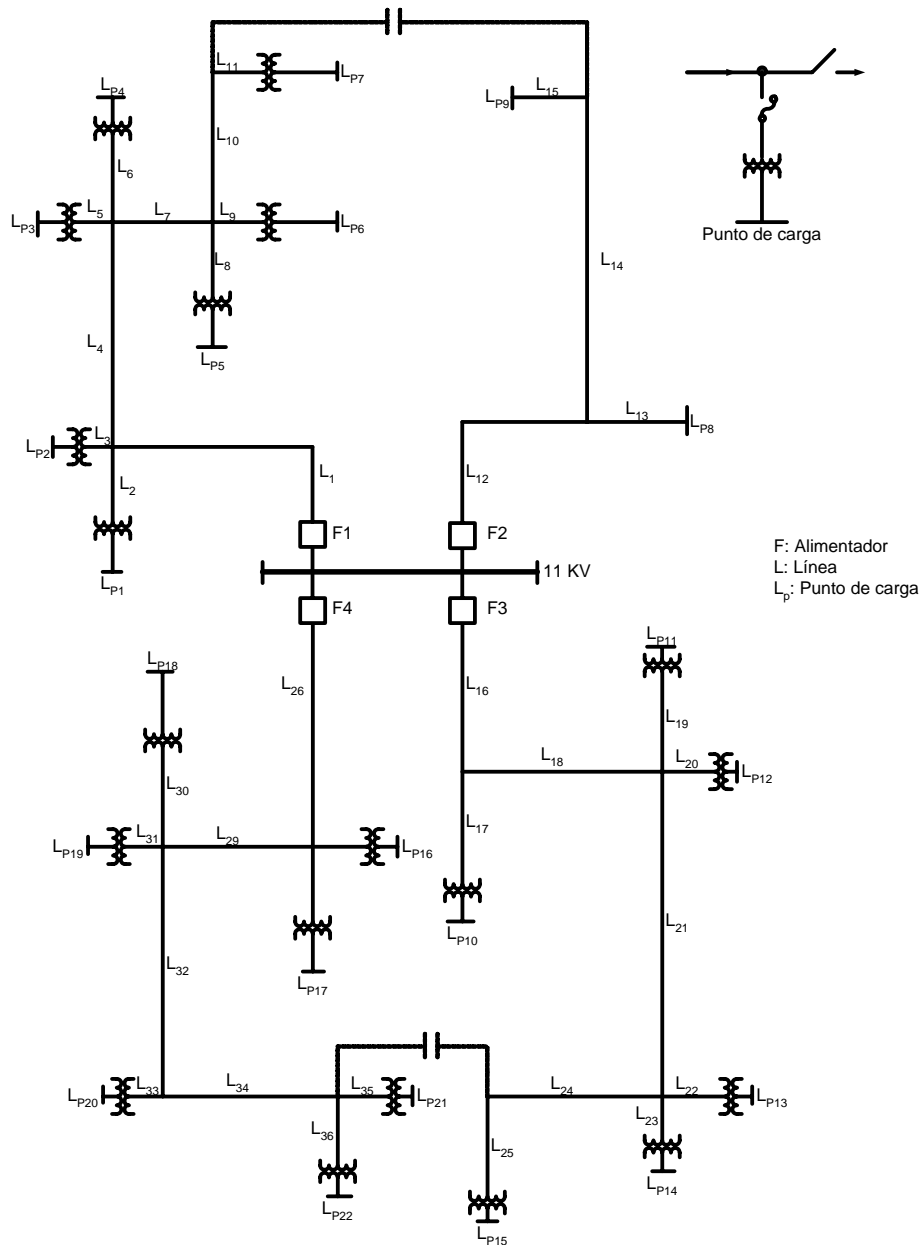


Figura 5.5 Red de distribución radial (3er alimentador de la Figura 5.4)

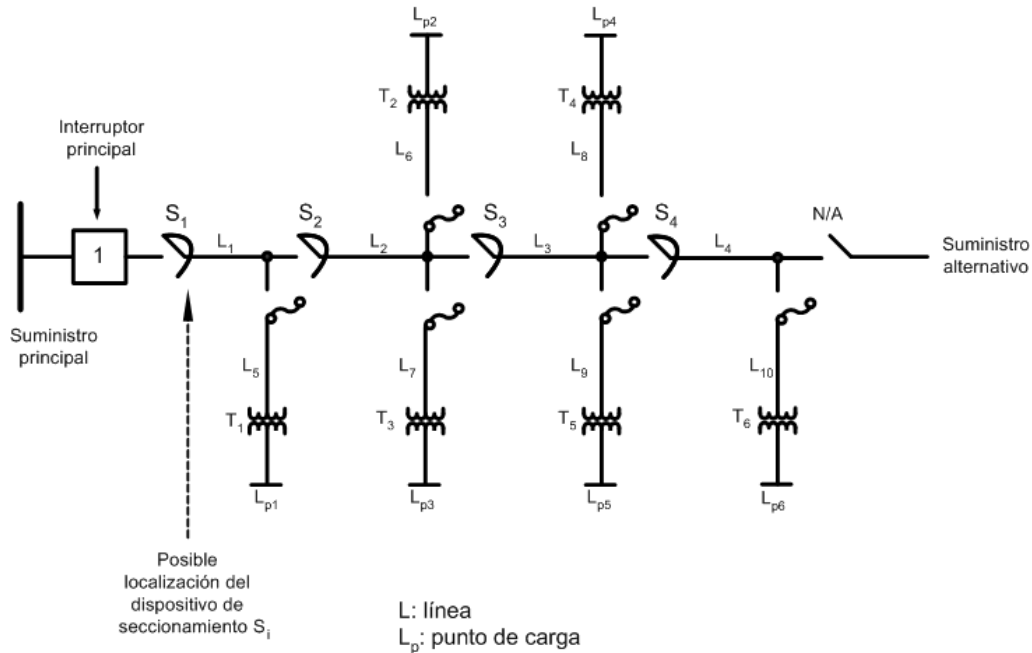
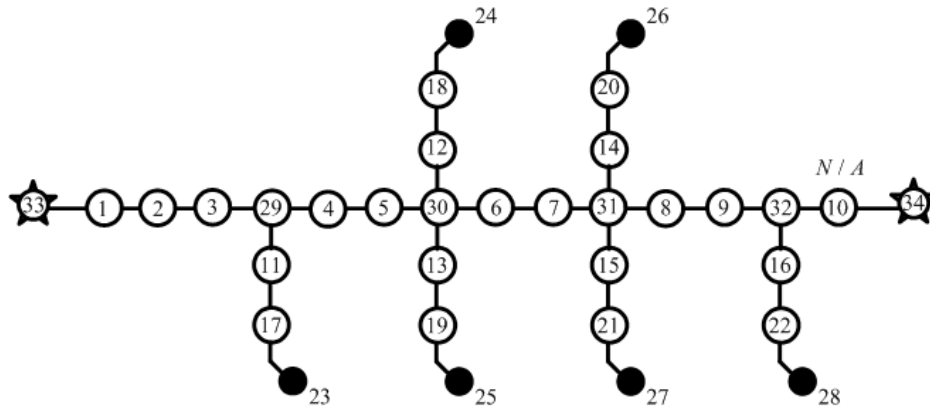


Figura 5.6 Grafo modelador de la Figura 5.5



Esta red de prueba se considera sin suministro alternativo. Se observa que cuenta con 4 secciones de líneas principales, 6 laterales con sus respectivos transformadores, 4 posibles localizaciones de dispositivos de seccionamiento, 6 puntos de carga, y su interruptor general. Note que la red tiene 4 posibles localizaciones ( $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  y  $S_4$ ) en las cuales podrá colocarse algún dispositivo de seccionamiento (cuchilla desconectadora o restaurador), se pueden observar en el grafo modelador con los números 2, 4, 6 y 8.

Los datos necesarios para poder realizar los cálculos de la confiabilidad y rentabilidad del sistema se dan en las Tablas 5.22-5.27 [76], (los datos para la evaluación económica se toman de las Tablas 5.1 y 5.6). Los datos del algoritmo genético se observan en la Tabla 5.7. En la Tabla 5.5 se muestra los datos para la curva de daño al consumidor para los diferentes sectores, gráficamente ilustrado en la Figura 5.3.

**Tabla 5.22 Cargas máximas para el sistema de estudio 2, caso 1**

Tipo de usuario	Carga Máxima MW
	Sistema de Prueba RBTS Bus 2
Residencial	7.25
Pequeños Usuarios	3.50
Instituciones gubernamentales	5.55
Comercial	3.70
Total	20.0

**Tabla 5.23 Tipo de alimentador y longitudes para el sistema de estudio 2, caso 1**

Tipo de alimentador	Longitud (Km.)	Número de las secciones
1	0.60	2, 6, 10, 14, 17, 21, 25, 28, 30, 34
2	0.75	1, 4, 7, 9, 12, 16, 19, 22, 24, 27, 29, 32, 35
3	0.80	3, 5, 8, 11, 13, 15, 18, 20, 23, 26, 31, 33, 36

**Tabla 5.24 Datos de los consumidores para el sistema de estudio 2, caso 1**

Número de puntos de carga	Puntos de carga	Tipo de usuarios	Niveles de carga por cada punto de carga en MW		Número de usuarios
			Promedio	Máximo	
5	1-3, 10, 11	Residencial	0.535	0.8668	210
4	12, 17-19	Residencial	0.450	0.7291	200
1	8	Pequeño U.	1.00	1.6279	1
1	9	Pequeño U.	1.15	1.8721	1
6	4, 5, 12, 14, 20, 21	Inst. Gub.	0.566	0.9167	1
5	6, 7, 15, 16, 22	Comercial	0.454	0.7500	10
Total			12.291	20.00	1908

**Tabla 5.25 Datos de carga para el sistema de estudio 2, caso 1**

Número del alimentador	Puntos de carga	Carga por alimentador en MW		Número de usuarios
		Promedio	Máximo	
F1	1-7	3.645	5.934	652
F2	8-9	2.15	3.500	2
F3	10-15	3.106	5.057	632
F4	16-22	3.390	5.509	622
Total		12.291	20.00	1908

**Tabla 5.26 Datos individuales de los componentes en el sistema de estudio 2, caso 1**

Componente	Tasa de falla $\lambda$ (fallas/Km./año)	Tiempo de reparación r (hrs.)
Alimentador principal	0.065	5.0
Laterales primarios	0.163	2.0



**Tabla 5.27 Parámetros de confiabilidad del sistema de estudio 2, caso 1**

<b>Sección de línea</b>	<b>Tasa de falla <math>\lambda</math> (fallas/año)</b>	<b>Tiempo de reparación <math>r</math> (hrs.)</b>
Interruptor general	0.006	4
<b>Sección principal</b>		
1	0.049	5.0
2	0.052	5.0
3	0.039	5.0
4	0.049	5.0
<b>Sección lateral</b>		
5	0.098	2.0
6	0.122	2.0
7	0.130	2.0
8	0.122	2.0
9	0.130	2.0
10	0.098	2.0

Los resultados de la optimización del segundo sistema de prueba (caso 1) se pueden apreciar en las Tablas 5.28-5.33. Se toma a la generación 0, generación 1 y a la generación 50, esto para mostrar la mejoría de las aptitudes de la población inicial con la final.

En las Tablas 5.28 y 5.29 se pueden observar los reportes de la generación 1 y 50 respectivamente (para el sistema de estudio 2 caso 1), en donde se pueden observar los individuos (cromosomas) en forma lógica y binaria, así también su respectivo costo de inversión inicial de dicho proyecto.

En las Tablas 5.30 y 5.31 se pueden observar los datos de las poblaciones en las generaciones 0 y 50 respectivamente. Se puede observar la mejoría entre dichas poblaciones.

Reacomodando los datos de la Tabla 5.29 obtenemos la Tabla 5.32, en la cual se realiza la elección del proyecto que mejor convenga. De la tabla se puede observar que la mejor solución es el individuo 0220, que es el que tiene el valor de aptitud mayor, así también las demás posibles soluciones con sus respectivos costos de inversión. En la Tabla 5.33 se puede observar la información que proporciona cada cromosoma con respecto al sistema de estudio 2 del caso 1. Se puede ver en cada proyecto la colocación de los dispositivos en la sección principal de la red, la cantidad y el tipo de dispositivos. En esta tabla se puede interpretar que la parte más débil se encuentra en la localización 2 y 3 en la sección principal de la red ( $S_2$  y  $S_3$ ).



**Tabla 5.28 Reporte de la generación 1(sistema de estudio 2 caso 1)**

<b>Cadenas Lógicas</b>	<b>Aptitud</b>	<b>Cadenas binarias</b>	<b>Costo de inversión</b>	
1 FTTTTFTT	123.0000	3.680873	1 2 1 2	171342
2 FTTFTTTT	111.0000	3.746866	1 1 2 2	176757
3 FFFTTTTT	31.00000	4.671969	0 1 2 2	141757
4 TTFTTTTT	223.0000	3.490174	2 1 2 2	189757
5 TTTFTTFF	236.0000	4.671969	2 1 2 0	141757
6 FTFTTTFT	93.00000	4.044313	1 1 2 1	163757
7 FTTTTFTF	122.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
8 FTTTTFTT	123.0000	3.680873	1 2 1 2	171342
9 FTTTFTF	58.00000	5.113319	0 2 1 1	123342
10 FTFTTTTF	94.00000	4.044313	1 1 2 1	163757
11 TFTTFTTF	182.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
12 FFFTTTTT	31.00000	4.671969	0 1 2 2	141757
13 TTFTTTFF	220.0000	4.671969	2 1 2 0	141757
14 FTTFTTFT	109.0000	4.044313	1 1 2 1	163757
15 TTFTTTFF	172.0000	5.143675	1 1 2 0	128757
16 TFTTTFTF	186.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
17 FTTFTTTF	46.00000	5.143675	0 1 2 1	128757
18 FTFTFFFT	81.00000	2.028955	1 1 0 1	110455
19 FFFTTTTF	26.00000	5.209876	0 1 1 1	110301
20 FTTTTTTF	126.0000	4.062941	1 2 2 1	176798
21 TFTTTTFT	185.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
22 FTTTTTTT	63.00000	4.640366	0 2 2 2	154798
23 TTTTTTTT	255.0000	3.542048	2 2 2 2	202798
24 TFTTTTFT	185.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
25 FTTFTTTT	111.0000	3.746866	1 1 2 2	176757
26 FFTTFTTT	55.00000	4.625775	0 2 1 2	136342
27 FTTTTTTF	126.0000	4.062941	1 2 2 1	176798
28 FTTTFTTF	58.00000	5.113319	0 2 1 1	123342
29 FTTTFTF	58.00000	5.113319	0 2 1 1	123342
30 TFFFTTFT	141.0000	3.401949	1 0 2 1	128798
31 TTFTTTFT	173.0000	4.044313	1 1 2 1	163757
32 FTFTTTFF	92.00000	5.143675	1 1 2 0	128757
33 TFTTTTTT	191.0000	3.784655	1 2 2 2	189798
34 FTTTTTTF	126.0000	4.062941	1 2 2 1	176798
35 TTTFTTFT	237.0000	3.746866	2 1 2 1	176757
36 TTTFTTFT	237.0000	3.746866	2 1 2 1	176757
37 TTTFTTFF	236.0000	4.671969	2 1 2 0	141757
38 FTTTTTFT	121.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
39 TTTTTTTT	255.0000	3.542048	2 2 2 2	202798
40 TFFFTTFT	77.00000	3.401949	1 0 2 1	128798
41 TTTTTTFT	253.0000	3.784655	2 2 2 1	189798
42 FTTTFTFF	116.0000	5.113319	1 2 1 0	123342
43 FTFTTTTT	95.00000	3.746866	1 1 2 2	176757
44 TTTTFTTF	250.0000	3.680873	2 2 1 1	171342
45 TTTTFTFF	248.0000	4.625775	2 2 1 0	136342
46 FTFTTTFT	93.00000	4.044313	1 1 2 1	163757
47 FTTTTF	126.0000	4.062941	1 2 2 1	176798
48 FTTTTF	124.0000	5.065789	1 2 2 0	141798
49 TTTFTTFT	235.0000	3.354650	2 1 1 2	171301
50 FTTTTF	121.0000	3.983074	1 2 1 1	158342

Tabla 5.29 Reporte de la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 1)

Cadenas Lógicas	Aptitud	Cadenas binarias	Costo de inversión	
1 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
2 FFFT TTTFF	61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
3 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
4 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
5 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
6 TFFT TTTFF	188.0000	1.013161	1 2 2 0	141798
7 FFFT TTTFF	44.00000	0.9346361	0 1 2 0	93757
8 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
9 FFFT TTTFF	44.00000	0.9346361	0 1 2 0	93757
10 FFFT TTTFF	62.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
11 FFFT TTTFF	62.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
12 FFFT TTTFF	29.00000	0.6805748	0 1 2 1	128757
13 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
14 FFFT TTTFF	30.00000	0.6805748	0 1 2 1	128757
15 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
16 TTTT TTTFF	253.0000	0.7569332	2 2 2 1	189798
17 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
18 TFFT TTTFF	188.0000	1.013161	1 2 2 0	141798
19 TFFT TTTFF	188.0000	1.013161	1 2 2 0	141798
20 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
21 FFFT TTTFF	45.00000	0.6805748	0 1 2 1	128757
22 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
23 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
24 FFFT TTTFF	63.00000	0.9280757	0 2 2 2	154798
25 FFTT TTTFF	116.0000	0.4542301	1 2 1 0	123342
26 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
27 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
28 FFFT TTTFF	61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
29 FFFT TTTFF	29.00000	0.6805748	0 1 2 1	128757
30 FFTT TTTFF	126.0000	0.8125904	1 2 2 1	176798
31 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
32 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
33 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
34 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
35 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
36 FFFT TTTFF	61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
37 TFFT TTTFF	153.0000	0.0000+00	1 1 1 1	145301
38 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
39 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
40 FFFT TTTFF	61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
41 FFFT TTTFF	44.00000	0.9346361	0 1 2 0	93757
42 FFFT TTTFF	62.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
43 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
44 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
45 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
46 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
47 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
48 FFFT TTTFF	61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
49 TFFT TTTFF	188.0000	1.013161	1 2 2 0	141798
50 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798

**Tabla 5.30 Datos de la población en la generación 0 (sistema de estudio 2 caso 1)**

<b>Generación 0</b>	
Valor máximo de aptitud de la población inicial	0.8125904E+00
Valor promedio de aptitud de la población inicial	0.5094280E+00
Valor mínimo de aptitud de la población inicial	0.3269819E+00
Sumatoria de aptitud de la población inicial	0.1069799E+02

**Tabla 5.31 Datos de la población en la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 1)**

<b>Generación 50</b>	
Valor máximo de aptitud de la población	0.1345193E+01
Valor mínimo de aptitud de la población	0.4542301E+00
Valor promedio de aptitud de la población	0.1134918E+01
Sumatoria de aptitud de la población	0.5561097E+02

**Tabla 5.32 Tabla para la elección del proyecto de la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 1)**

<b>Frecuencia de cadenas</b>	<b>Cadenas Lógicas</b>	<b>Aptitud</b>	<b>Cadenas binarias</b>	<b>Costo de inversión</b>
26	FFTTTTFF 60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
8	FFTTTTFT 61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
4	TFTTTTTFF 188.0000	1.013161	1 2 2 0	141798
3	FFTF TTFF 44.00000	0.9346361	0 1 2 0	93757
4	FFFTTTFT 29.00000	0.6805748	0 1 2 1	128757
1	TTTTTTFT 253.0000	0.7569332	2 2 2 1	189798
1	FFTTTTTT 63.00000	0.9280757	0 2 2 2	154798
1	FTTTF TFF 116.0000	0.4542301	1 2 1 0	123342
1	FTTTTTTF 126.0000	0.8125904	1 2 2 1	176798
1	TFFTTF FT 153.0000	0.00000+00	1 1 1 1	145301

**Tabla 5.33 Datos de los cromosomas para el sistema de estudio 2 caso 1**

<b>\$ Costo de Inversión</b>	<b>RCB</b>	<b>Cromosomas</b>	<b>Dispositivos</b>	<b>Localización en la red</b>
106798	1.345193	0 2 2 0	2R	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
141798	1.013161	0 2 2 1	2R, 1C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
141798	1.013161	1 2 2 0	2R, 1C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
93757	0.9346361	0 1 2 0	1R, 1C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
128757	0.6805748	0 1 2 1	1R, 2C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
189798	0.7569332	2 2 2 1	3R, 1C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
154798	0.9280757	0 2 2 2	3R	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
123342	0.4542301	1 2 1 0	1R, 2C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
176798	0.8125904	1 2 2 1	2R, 2C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
145301	0.00000+00	1 1 1 1	4C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>

C= Cuchilla desconectadora

R = Restaurador





### 5.3.2 Caso de prueba No. 2

Se considera la red de distribución radial de la Figura 5.5 en este caso considerando el suministro alternativo. Como para todos los casos de prueba realizados anteriormente, se desea maximizar la confiabilidad en los nodos de carga del grafo modelador (para este caso ver Figura 5.6) y determinar que propuesta es la más rentable para un lapso de tiempo, aplicando métodos de evaluación económica (VPN, RBC, TIR).

Los datos para este caso de prueba son los mismos que se utilizaron en el caso anterior (Sistema de estudio 2 caso 1), los cuales se pueden observar en las Tablas 5.22-5.27, en donde se encuentran las cargas máximas, tipo de alimentador y longitudes, datos de los consumidores, datos de carga, datos individuales de los componentes y parámetros de confiabilidad del sistema de estudio 2.

Para la evaluación económica se utilizaron los datos que se encuentran en las Tablas 5.1 (precios de los dispositivos de seccionamiento y su mano de obra), Tabla 5.6 (costos). Como en el caso anterior (sistema de estudio 2 caso 1) el KW promedio y máximo se localizan en las Tablas 5.24 y 5.25. Para la curva compuesta de daño al consumidor se toman en cuenta los datos de la Tabla 5.5, su gráfica se observa en la Figura 5.3.

En las Tablas 5.34-5.39 se observan los resultados obtenidos por el programa. De acuerdo a los resultados de la Tabla 5.39 el cromosoma o sistema que ofrece una mayor relación costo beneficio (valor de aptitud más alto) es 0220, de modo que colocando dos restauradores en la ubicación  $S_2$  y  $S_3$  de la sección principal se mejorará la confiabilidad de la red.

**Tabla 5.34 Reporte de la generación 1(sistema de estudio 2 caso 2)**

<b>Cadenas Lógicas</b>	<b>Aptitud</b>	<b>Cadenas binarias</b>	<b>Costo de inversión</b>	
1 FTTTTFTT	123.0000	3.680873	1 2 1 2	171342
2 FTTFTTTT	111.0000	3.746866	1 1 2 2	176757
3 FFFTTTTT	31.00000	4.671969	0 1 2 2	141757
4 TTFTTTTT	223.0000	3.490174	2 1 2 2	189757
5 TTFFTTFF	236.0000	4.671969	2 1 2 0	141757
6 FTFTTFTT	93.00000	4.044313	1 1 2 1	163757
7 FTTFFTTF	122.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
8 FTTFFTTT	123.0000	3.680873	1 2 1 2	171342
9 FFTTFTTF	58.00000	5.113319	0 2 1 1	123342
10 FTFTTTTT	94.00000	4.044313	1 1 2 1	163757
11 TFTTFTTF	182.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
12 FFFTTTTT	31.00000	4.671969	0 1 2 2	141757
13 TTFTTTTF	220.0000	4.671969	2 1 2 0	141757
14 FTTFTTTT	109.0000	4.044313	1 1 2 1	163757
15 TTFFTTFF	172.0000	5.143675	1 1 2 0	128757
16 TFTTTTTF	186.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
17 FFFTTTTT	46.00000	5.143675	0 1 2 1	128757
18 FTFTFFFF	81.00000	2.028955	1 1 0 1	110455
19 FFFTTTTF	26.00000	5.209876	0 1 1 1	110301
20 FTTFTTTT	126.0000	4.062941	1 2 2 1	176798
21 TFTTTTTF	185.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
22 FFTTTTTT	63.00000	4.640366	0 2 2 2	154798
23 TTTTTTTT	255.0000	3.542048	2 2 2 2	202798
24 TFTTTTFF	185.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
25 FTTFTTTT	111.0000	3.746866	1 1 2 2	176757
26 FFTTFTTT	55.00000	4.625775	0 2 1 2	136342
27 FTTFTTTT	126.0000	4.062941	1 2 2 1	176798
28 FFTTTTTF	58.00000	5.113319	0 2 1 1	123342
29 FFTTTTTF	58.00000	5.113319	0 2 1 1	123342
30 TFFFTTTT	141.0000	3.401949	1 0 2 1	128798
31 TTFTTTTT	173.0000	4.044313	1 1 2 1	163757
32 FTFTTTTT	92.00000	5.143675	1 1 2 0	128757
33 TFTTTTTT	191.0000	3.784655	1 2 2 2	189798
34 FTTFTTTT	126.0000	4.062941	1 2 2 1	176798
35 TTTFTTTF	237.0000	3.746866	2 1 2 1	176757
36 TTTFTTTF	237.0000	3.746866	2 1 2 1	176757
37 TTTFTTTF	236.0000	4.671969	2 1 2 0	141757
38 FTTFTTFF	121.0000	3.983074	1 2 1 1	158342
39 TTTTTTTT	255.0000	3.542048	2 2 2 2	202798
40 TFFFTTTT	77.00000	3.401949	1 0 2 1	128798
41 TTTTTFTT	253.0000	3.784655	2 2 2 1	189798
42 FTTFTTTT	116.0000	5.113319	1 2 1 0	123342
43 FTFTTTTT	95.00000	3.746866	1 1 2 2	176757
44 TTTTTFTF	250.0000	3.680873	2 2 1 1	171342
45 TTTTTFFF	248.0000	4.625775	2 2 1 0	136342
46 FTFTTTTF	93.00000	4.044313	1 1 2 1	163757
47 FTTFTTTT	126.0000	4.062941	1 2 2 1	176798
48 FTTFTTTT	124.0000	5.065789	1 2 2 0	141798
49 TTTFTTFT	235.0000	3.354650	2 1 1 2	171301
50 FTTFTTFF	121.0000	3.983074	1 2 1 1	158342

**Tabla 5.35 Reporte de la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 2)**

<b>Cadenas Lógicas</b>	<b>Aptitud</b>	<b>Cadenas binarias</b>	<b>Costo de inversión</b>	
1 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
2 FFFT TTTFF	61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
3 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
4 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
5 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
6 TFFT TTTFF	188.0000	1.013161	1 2 2 0	141798
7 FFFT FT TFF	44.00000	0.9346361	0 1 2 0	93757
8 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
9 FFFT FT TFF	44.00000	0.9346361	0 1 2 0	93757
10 FFFT TTTTF	62.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
11 FFFT TTTTF	62.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
12 FFFT TTTFT	29.00000	0.6805748	0 1 2 1	128757
13 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
14 FFFT TTTTF	30.00000	0.6805748	0 1 2 1	128757
15 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
16 TTT TTTFT	253.0000	0.7569332	2 2 2 1	189798
17 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
18 TFFT TTTFF	188.0000	1.013161	1 2 2 0	141798
19 TFFT TTTFF	188.0000	1.013161	1 2 2 0	141798
20 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
21 FFFT TTTFT	45.00000	0.6805748	0 1 2 1	128757
22 FFFT TTTTF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
23 FFFT TTTTF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
24 FFFT TTTTT	63.00000	0.9280757	0 2 2 2	154798
25 FT T T FT FF	116.0000	0.4542301	1 2 1 0	123342
26 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
27 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
28 FFFT TTTFT	61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
29 FFFT TTTFT	29.00000	0.6805748	0 1 2 1	128757
30 FT T T T T TF	126.0000	0.8125904	1 2 2 1	176798
31 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
32 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
33 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
34 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
35 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
36 FFFT TTTFT	61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
37 TFFT TFFT	153.0000	0.0000+00	1 1 1 1	145301
38 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
39 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
40 FFFT TTTFT	61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
41 FFFT FT TFF	44.00000	0.9346361	0 1 2 0	93757
42 FFFT TTTTF	62.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
43 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
44 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
45 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
46 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
47 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
48 FFFT TTTFT	61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
49 TFFT TTTFF	188.0000	1.013161	1 2 2 0	141798
50 FFFT TTTFF	60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798

**Tabla 5.36 Datos de la población en la generación 0 (sistema de estudio 2 caso 2)**

<b>Generación 0</b>	
Valor máximo de aptitud de la población inicial	0.8125904E+00
Valor promedio de aptitud de la población inicial	0.5094280E+00
Valor mínimo de aptitud de la población inicial	0.3269819E+00
Sumatoria de aptitud de la población inicial	0.1069799E+02

**Tabla 5.37 Datos de la población en la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 2)**

<b>Generación 50</b>	
Valor máximo de aptitud de la población	0.1345193E+01
Valor mínimo de aptitud de la población	0.4542301E+00
Valor promedio de aptitud de la población	0.1134918E+01
Sumatoria de aptitud de la población	0.5561097E+02

**Tabla 5.38 Tabla para la elección del proyecto de la generación 50 (sistema de estudio 2 caso 2)**

<b>Frecuencia de cadenas</b>	<b>Cadenas Lógicas</b>	<b>Aptitud</b>	<b>Cadenas binarias</b>	<b>Costo de inversión</b>
26	FFTTTTF 60.00000	1.345193	0 2 2 0	106798
8	FFTTTTF 61.00000	1.013161	0 2 2 1	141798
4	TFTTTTF 188.0000	1.013161	1 2 2 0	141798
3	FFFTTTF 44.00000	0.9346361	0 1 2 0	93757
4	FFFTTTF 29.00000	0.6805748	0 1 2 1	128757
1	TTTTTTF 253.0000	0.7569332	2 2 2 1	189798
1	FFTTTTT 63.00000	0.9280757	0 2 2 2	154798
1	FTTTF 116.0000	0.4542301	1 2 1 0	123342
1	FTTTTF 126.0000	0.8125904	1 2 2 1	176798
1	TFFTTF 153.0000	0.00000+00	1 1 1 1	145301

**Tabla 5.39 Datos de los cromosomas para el sistema de estudio 2 caso 2**

<b>\$ Costo de Inversión</b>	<b>RCB</b>	<b>Cromosomas</b>	<b>Dispositivos</b>	<b>Localización En la red</b>
106798	1.345193	0 2 2 0	2R	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
141798	1.013161	0 2 2 1	2R, 1C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
141798	1.013161	1 2 2 0	2R, 1C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
93757	0.9346361	0 1 2 0	1R, 1C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
128757	0.6805748	0 1 2 1	1R, 2C	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
189798	0.7569332	2 2 2 1	3R, 1C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
154798	0.9280757	0 2 2 2	3R	S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
123342	0.4542301	1 2 1 0	1R, 2C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub>
176798	0.8125904	1 2 2 1	2R, 2C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>
145301	0.00000+00	1 1 1 1	4C	S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>

C= Cuchilla desconectadora

R = Restaurador



# CAPÍTULO VI

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

### 6.1 INTRODUCCIÓN

En esta tesis se presenta la metodología para optimizar al sistema de distribución tipo radial, la cual consiste en mejorar la confiabilidad del sistema por medio de la reducción del tiempo de interrupción a los usuarios (conocido en México como TIU), por medio de la selección y localización óptima de dispositivos de seccionamiento en la sección principal de la red (cuchillas desconectadoras y restauradores), obteniendo de ello, mejores parámetros y por ende mejores índices de confiabilidad a un costo de inversión más bajo, con respecto a un conjunto de posibles soluciones, empleando para ello técnicas de evaluación económica (se utilizaron las más empleadas: VPN, TIR y RCB). Logrando con esto un balance entre la inversión de la compañía suministradora de energía y una mejor continuidad del servicio al cliente.

Utilizando la técnica de búsqueda directa y de bisección [4,34], la única diferencia es que en esos trabajos se emplearon solo interruptores en la sección principal de la red. En dichos trabajos se observa que ambas técnicas llagan al mismo resultado y que ambas son eficientes, siempre y cuando el tamaño de la red no sea muy grande. De lo contrario, el tiempo empleado para resolver el problema utilizando la técnica de búsqueda directa será considerable en comparación del tiempo que llevara la técnica de bisección. Analizando una red con 4 secciones de línea, la búsqueda directa empleo 5 iteraciones mientras la búsqueda por bisección solo tomo 2 iteraciones.

Estas dos técnicas son superadas por el algoritmo genético presentado en este trabajo, debido que los resultados obtenidos utilizando las dos técnicas antes descritas resuelven el problema considerando un sistema base fijo con el que se compararán el resto de las posibles soluciones encontrando así a la mejor solución pero tomando solo un sistema base. De tal manera que si se quisiera encontrar a la mejor solución tomando a las demás cadenas como cadenas base, el cálculo aumentaría significativamente ya que para cada diferente cadena que fuera considerada como base se tendría un tiempo de computo que sería acumulativo.

Esta última consideración lo toma en cuenta el algoritmo genético, de tal manera que además de considerar dos posibles dispositivos de desconexión, las cadenas base van cambiando de generación en generación obteniendo de esta manera a la mejor solución entre las mejores soluciones, con un tiempo de cálculo similar al que le tomaría a la búsqueda por bisección considerando solo interruptores.



## 6.2 CONCLUSIONES

- De los resultados obtenidos mediante la técnica de computación evolutiva (Algoritmos Genéticos), implementada en un programa digital, se optimiza la confiabilidad de redes de distribución por medio de la selección y localización de dispositivos de seccionamiento, mediante la incorporación de la rentabilidad del sistema.
- El tiempo de cómputo que toma el algoritmo para realizar el análisis de confiabilidad y rentabilidad de la red bajo estudio, varía proporcionalmente de acuerdo a varios factores como por ejemplo el tamaño del sistema, y datos del algoritmo como la máxima generación, tamaño de la población, etc.
- La selección y localización óptima de dispositivos de seccionamiento es de interés para el ingeniero en planeación ya que ofrece una mayor confiabilidad en el sistema por medio de la reducción del tiempo de interrupción a los usuarios, lo cual reduce gastos a la compañía ocasionados por fallas en la red, ofreciendo también una mejor operación de la misma.
- De las simulaciones realizadas a diferentes redes de distribución tipo radial se observa que conforme aumenta el número de dispositivos de seccionamiento en la red, la confiabilidad varía proporcionalmente, así como la inversión que ocasionaría la instalación de dichos dispositivos, observando que al mejorar la confiabilidad por medio de la colocación de los dispositivos, el costo por interrupción a clientes decrece significativamente (aunque no siempre se garantiza este comportamiento). Teniendo así, una amplia gama de soluciones para la optimización de la red, que al tomar en cuenta la rentabilidad de cada solución y la topología de la red, se torna en un problema combinatorio, no lineal entero.
- Cabe notar la diferencia de resultados al analizar las redes, con y sin suministro alterno. Al considerar suministro alterno se obtienen mejores índices de confiabilidad (SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI) en el sistema, teniendo una mayor continuidad del servicio a los nodos de carga, proporcionando una solución que requiere menos dispositivos de seccionamiento, lo cual disminuirá el costo de inversión.
- De los resultados obtenidos por la metodología de optimización aplicada a los sistemas de prueba, se observa que el método de la relación costo beneficio (RCB) es el que determina que proyecto es el más rentable, ya que si se toman los métodos del VPN y la TIR como los que determinen la rentabilidad de la red, se pueden obtener resultados subóptimos. Por lo que estos dos últimos métodos se emplearon más como indicadores.



- El programa desarrollado puede realizar el análisis de confiabilidad y rentabilidad para cualquier red de distribución, siempre que esta sea de tipo radial o mallada (pero que sea operada como un sistema radial).
- El algoritmo genético permite encontrar a la mejor solución, permitiendo a las cadenas “débiles” mejorar de generación en generación, de tal manera que se pueda explorar de mejor manera el espacio de búsqueda y para garantizar que se obtendrán resultados positivos, de tal manera que se evita que el programa quede atrapado en un óptimo local, que se pierda información de manera rápida y que la exploración del espacio muestral no sea en su totalidad.
- El algoritmo permite elegir de una gama de posibles soluciones a la que satisfaga varias características requeridas, como por ejemplo: un límite económico de inversión, parámetros e índices de confiabilidad. De tal manera que si un proyecto es el mas rentable puede ser que se pase del capital de inversión considerado, descartando de esta manera a ese proyecto pero eligiendo otro que proporcione buenos niveles de confiabilidad a un costo menor de inversión.
- Los resultados obtenidos en trabajos anteriores permiten observar que las técnicas de búsqueda directa y de bisección son eficientes para sistemas pequeños, pero si se consideran sistemas complejos la técnica de bisección es la más viable ya que ahorra tiempo de cómputo.
- En el tipo de problema planteado en esta tesis el algoritmo genético resulta una muy buena opción a comparación de las otras dos técnicas. Ya que permite considerar diferentes tipos de dispositivos de desconexión y realiza la búsqueda en un tiempo de cómputo considerable tomando en cuenta que realiza la comparación de todas las posibles soluciones involucrando a varias de ellas como base, encontrando así a la mejor de las mejores soluciones. Así pues, se optimiza la confiabilidad y selecciona al mejor proyecto considerando para ello un análisis de rentabilidad.

### **6.3 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS**

- Desarrollar un programa que realice el análisis de confiabilidad y rentabilidad considerando un sistema mallado o que contenga componentes en paralelo.
- Realizar el mismo tipo de análisis (de confiabilidad y rentabilidad) para sistemas subterráneos y realizar un comparativo con los sistemas aéreos. Permitted Justificar de esta manera la inversión para un proyecto de cualquiera de estos dos tipos.



- Mejorar la confiabilidad en una red de distribución radial por medio de un análisis de sensibilidad, perturbando a los parámetros: tiempo promedio de reparación y/o tiempo promedio de switcheo, considerando además otras decisiones para mejorar la confiabilidad como el reemplazo de cables o disminución de claros entre torres, etc.
- Considerar en el análisis otros factores que permitan mejorar la confiabilidad (considerando también sus respectivos costos) dispositivos automáticos, centros de despacho colocados estratégicamente para un rápido restablecimiento del sistema, almacenamiento de repuestos, mantenimientos preventivos.
- Considerar la diversidad de dispositivos de desconexión en las ramas laterales de la red, mejorando aun más la confiabilidad y dando más diversidad en la búsqueda de la mejor solución.
- Considerar en la evaluación de la confiabilidad un análisis de flujo carga
- Realizar un análisis de rentabilidad considerando inversiones previstas y no previstas, durante el periodo de realización del proyecto, es decir que no se considere un solo costo al inicio del proyecto, además de considerar múltiples tasas de rendimiento.
- Considerar en el análisis económico el almacenamiento de repuestos (considerando la probabilidad de operación de los componentes y su vida útil) utilizando técnicas de optimización para decidir el número óptimo de repuestos requeridos y donde colocarlos.
- Considerar en la evaluación económica otros aspectos como por ejemplo: el costo de la colocación de fusibles en los laterales, mantenimiento de las cuchillas, reemplazo de cables, costos para automatizar el sistema, etc.
- Analizar sistemas reales con sus respectivos datos estadísticos y costos.
- Emplear un algoritmo colaborativo como programa principal o como mecanismo de búsqueda en el genético para realizar la optimización
- Utilizar otros mecanismos de selección y cruzamiento en el algoritmo genético, como el cruzamiento de punto doble, selección por elitismo, etc.
- Realizar con el algoritmo genético un algoritmo híbrido, como por ejemplo: genético-difuso, que permita realizar la búsqueda de la mejor solución de manera más rápida, además de hacer más robusto al algoritmo.



---

---

## REFERENCIAS

- [1] Hillier S. F. and Lieberman J. G., *Introduction to Operations Research*, McGraw-Hill 1991.
- [2] Wacker, G., and Billinton, R., *Customer Cost of Electric Service Interruptions*, IEEE, Vol. 77, No. 6, June 1989.
- [3] Billinton, R., and Jonnavithula, S., *Optimal Switching Device Placement in Radial Distribution Systems*, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, no. 3, July 1996, pp. 1646-1651.
- [4] Rogelio Díaz Flores. Selección y Localización Optima de Dispositivos de Desconexión en la Planeación de Sistemas de Distribución radiales. Tesis de Maestria. Marzo 2004. SEPI ESIME-IPN.
- [5] Gaver, D. P., Montmeat, F. E., 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.
- [6] 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.
- [7] Billinton, R., Bollinger, K., *Transmission Systems Reliability Evaluation Using Markov Processes*, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-87, 1968, pag. 538-547.
- [8] Grover, M. S., Billinton, R., *A Computerised Approach to Substation and Switching Station Reliability Evaluation*, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93, 1974, pag. 1488-1497.
- [9] Billinton, R., Grover, M. S., *Reliability assessment of Transmission and Distribution Systems*, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, 1975, Pag. 724-732.
- [10] Billinton, R., Grover, M. S., *Qualitative Evaluation of Permanent Outages in Distribution Systems*, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-94, 1975, pag. 733-741

- 
- 
- [11] Billinton, R., Grover, M. S., *Reliability Evaluation in Distribution and Transmission Systems*, Proceedings of the IEE, Vol. 122, No. 5, May 1975, pag. 517-523.
- [12] Allan, R. N., Billinton, R., De Oliveira, M. F., *Reliability Evaluation of Electrical Systems with Switching Actions*, Proceedings of the IEE, Vol. 123, No. 5, April 1976, pag. 325-330.
- [13] Silva, D., L., Cassula, A. M., Billinton, R. and Manso, L. A. F., *Integrated Reliability Evaluation of Generation, Transmission and Distribution Systems*, IEEE, Vol. 149, No.1, January 2002, pp.1-6.
- [14] IEEE Working Group on System Design, *Trial Use Guide for Power Distribution Reliability Indices*, Repot P1366, IEEE, 1995.
- [15] R. Billinton, and S. Jonnavitihula, “A Test System for Teaching Overall Power System Reliability Assessment”, IEEE/PES 1996 Winter Meeting, Baltimore, MD, IEEE, 1996.
- [16] J. C. O. Mello, M. V. F. Pereira, and A. M. Leite da Silva, “Evaluation of reliability Worth in Composite Systems Based on Pseudo-Sequential Monte Carlo Simulation”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 3, August 1994, pp. 1318-1326.
- [17] G. Tollefson, R. Billinton, G. Wacker, E. Chan and J. Aweya, “A Canadian Customer Survey to Assess Power System Reliability Worth”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, Feb. 1994, pp. 443-450.
- [18] Michael J. Sullivan, Terry Vardell, B. Noland Suddeth, and Ali Vojdani, “Interruption Costs, Customer Satisfaction and Expectations for Service Reliability”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 2, May 1996.
- [19] Allan R. and R. Billinton, “Power System Reliability and Its Assessment: Part 3, Distribution Systems and Economic Considerations”, Power Engineering Journal, August 1993.
- [20] R. E. Brown, S. Gupta, R. D. Christie, S. S. Venkata, and R. Fletcher, “Automated Primary Distribution System Design: Reliability and Cost Optimization”, IEEE Transactions on Power Systems, 1996.
- [21] Yifan Tang, “Power Distribution System Planning with Reliability Modeling and Optimization”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 1, February 1996.
- 
-

- 
- 
- [22] G. L. Nemhauser, and L. A. Wolser, “*Integer Programming and Combinatorial Optimization*”, Wiley, 1988.
- [23] L. Davis, *Genetic Algorithms and Simulated Annealing*, Morgan Kauffmann Publishers, Inc., 1987.
- [24] V. 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, Nov. 1994, pp. 1927-1933.
- [25] 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.
- [26] E. C. Yeh, S. S. Venkata, and Z. Sumic, “*Improved Distribution System Planning Using Computational Evolution*”, Proceedings of 1995 IEEE Power Industry Computer Applications Conference, IEEE, May, 1995, pp. 530-536.
- [27] David E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [28] 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.
- [29] W. Kuo and V. R. Prasad, “*An Annotated Overview of System-Reliability Optimization*”, IEEE Trans. Reliability, Vol. 49. No. 2. June 2000, pp. 176-187.
- [30] L. Goel and R. Billington, “*Determination of Reliability Worth for Distribution System Planning*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, July 1994, pp. 1577-1583.
- [31] K. Nara, T. Satoh, H. Kuwabara, K. Aoki, M. Kitagawa, and T. Ishihara, “*Distribution System Expansion Planning by Multi-Stage Branch Exchange*”, IEEE Transactions on Power System, Vol. 7, No. 1, Feb. 1992, pp. 208-214.
- [32] J. R. Ochoa, and D. L. Garrison, “*Application of Reliability Criteria in Power System Planning*”, Proceedings of the American Power Conference, 1994, pp. 1114-1120.
- [33] Z. Zumic, S. S. Venkata, and T. Pistoiese, “*Automated Underground Residential Distribution Design Part I: Conceptual Design*” and “*Automated Underground Residential Distribution Design Part II: Prototype Implementation and Results*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, Apr. 1993, pp. 637-650.
- 
-

- [34] Angel David Trujillo Hernández. Técnica de Enumeración para la Planeación en Sistemas de Distribución para la Localización Optima de dispositivos de Seccionamiento. Tesis Maestría. SEPI ESIME-IPN Diciembre 2004.
- [35] R.N Allan and R. Billinton “*Probabilistic methods applied to electric power systems- are they worth it?*”, IEE Power Engineering Journal, May 1992..
- [36] Fishman, G. S. (1996). Monte Carlo: Concepts, Algorithms and Applications, Springer-Verlag, New York.
- [37] Proceedings of Third International Conference on Probabilistic Methods Applied to Electric Power Systems (PMASPS 91), IEE Conf. Publ. 338, London, July 1991.
- [38] ANDERS, G. J. ‘Probability concepts in electric power systems’ (Wiley, New York, 1990).
- [39] BILLINTON, R. ‘Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation’, *IEEE Trans.*, 1972, **PAS-91**, pp. 649-660.
- [40] IEEE Subcommittee Report: ‘Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1971-1977’, *IEEE Trans.*, 1978, **PAS-97**, pp. 2235-2242.
- [41] ALLAN, R. N., BILLINTON, R., and LEE, S. H. ‘Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1977-1982’, *IEEE Trans.*, 1984, **PAS-103**, pp. 274-282.
- [42] ALLAN, R. N., BILLINTON, R., SHAHIDEHPOUR, S. M., and SINGH, C. ‘Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1982-1987’, *IEEE Trans.*, 1988, **PS-3**, pp. 1555-1564.
- [43] Brown, E. R., *Electric Power Distribution Reliability*, New York, Marcel Dekker Inc., 2002.
- [44] Billinton R., and Allan, N. R., *Reliability Evaluation of Power Systems*, Second Edition, University of Saskatchewan, Canada, Plenum Press, 1994.
- [45] Billinton, R., and Li, M., *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*, University of Saskatchewan, Canada, Plenum Press, 1994.
- [46] Osvaldo O. Oliverio y Oscar A. Castellanos. Teoria de la Confiabilidad Aplicada a los Sisitemas Eléctricos de Distribución. Tesis licenciatura UNAM 2000.

- [47] Power Systems Reliability Subcommittee of the Power Systems Engineering Committee of the IEEE Industry Applications Society, “*IEEE Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*”, IEEE Standards Board, Approved 16 December 1997.
- [48] Shooman, L. M., *Probabilistic Reliability: An Engineering Approach*, New York: McGraw-Hill, 1968.
- [49] Billinton, R., Wacker, G., Wojzynski, E., *Customer Damage Resulting from Electric Service Interruptions*, Canadian Electrical Association, R&D Project 907 U 131 Rep. (1982).
- [50] Billinton, R., Oteng-Adjei, J., Ghajar, R., “*Comparison of two alternate methods to establish an interrupted energy assessment rate*” IEEE Trans. Power Systems, 2 (1987), pp. 751-7
- [51] Billinton, R., Wacker, G., Wojzynski, E., *Customer Damage Resulting from Electric Service Interruptions*, Canadian Electrical Association, R&D Project 907 U 131 Rep. (1982).
- [52] Wacker, G., Billinton R., Brewer, R., *Farm Losses Resulting from Electric Service Interruptions*, Canadian Electric Association R&D Research Project 3409 U 403, May (1987).
- [53] T. W. Berrie, *Electricity Economics and Planning*, Meter Peregrinus Ltd., London 1992.
- [54] D. G. Newman, *Engineering Economic Analysis*, Engineering Press, Inc., 1983.
- [55] M. P. Reeser, *Introduction to Public Utility Accounting*, American Gas Association and the Edison Electric Institute, 1997.
- [56] Gómez Hernández J. A, J. Robles García J., Romero Romero D., “*Rentabilidad de proyectos de transmisión considerando la optimización de la confiabilidad*”, IEEE Sección México, RVP-AI/2002, 7 al 13 de Julio, Acapulco, Guerrero.
- [57] K. J. Arroz, *Proyectos de inversión*. EU, Ed. Stanford University, 2da. Edición, 1990.
- [58] N. Sapag Chain, *Preparación y evaluación de proyectos de inversión*. México, Ed. McGraw-Hill, 1995.
- [59] G. Urbina, *Evaluación de Proyectos*, México, Editorial McGraw-Hill, 1992.

- [60] R. Coss Bu, *Análisis y Evaluación de Proyectos de Inversión*, México, Editorial LIMUSA, 1996.
- [61] [www.gacetafinanciera.com](http://www.gacetafinanciera.com)
- [62] Engineering Committee, *Distribution System Reliability Engineering Guide*, Prepared by the CEA Distribution System Reliability. March 1976.
- [63] Dixon, G. F., Hammsersley, H., *Reliability and its Cost on Distribution Systems*, International Conference on Reliability of Power Supply Systems (1997), IEEE Conference Publication No. 148.
- [64] Canadian Electrical Association, *Distribution System Reliability Engineering Guide*, CEA publication (March 1976).
- [65] Electricity Council, *Reliability Engineering and Cost-Benefit Techniques for Use in Power System Planning and Design*, Electricity Council Research Memorandum, ECR/M966 (October 1976).
- [66] IEEE Committee Report, “*Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation*”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-91 (1972), pp. 649-60.
- [67] IEEE Committee Report, “*Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation, 1971-1977*”, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-97 (1978), pp. 2235-42.
- [68] J. A. Gómez Hernández, *Análisis de Confiabilidad de Subestaciones Eléctricas en Alta Tensión*, Tesis de Licenciatura, Instituto de Investigaciones Eléctricas. Instituto Tecnológico de Veracruz, Diciembre de 1994.
- [69] A. D. Trujillo Hernández, J. A. Gómez Hernández y G. Enríquez Harper, *Evaluación de la rentabilidad de sistemas de distribución radiales considerando la confiabilidad*, Publicación de artículo en RVP de la IEEE en Acapulco, Julio 2004.
- [70] J. A. Gómez Hernández y D. Romero Romero, *Índices Básicos de Confiabilidad en Sistemas de Distribución Radiales*, Artículo presentado en la reunión de verano de potencia, capítulo de potencia IEEE sección México, Acapulco, Gro., Julio de 1999.
- [71] G. B. Jasmon, O.S. Kai, *A New Technique in Minimal Path and Cutset Evaluation*, IEEE Transaction on Reliability, Vol. R-34, No. 2, June 1985.
- [72] Billinton, R., and Jonnavithula, S., *Optimal Switching Device Placement in Radial Distribution Systems*, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 11, no. 3, July 1996, pp. 1646-1651.

- [73] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley 1989.
- [74] L. Painto and J. Campbell, "Genetic Algorithms in Optimization of System Reliability," *IEEE Trans. on Reliability*, vol. 44, no. 2. June 1995.
- [75] A. K. De Jong. An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, PhD thesis, University of Michigan 1975.
- [76] R. N. Allan, R. Billinton, I. Sjarief, 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. 2, May 1991.
- [77] Roy Billinton and Peng Wang, "Teaching Distribution System Reliability Evaluation Using Montecarlo Simulation", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 2, May 1999.
- [78] Billinton, R., and Allan, R. N., *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*, Pitman Advanced Publishing Program, 1983.
- [79] J. J. Burke, *Power Distribution Engineering: Fundamentals and Applications*, Marcel Dekker, Inc., 1994.
- [80] Nocedal, J., and Wright, J. S. *Numerical Optimization*. Springer
- [81] Hillier, F. S., M. S. Hillier, and G. J. Lieberman (2000). *Introduction to Management Science: A Modelling and Case Studies Approach with Spreadsheets*, Irwin/McGraw-Hill, Burr Ridge, IL.
- [82] Hillier, F. S., and G. J. Lieberman (2001). *Introduction to Operations Research*, 7<sup>th</sup> ed., McGraw-Hill, Burr Ridge, IL.
- [83] Mohammadian, M., and Yao, X. *Evolutionary Optimization*, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [84] Vanderbei, R. J. (2001). *Linear Programming: Foundations and extensions*, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [85] Schneiderjans, M. (1995). *Goal Programming: Methodology and Applications*, Kluwer Academic publishers, Boston.

- 
- 
- [86] Nemhauser, G. L., and L. A. Wolsey (1999). *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley, New York.
- [87] Bertsekas, D. P. (1995). *Nonlinear Programming*, Athena Scientific, Belmont, MA.
- [88] David B. Fogel. *Evolutionary Computation toward a New Philosophy of Machine Intelligence*. The Institute of Electrical and Electronic Engineers New York 1995.
- [89] Hans-Paul Schwefel. *Numerical Optimization of Computer Models*. Wiley, Chichester, UK. 1981.
- [90] John H. Holland Concerning efficient adaptive systems. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 9:297-314, 1962.
- [91] John H. Holland. Outline for a logical theory of adaptive systems, *Journal of the Association for Computing Machinery*, 9:297-314, 1962.
- [92] Holland, *Adaptation in natural and artificial systems*. The University of Michigan 1995.
- [93] D.E. Goldberg. *Genetic Algorithms in search Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley 1989.
- [94] Gunter Rudolph *Convergent Analysis of Canonical Genetic Algorithms*. *IEEE transactions on Neural Networks*, January 1994.
- [95] Thomas Back. Self-adaptation in genetic algorithms. In F.J. Varela and Bourguine, editors. *Proceedings of the first European Conference on artificial Life*, pages 263-271, Cambridge Massachusetts, 1992. MIT Press.
- [96] Lawrence Davis. Adapting Operator Probabilities In Genetic Algorithms. In J. David Schaffer, editor. *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms*, pages 61-69, San Mateo, California, 1989. Morgan Kaufmann Publishers.
- [97] J. Davis Schaffer and Amy Morishima. An Adaptive Crossover Distribution Mechanism for Genetic Algorithms, pages 61-69, San Mateo, California, 1989. Morgan Kaufmann publishers.
- [98] David E. Goldberg. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts, 1989.
- [99] 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.
- 
-





---

---

# APÉNDICE A

## EVALUACION E INDICES DE CONFIABILIDAD

### A.1 INTRODUCCION

A continuación se explicarán conceptos básicos de la confiabilidad como son: sistema en serie y en paralelo, modos de falla y modos de salida de los componentes en tal sistema, conceptos de vital importancia para poder realizar la evaluación. También se describirán los diversos índices de confiabilidad que se tienen como herramienta para el estudio de la confiabilidad en los sistemas de potencia. Obviamente incluyendo los que se obtienen mediante los índices básicos (tasa promedio de falla al punto de carga  $\lambda$ , duración promedio de la salida anual al punto de carga  $r$ , y la indisponibilidad o tiempo promedio de la salida anual al punto de carga  $U$ ) [70,77].

Al evaluar la confiabilidad de un sistema se persigue, de cierta forma, predecir el comportamiento de un sistema y, en muchos casos, modificar el sistema actual de forma tal que por medio de esta modificación se alcance el valor de confiabilidad deseado. En la práctica un sistema es representado frecuentemente como una red de componentes conectados en serie, paralelo o una mezcla de éstos [78].

Existen diferentes índices que permiten evaluar la confiabilidad de los sistemas de distribución, dirigidos a diferentes objetivos (clientes, sistemas, etc.), los cuales ayudarán a predecir el comportamiento futuro del sistema

### A.2 EVALUACIÓN DE LA CONFIABILIDAD DE SISTEMAS SIMPLES

Es muy importante modelar correctamente al sistema para ello hay que entender a fondo su comportamiento y esto último deberá ser tomado en cuenta antes de evaluar la confiabilidad del sistema por medio de cualquier técnica [78].

Otra consideración que debe ser tomada en cuenta es que la estructura topológica del sistema actual y la red de confiabilidad empleada para modelar al sistema no serán necesariamente las mismas.

*Sistema serie.-* Los componentes de un sistema serie desde el punto de vista de confiabilidad son aquellos donde todos deben trabajar para el éxito del sistema y solamente uno necesita fallar para que el sistema falle.



**Sistema paralelo.-** Los componentes de un sistema paralelo desde el punto de vista de confiabilidad son aquellos donde solamente uno debe trabajar para el éxito del sistema o todos deben fallar para que el sistema falle.

Se puede decir que un sistema serie representa un sistema no redundante, y un sistema paralelo representa un sistema altamente redundante.

Se presentan las técnicas analíticas para evaluar la confiabilidad de redes serie y paralelo. Una red de confiabilidad a menudo es representada como diagrama de bloques.

### A.2.1 Sistema serie

Considérese un sistema en serie que consiste de dos componentes independientes  $A$  y  $B$  conectados en serie, desde un punto de vista de confiabilidad como se muestra en la figura A.1. Este arreglo implica que ambos componentes deberán trabajar para asegurar que el sistema funcione.

Sean  $R_A, R_B$  las probabilidades de éxito en la operación de los componentes  $A$  y  $B$  respectivamente y  $Q_A, Q_B$  la probabilidad de falla (inconfiabilidad) de los componentes  $A$  y  $B$  respectivamente.

Debido a que la operación y falla son mutuamente exclusivas y complementarias

$$R_A + Q_A = 1 \quad y \quad R_B + Q_B = 1 \quad (\text{A.1})$$

El requerimiento básico para que el sistema funcione es que los componentes  $A$  y  $B$  deberán de estar trabajando. De la probabilidad condicional se tiene:

$$P(A/B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \quad (\text{A.2})$$

Si los eventos  $A$  y  $B$  son independientes



$$P(A/B) = P(A) \tag{A.3}$$

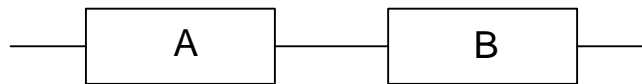
Por lo tanto

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \tag{A.4}$$

Lo cual implica que la confiabilidad de un sistema formado por los componentes  $A$  y  $B$  es igual al producto de sus confiabilidades, es decir:

$$R_S = R_A \cdot R_B \tag{A.5}$$

**Figura A.1 Sistema con dos componentes en serie**



La ecuación anterior puede ser generalizada de forma tal que:

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i \tag{A.6}$$

En algunas aplicaciones puede ser ventajoso evaluar la confiabilidad o probabilidad de que el sistema falle, por lo que la inconfiabilidad de un sistema en serie está dada por:

$$Q_S = 1 - R_A R_B = 1 - (1 - Q_A)(1 - Q_B) = Q_A + Q_B - Q_A \cdot Q_B \tag{A.7}$$

Para  $n$  componentes:

$$Q_S = 1 - \prod_{i=1}^n R_i \tag{A.8}$$

La confiabilidad decrece al incrementar el número de componentes en serie y ésta crece al reducir el número de estos componentes.



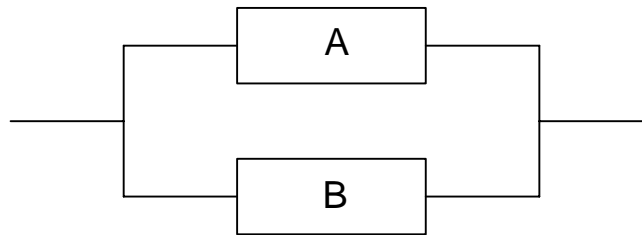
### A.2.2 Sistema paralelo

Considérese un sistema de dos componentes independientes  $A$  y  $B$ , conectadas en paralelo como se observa en la figura A.2.

En este caso el sistema requiere solamente que un componente esté trabajando para que el sistema se considere que trabaja exitosamente. Para este caso la probabilidad de éxito se evalúa del complemento de la inconfiabilidad del sistema.

$$R_P = 1 - Q_A \cdot Q_B = R_A + R_B - R_A \cdot R_B \quad (\text{A.9})$$

Figura A.2 Sistema con dos componentes conectados en paralelo



Para  $n$  componentes del sistema se tiene que:

$$R_P = 1 - \prod_{i=1}^n Q_i \quad (\text{A.10})$$

También se puede definir la inconfiabilidad  $Q_P$  del sistema como:

$$Q_P = Q_A \cdot Q_B \quad (\text{A.11})$$

En forma generalizada será:

$$Q_P = \prod_{i=1}^n Q_i \quad (\text{A.12})$$

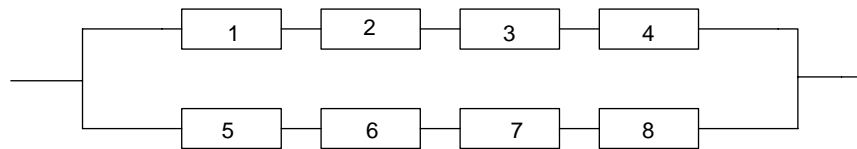


La confiabilidad del sistema crece al incrementar el número de componentes en paralelo y esto implica que se incremente el costo inicial, el peso y el volumen del sistema; por lo tanto aumenta el mantenimiento, debiéndose analizar todo esto cuidadosamente.

### A.3 SISTEMA SERIE-PARALELO

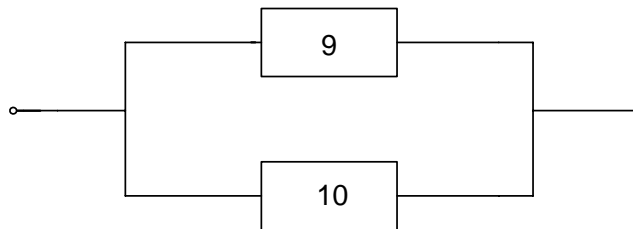
En este caso se trata de obtener la confiabilidad o inconfiabilidad a partir de la reducción de subsistemas en serie y paralelo, por ejemplo considérese el sistema de la figura A.3.

Figura A.3 Sistema serie-paralelo



Entonces se puede reducir este sistema a dos componentes equivalentes 9 y 10, como se puede apreciar en la figura A.4.

Figura A.4 Sistema equivalente



A su vez los componentes 9 y 10 pueden ser reducidos al componente 11 a través de una evaluación de la confiabilidad o inconfiabilidad de los componentes en paralelo (figura A.5).

Si  $R_1, R_2, \dots, R_8$ , son las confiabilidades de los componentes 1,2,...,8 respectivamente, entonces:



$$R_9 = R_1 R_2 R_3 R_4$$

$$R_{10} = R_5 R_6 R_7 R_8, \text{ por lo que}$$

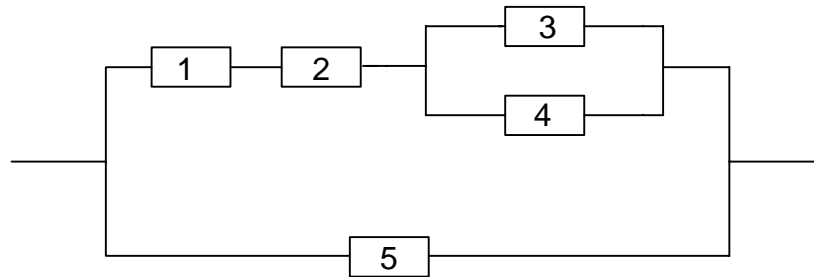
$$R_{11} = 1 - (1 - R_9)(1 - R_{10}) = R_9 + R_{10} - R_9 R_{10}$$

$$R_{11} = R_1 R_2 R_3 R_4 + R_5 R_6 R_7 R_8 - R_1 R_2 R_3 R_4 R_5 R_6 R_7 R_8$$

**Figura A.5 Reducción del sistema equivalente**



**Figura A.6 Modelo de confiabilidad del sistema**



**Ejemplo A.1**

Derívese la expresión de la indisponibilidad del sistema cuyo modelo de confiabilidad es el mostrado en la figura A.6. Además calcúlese la confiabilidad e inconfiabilidad del sistema si los componentes poseen los siguientes valores de confiabilidad:

a)  $R_1 = R_2 = R_3 = 0.8$

$R_4 = R_5 = 0.8$

b)  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = 0.8$

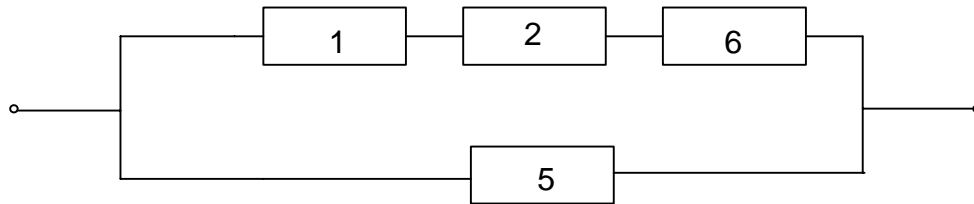
Solución:

Se reduce el sistema de la figura A.6 al sistema de la figura A.7.

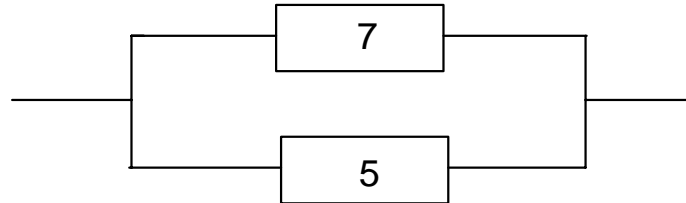


Donde el componente 6 representa el paralelo de los componentes 3 y 4. A su vez los componentes 1, 2 y 6 están en serie, por lo que el componente 7 representa el equivalente en serie, quedando el sistema como se muestra en la figura A.8:

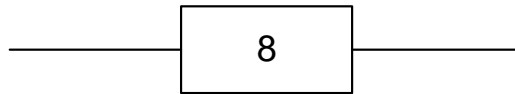
**Figura A.7 Reducción del sistema de la figura A.6**



**Figura A.8 Sistema equivalente de la figura A.7**



**Figura A.9 Reducción del sistema equivalente de la figura A.8**



Finalmente el sistema se reduce al componente 8 que representa el equivalente del paralelo del componente 7 y 5, como se aprecia en la figura A.9.

Si  $R_1, \dots, R_5$  y  $Q_1, \dots, Q_5$  son las confiabilidades e inconfiabilidades de los componentes 1, ..., 5 respectivamente, entonces la inconfiabilidad del sistema será:

$$Q_6 = Q_3 Q_4$$

$$Q_7 = 1 - (1 - Q_1)(1 - Q_2)(1 - Q_6)$$

$$Q_7 = Q_1 + Q_2 + Q_6 - Q_1 Q_2 - Q_2 Q_6 - Q_6 Q_1 + Q_1 Q_2 Q_6$$

$$Q_8 = Q_5 Q_7$$

$$Q_8 = Q_5 (Q_1 + Q_2 + Q_3 Q_4 - Q_1 Q_2 - Q_2 Q_3 Q_4 - Q_3 Q_4 Q_1 + Q_1 Q_2 Q_3 Q_4)$$



Y la confiabilidad será:

$$R_6 = R_3 + R_4 - R_3R_4$$

$$R_7 = R_1R_2R_6$$

$$R_8 = R_5 + R_7 - R_5R_7$$

$$R_8 = R_5 + R_1R_2(R_3 + R_4 - R_3R_4) - R_5R_1R_2(R_3 + R_4 - R_3R_4)$$

Que para una confiabilidad de 0.8 para todos los componentes nos da:

$$R_8 = 0.92288 \quad \text{ó} \quad Q_8 = 1 - 0.92288 = 0.07712$$

#### A.4 SISTEMAS PARCIALMENTE REDUNDANTES

En sistemas complejos es difícil encontrar sistemas no redundantes (serie) o completamente redundantes (paralelo). Las técnicas descritas anteriormente para sistemas serie- paralelo no pueden ser empleadas directamente en los casos que involucren redundancia parcial.

A los sistemas parcialmente redundantes se les conoce como configuración  $r$  fuera de  $n$  o simplemente  $r/n$  es aquella que involucra  $n$  componentes de los cuales  $r$  deben estar trabajando para que la unidad esté funcionando. En el caso general se tienen  $n$  entradas, de las cuales se requiere  $r$  para que el sistema funcione como se muestra en la figura A.10a.

El primer caso consiste de “ $n$ ” entradas independientes a cada uno de los componentes y que a su vez las salidas de éstos se unen en un punto común, teniendo por lo consiguiente una sola entrada (figura A.10.b). La probabilidad de falla  $P_1$  de una rama  $r/n$  es la suma de las probabilidades de que exactamente  $r-1, r-2, \dots, 1, 0$  componentes estén funcionando. Si los componentes son idénticos, el número que estén funcionando tienen una distribución de probabilidad binomial y si  $P$  es la probabilidad de falla de cada componente,  $P_F$  está dado por:





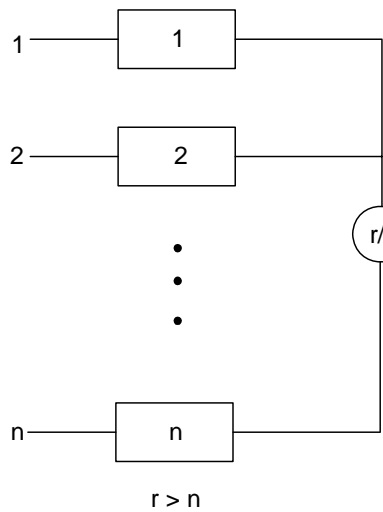
$$P_F = \binom{n}{r-1} P^{n-r+1} (1-p)^{r-1} + \binom{n}{r-2} P^{n-r+2} (1-p)^{r-2} + \dots + \binom{n}{0} P^n \quad (\text{A.13})$$

Si los componentes no son idénticos, los términos de la ecuación A.13 deberán ser expandidos para representar todas las posibles combinaciones de falla. En una rama 2/3 por ejemplo el término en la ecuación A.13,  $3 p^2 (1-p)$  deberá ser remplazado por los tres términos

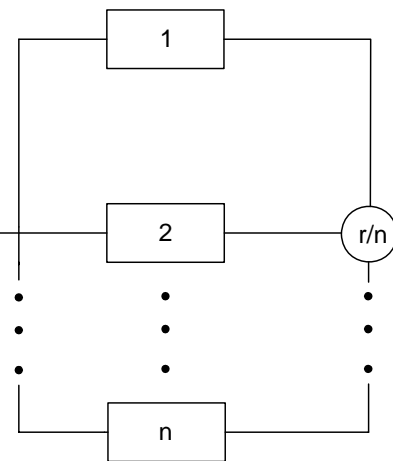
$$p_1 p_2 (1-p_3) + p_1 p_3 (1-p_2) + p_2 p_3 (1-p_1)$$

**Figura A.10 Sistemas parcialmente redundantes**

**Figura A.10a Sistema con varias entradas**



**Figura A.10b Sistema con una sola entrada**



Un sistema en paralelo es un caso especial de un sistema parcialmente redundante cuando  $r = n$ .

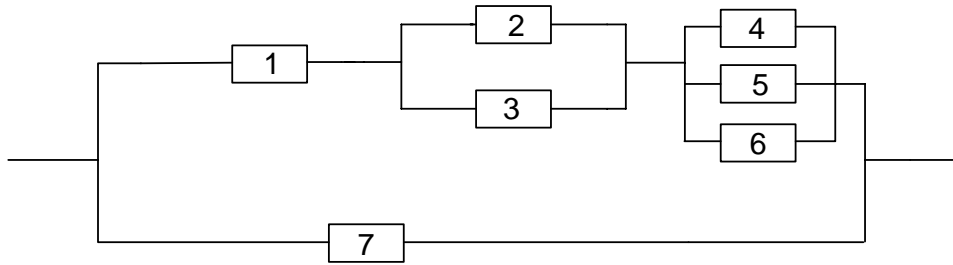
En el proceso de redundancia de redes, las ramas  $r/n$  pueden ser incluidas con ramas en serie y paralelo. Esto es, por supuesto, posible siempre que se convierta ramas  $r/n$  en equivalentes serie-paralelo usando la técnica de cortes o conexiones mínimas.



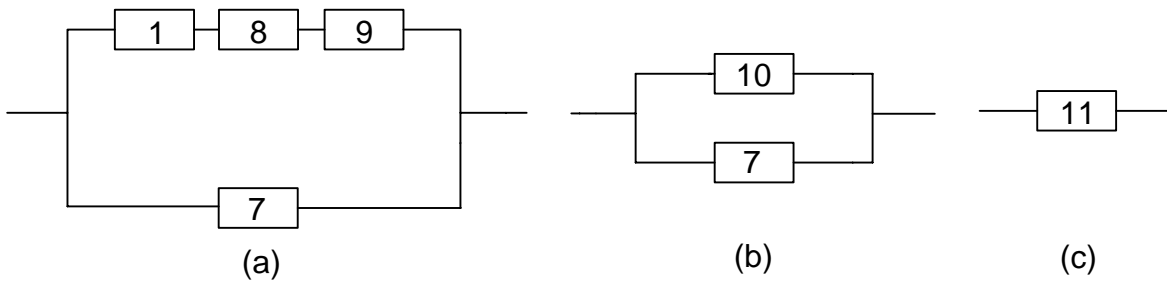
Ejemplo A.2:

Considérese el caso del sistema presentado en la figura A.11, en el cual todas las ramas en paralelo son completamente redundantes con excepción de los componentes 4, 5 y 6, cualquiera de las dos ramas son requeridas para que el sistema funcione.

**Figura A.11 Sistema altamente redundante**



**Figura A.12 Reducción del sistema de la figura A.11**



$$Q_8 = Q_2 Q_3$$

$$R_{10} = R_1 R_8 R_9$$

$$Q_{11} = Q_{10} Q_7$$

$$Q_{11} = Q_7 (1 - R_1 R_8 R_9)$$

$$Q_{11} = Q_7 [1 - R_1 (1 - Q_2 Q_3) R_9]$$

$$Q_{11} = Q_7 [1 - R_1 R_9 + R_1 R_9 Q_2 Q_3]$$



$R_9$  es evaluada para aplicar la distribución binomial a los componentes 4, 5 y 6.

Si  $R_4 = R_5 = R_6 = R$  y  $Q_4 = Q_5 = Q_6 = Q$ , entonces,

$$R_9 = R^3 + 3R^2Q$$

$$\text{y } Q_9 = 3RQ^2 + Q^3$$

Si  $R_4 \neq R_5 \neq R_6$  y  $Q_4 \neq Q_5 \neq Q_6$ , entonces,

$$R_9 = R_4R_5R_6 + R_4R_5Q_6 + R_5R_6Q_4 + R_6R_4Q_5 \quad \text{y}$$

$$\text{y } Q_9 = R_4Q_5Q_6 + R_5Q_6Q_4 + R_6Q_4Q_5 + Q_4Q_5Q_6$$

En el caso especial de que los componentes tengan una confiabilidad de 0.8 se tiene:

$$R_9 = 0.8960$$

$$Q_9 = 0.1040 \quad \text{y}$$

$$Q_{11} = 0.06237$$

## A.5 CONCEPTOS DE CONFIABILIDAD

A continuación se describen conceptos básicos de confiabilidad, conceptos enfocados hacia los componentes y que permitirán tener una mejor idea acerca de la relación que existe entre estos y la confiabilidad del sistema.

### A.5.1 Modos de falla de un componente

Los componentes de un sistema de potencia pueden tener muchos modos de falla. Para propósitos de análisis de confiabilidad en redes de distribución eléctricas, los componentes del sistema son clasificados en dos categorías. La primera categoría incluye componentes tales como líneas de distribución, buses transformadores, etc. Estos componentes pueden tener cualquiera de los siguientes estados:



- Operando
- Falla
- Salida por reparación o mantenimiento preventivo

Si la protección apropiada no está disponible, estos componentes pueden tener aperturas por fallas indetectables.

La segunda categoría incluye componentes tales como interruptores, restauradores, cuchillas desconectadoras. Estos componentes pueden tener cualquiera de los siguientes estados:

- Operando
- Falla
- Salida por reparación o mantenimiento preventivo
- Bloqueo cuando es llamado a operar (a la apertura o al cierre)
- Apertura por fallas indetectables

Se debe notar que los estados de falla en la primera categoría de componentes pueden ser muy diferentes de la segunda categoría. En el caso anterior, un segundo nivel de protección del sistema debe operar para aislar la falla del componente, mientras que en el primer caso un primer nivel de protección del sistema es requerido para operar.

### **A.5.2 Modos de salida de un componente**

Las salidas son clasificadas como se muestra en la tabla A.1. Las salidas programadas son el resultado de sacar deliberadamente un componente para propósitos de construcción, mantenimiento preventivo, sustitución de equipo que llegó a fin de su vida útil o recalibración. Este tipo de salidas pueden postergarse o adelantarse según sean favorables las circunstancias para llevarse a cabo.

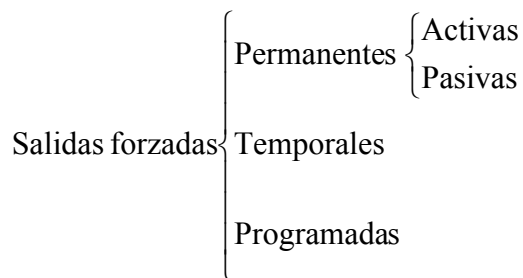


Una salida forzada es aquella que resulta de condiciones de emergencia asociadas a alguna componente que requiere sacarse fuera de servicio inmediatamente o tan pronto como se hagan las operaciones de maniobra permanentes.

Las salidas forzadas pueden ser temporales, si la causa de ésta es aliviada extinguiéndose rápidamente y permanentes si la causa persiste y habrá que reemplazar la componente fallada o repararla. Las salidas de los componentes pueden ser divididas dentro de salidas de fallas pasivas y salidas por fallas activas. Todas las componentes que al fallar causan la salida de servicio de otros componentes en buen estado, se clasifican como fallas activas. Esta clase de fallas incluye fallas en los componentes que causan la operación de interruptores. Todas las fallas de componentes que no causan la salida de servicio de componentes en buen estado se clasifican como fallas pasivas. Éstas incluyen apertura por fallas indetectables, salidas de componentes por reparación, etc. Se debe notar, que para los componentes de la primera clasificación, las fallas activas son incluidas también en las fallas pasivas.

Otro modo de salida es el de causa común, en el que ocurren múltiples salidas en un solo evento, aunque es poco frecuente.

**Tabla A.1 Clasificación de las salidas**



### **A.5.3 Causas de las salidas**

Las causas de las salidas de una componente son variadas, a continuación se mencionan las más comunes:



- Descargas atmosféricas
- Contacto de una línea con cuerpos extraños
- Contaminación y condiciones atmosféricas
- Manejo inadecuado del sistema
- Mantenimiento
- Vandalismo
- Sobrecargas
- Operaciones de maniobra, etc.

Estas causas se toman en cuenta suponiendo que la componente se encuentra funcionando durante el período de vida útil y no en el inicial o en el período de fallas por desgaste o envejecimiento.

Las técnicas de confiabilidad están basadas en los conceptos del método de tasa esperada de falla  $\lambda$  y duración promedio de la salida  $r$ . Para un punto de carga la tasa esperada de falla  $\lambda$ , duración promedio de salida  $r$  y el tiempo anual de salida  $U$  son evaluados.

Estos índices son fáciles de entender y tienen mucho más significado ingenieril que el concepto matemático de probabilidad de falla.

Para indicar las áreas críticas de falla, es necesario deducir las contribuciones individuales de cada evento de falla mediante los índices de confiabilidad para cada punto de carga. Estas contribuciones son: la tasa esperada de falla  $\lambda$ , la duración promedio de salida  $r$  y el tiempo promedio anual de salida  $U$ , debido a:

- Salidas forzadas traslapadas
- Salidas forzadas traslapadas con salidas por mantenimiento



Las contribuciones individuales y los índices totales por punto de carga, pueden ser evaluados, usando las ecuaciones descritas en el capítulo tres, después que los modos de falla en un punto de carga bajo consideración han sido deducidos. La teoría de cortes mínimos es una poderosa herramienta computacional para evaluar los modos de falla en un punto de carga, considerando que los modos de falla pueden ser relacionados como cortes mínimos [79].

No es fácil comparar la confiabilidad de diferentes diseños del sistema cuando se conoce solamente los índices sólo en los puntos de carga, particularmente cuando existen muchos puntos de carga y sus índices cambian en forma diferente y en diferentes cantidades. Aún más, los índices en los puntos de carga no pueden ser independientes si pertenecen a falla de modo común y por lo tanto no pueden sumarse en forma real. Para sobrellevar estas dificultades se ha desarrollado un concepto de confiabilidad del sistema en contraste a la confiabilidad en los puntos de carga. Para aplicar este concepto rigurosamente es necesario definir claramente la falla del sistema. Dos criterios de falla son definidos para el sistema:

- Se considera falla del sistema si al menos un punto de carga queda sin suministro de energía.
- Se considera falla del sistema si todos los puntos de carga quedan sin suministro de energía.

Si existe una sola clase de falla, este concepto llega a ser una extensión de la teoría de conjuntos de cortes mínimos aplicada a un sistema de salidas múltiples. Sin embargo, un sistema tiene diferentes clases de fallas y la técnica se hace más compleja.

En el capítulo tres se verá que todos los índices de confiabilidad de un sistema se calculan en base a parámetros de confiabilidad de cada una de las componentes del sistema.

Las definiciones de los parámetros de confiabilidad requeridos para la evaluación del sistema se describen a continuación:



*Frecuencia de falla pasiva del componente.*- Es el número total de veces por año que los componentes son tomados fuera de servicio para reparación debido a cualquier modo de falla. Esta frecuencia de falla también incluye las fallas activas de los componentes. Está dada en No. de fallas pasivas/año.

*Tiempo promedio de reparación del componente.*- Es el tiempo promedio requerido para reparar todos los tipos de modos de falla de los componentes y está dada en horas. La reparación puede ser garantía de que un componente falle, un interruptor o switch esté en condición de bloqueado, apertura indetectable de una conexión, una falsa operación de un interruptor, etc.

*Frecuencia de salida por mantenimiento del componente.*- Es el número promedio de veces por año que un componente es tomado fuera de servicio por mantenimiento preventivo. Esta dado en No. de ocurrencias/año.

*Tiempo promedio de mantenimiento del componente.*- Es el tiempo promedio para dar mantenimiento a un componente. Está dado en horas.

*Frecuencia de falla activa del componente.*- Este valor es la fracción de la frecuencia de falla pasiva que corresponde a las fallas activas de componentes. La frecuencia de falla activa está expresada en términos del número de componentes fallados activos, (número de fallas activas/año).

*Tiempo promedio de switcheo del componente.*- Es el tiempo desde el inicio de la falla de un componente, su detección, localización, reconfiguración del sistema hasta aislar la falla y restaurar los componentes en buen estado que fueron sacados de servicio debido a la falla. Este tiempo está dado en horas. Cuando los componentes en buen estado no pueden ser restaurados para servicio, entonces el componente fallado es reparado para ponerlo en





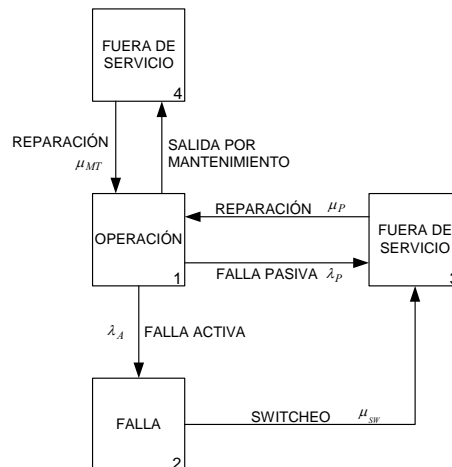
operación, por lo que el tiempo de switcheo del componente se considera como el tiempo para repararlo.

*Probabilidad de bloqueo.*- Este valor representa la probabilidad de que un interruptor o cuchilla esté bloqueada cuando es llamada a operar. Esta probabilidad está dada en %. Este valor es la probabilidad de que el interruptor o cuchilla no cierren cuando son llamados a operar. La probabilidad de bloqueo de un interruptor se estima de la razón del número de veces que falla cuando es llamado a operar por el número de veces que el interruptor es llamado a operar.

La inclusión de acciones de switcheo en el análisis de confiabilidad es de vital importancia. Es necesario imponer un modelo de tres estados del sistema; el estado antes de la falla, el estado después de la falla antes del switcheo y el estado después del switcheo. El segundo estado tiene un pequeño promedio de salida anual y depende del tiempo de switcheo, aunque esta tasa de ocurrencia puede ser muy grande.

Por ejemplo un interruptor es considerado como un modelo de tres estados el cual incluye frecuencia de falla activa  $\lambda_a$ , frecuencia de falla pasiva  $\lambda_p$ , tasa de switcheo  $\mu_{sw}$  y tasa de reparación  $\mu$ , como se muestra en la figura A.15, que también incluye eventos de mantenimiento.

**Figura A.13 Modelo de tres estados para un interruptor.**





Una sección de bus tiene un modelo de dos estados, el cual tiene solamente frecuencia de falla activa  $\lambda_a$  y tasa de reparación  $\mu$ . Un transformador tiene un modelo de tres estados que incluyen frecuencia de falla activa  $\lambda_a$ , tasa de switcheo  $\mu_{sw}$  y tasa de reparación  $\mu$ .

La historia de un interruptor puede estar generada por dos segmentos. La primera situación es cuando ocurre una falla activa y el componente está forzado a salir del estado 1 al estado 2 (figura A.15), mediante una maniobra de switcheo es llevado al estado tres y reparándolo se lleva al estado inicial (estado 1). La segunda situación es cuando ocurre una falla pasiva y el interruptor es llevado del estado 1 al estado 3 y mediante una reparación es llevado del estado 3 al estado inicial 1.

Si un componente al tener una falla activa no puede ser llevado fuera de servicio mediante una maniobra de switcheo el tiempo asignado al tiempo de switcheo es asignado como tiempo de reparación de la componente.

La evaluación de los índices de confiabilidad de un sistema eléctrico es una importante alternativa para la comparación objetiva de diferentes alternativas de diseño. El concepto de índices de confiabilidad total del sistema facilita estas comparaciones, particularmente cuando el sistema tiene muchos puntos de carga.

## A.6 RED DE CONFIABILIDAD

Como puede apreciarse la topología de la red real es un circuito en paralelo, mientras que la topología de confiabilidad es un circuito serie. Por lo tanto no coincide la topología del sistema con la de la red de confiabilidad asociada.

Para poder evaluar un sistema simple podemos representar a éste como la interconexión de un conjunto de subsistemas en serie y paralelo. Entonces la confiabilidad de cualquier sistema dependerá fundamentalmente de dos aspectos:



- La estructura topológica de sus componentes.
- El valor asociado de confiabilidad de cada uno de sus componentes.

Como se dijo anteriormente, al evaluar la confiabilidad de un sistema se persigue de cierta forma predecir el comportamiento de un sistema y en muchos casos modificar el sistema actual, de forma tal que por medio de esta modificación se alcance el valor de confiabilidad deseado.

Se dice que un conjunto de componentes está en serie desde el punto de vista de confiabilidad si todos ellos trabajan para que el sistema funcione bien o simplemente, conque uno de los componentes falle, el sistema falla.

En cambio un sistema está en paralelo, desde el punto de vista de confiabilidad si solamente un componente necesita trabajar para que el sistema funcione,

Un sistema en serie representa un sistema no redundante, mientras que un sistema paralelo constituye un sistema completamente redundante [46].

## **A.7 ÍNDICES DE CONFIABILIDAD EN REDES DE DISTRIBUCIÓN**

Cuando se evalúa la confiabilidad del suministro a usuarios individuales o al sistema de distribución independientemente del costo de la confiabilidad, se calculan normalmente los índices de confiabilidad.

Estos índices son usados para fijar el comportamiento futuro. Típicamente son medidas de la tasa media de fallas, la duración media de salida y tiempo medio anual de salida que a su vez determina la disponibilidad de energía de los consumidores.

Ahora introducimos los índices comúnmente usados por los sistemas de distribución. Aunque estos índices se presenten en la literatura especializada, las compañías en la práctica usan índices diferentes de donde se tienen equivalencias. En nuestro caso vamos a usar primero las siglas en inglés y sus equivalencias en español.

A continuación se explicarán los diversos índices de confiabilidad que se consideran para el estudio de la confiabilidad en los sistemas de potencia [70,77].

### **A.7.1 Índices de confiabilidad basados en los clientes**

Los índices más utilizados son promedios que ponderan igualmente a cada cliente. Las fórmulas para los índices basados en los clientes incluyen (salvo especificación, las interrupciones se refieren a interrupciones sostenidas):



**Interrupción Anual a los Consumidores (IAC)**

$$IAC = \sum_{i \in R} \lambda_i N_i \quad [\text{Int.}] \quad (\text{A.4})$$

Donde  $\lambda_i$  y  $N_i$  son la tasa de falla y el número de consumidores respectivamente, de cada punto de carga  $i$ ;  $R$  es la salida de los puntos de carga del sistema.

**Duración de Interrupción a los Consumidores (DIC)**

$$DIC = \sum_{i \in R} U_i N_i \quad [\text{Hr}] \quad (\text{A.5})$$

Donde  $U$  es la indisponibilidad anual o el tiempo de salida (en hr/año) para cada punto de carga.

**System Average Interruption Frequency Index:**

Índice Promedio de la Frecuencia de Interrupción del Sistema. Es una medida promedio de cómo los clientes experimentarán varias interrupciones sostenidas sobre el curso de un año.

$$SAIFI = \frac{\text{Número total de interrupciones a los clientes}}{\text{Número total de clientes suministrados}} \quad /\text{Año}$$

$$\text{SAIFI} = \frac{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \quad [\text{Año}] \quad (\text{A.6})$$

**System Average Interruption Duration Index:**

Índice Promedio del Tiempo de Interrupción del Sistema. Es una medida promedio de como los clientes experimentarán muchas interrupciones en horas sobre el curso de un año.

Para un número fijo de clientes, SAIDI puede ser mejorado reduciendo el número de interrupciones o por la reducción de la duración de estas interrupciones. Desde que ambas reflejan mejoras en la confiabilidad, una reducción en SAIDI indica un mejoramiento en la confiabilidad.

$$SAIDI = \frac{\sum \text{Duración de las interrupciones a los clientes}}{\text{Número total de clientes suministrados}} \quad \text{Horas / Año}$$



$$SAIDI = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i} \quad [\text{Hrs/Año}] \quad (\text{A.7})$$

**Customer Average Interruption Duration Index:**

Índice Promedio del Tiempo de Interrupción a los Clientes. Es una medida promedio de que tan grande fue la última interrupción, y se utiliza como medida de tiempo de respuesta para uso general a las contingencias del sistema. CAIDI puede ser mejorado por la reducción de la longitud de las interrupciones, pero también puede ser reducido por el incremento del número de interrupciones cortas. Consecuentemente, una reducción en CAIDI no necesariamente refleja una mejora en la confiabilidad.

$$CAIDI = \frac{\sum \text{Duración de las interrupciones a los clientes}}{\text{Número total de interrupciones a los clientes}} \quad \text{Horas}$$

$$CAIDI = \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} \lambda_i N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad [\text{Hrs}] \quad (\text{A.8})$$

conocido en México como TIU.

**Average Service Availability (Unavailability) Index (ASAI), (ASUD):**

Índice Promedio de la Disponibilidad del Servicio. Es la disponibilidad del cliente suministrado por el sistema y provee la misma información como SAIDI. Altos valores de ASAI reflejan altos niveles de confiabilidad.

$$ASAI = \frac{\text{Horas de disponibilidad del servicio a los clientes}}{\text{Horas de demanda del servicio de los clientes}} \quad \text{p.u.}$$

$$ASAI = \frac{\sum_{i \in R} 8760 - \sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} 8760 N_i} = \frac{SAIDI}{SAIFI} \quad [\text{p.u}] \quad (\text{A.9})$$

$$ASUI = 1 - ASAI = \frac{\text{Horas del servicio indisponible al cliente}}{\text{Horas exigidas del cliente}} \quad \text{p.u.}$$

$$= \frac{\sum_{i \in R} U_i N_i}{\sum_{i \in R} N_i 8760} \quad [\text{p.u.}] \quad (\text{A.10})$$

donde 8760 es el número de horas en el año civil.



Algunos índices de confiabilidad menos utilizados no son basados en los números totales de clientes suministrados. El índice promedio de la frecuencia de interrupción a los clientes (CAIFI) y el índice promedio total de la duración de la interrupción a los clientes (CTAIDI) son basados sobre el número de clientes que han experimentado una o más interrupciones en el año. Las formulas para estos índices son:

**Customer Average Interruption Frequency Index:**

Índice promedio de la frecuencia de interrupción al cliente.

$$CAIFI = \frac{\text{Número total de interrupciones a los clientes}}{\text{Clientes que experimentan una o más interrupciones}} \quad /\text{Año} \quad (\text{A.11})$$

Este índice difiere del SAIFI solo en el valor del nominador. Este es particularmente útil cuando un año es comparado con otros años desde entonces, en cualquier año, no todos los clientes serán afectados y muchos experimentarán una completa continuidad de la alimentación. El valor de CAIFI por lo tanto es muy útil en el reconocimiento de tendencias cronológicas en la confiabilidad de un sistema particular de distribución.

En la aplicación de este índice, los clientes afectados deben ser contados solo una vez, sin importar el número de interrupciones que ellos pudieron haber experimentado en el año.

**Customer Total Average Interruption Duration Index:**

Índice promedio total de duración de la interrupción a los clientes

$$CTAIDI = \frac{\sum \text{Duración de la interrupción a los clientes}}{\text{Clientes que experimentan una o más interrupciones}} \quad \text{Hrs/Año} \quad (\text{A.12})$$

CAIFI es similar al SAIFI. Una gran diferencia es que el posible valor más bajo para SAIFI es cero y el posible valor más bajo para CAIFI es uno. Reduciendo el número de interrupciones que un cliente experimenta de 2 a 1 mejorará CAIDI. Sin embargo, reducir el número de interrupciones que este mismo cliente experimente de 1 a 0 hará CAIDI peor. CTAIDI tiene la misma dificultad como el CAIFI desde que este puede ser mejorado por el incremento del número de clientes que experimentan una sola interrupción. El incremento de la sensibilidad de carga de clientes para breves disturbios ha generado una necesidad de índices relacionados para interrupciones momentáneas. Dos índices momentáneos han llegado a ser estándares. Uno es basado en la frecuencia de interrupciones momentáneas y el otro es basado en la frecuencia de eventos momentáneos. Las formulas de estos índices son:

**Momentary Average Interruption Frequency Index:**

Índice promedio de la frecuencia de interrupción momentánea



$$MAIFI = \frac{\text{Número total de interrupciones momentáneas de los clientes}}{\text{Número total de clientes suministrados}} / \text{Años} \quad (\text{A.13})$$

**Momentary Event Average Interruption Frequency Index:**

Índice promedio de la frecuencia de interrupción momentánea de un evento

$$MAIFI_E = \frac{\text{Número total de eventos momentáneos de los clientes}}{\text{Número total de clientes suministrados}} / \text{Años} \quad (\text{A.14})$$

MAIFI es atractivo para las empresas, debido a que puede ser calculado fácilmente desde interruptores y restauradores con recierre.

Hay dos índices de confiabilidad que corresponden a puntos en las funciones de distribución acumulativas. Estos índices tienen subíndices que definen el nivel más alto de confiabilidad que un cliente debe exceder antes de ser contado. Un índice considera a las interrupciones sostenidas y el otro considera a las interrupciones momentáneas y sostenidas:

**Customers Experiencing Multiple Interruptions:**

Interrupciones Múltiples que Experimentan los Clientes

$$CEMI_n = \frac{\text{Costo * experimentar más de n interrupciones}}{\text{Número total de clientes suministrados}} / \text{Año} \quad (\text{A.15})$$

**Customers Experiencing Multiple Sustained and Momentary Interruptions:**

Múltiples Interrupciones Sostenidas y Momentáneas que Experimentan los Clientes

$$CEMSMI_n = \frac{\text{Costo * experimentar más de n interrupciones momentáneas y sostenidas combinadas}}{\text{Número total de clientes suministrados}} / \text{Año} \quad (\text{A.16})$$

$CEMI_n$  y  $CEMSMI_n$  no son utilizados ampliamente, pero ofrecen una alternativa atractiva a SAIFI y MAIFI para empresas que buscan flexibles medidas de confiabilidad, sin incurrir en la complejidad de histogramas y probabilidades acumulativas.

**A.7.2 Índices de confiabilidad basados en la carga**

Uno de los parámetros importantes requerido en la evaluación de los índices orientados a la carga y energía es el de la carga promedio en cada punto de carga del bus [44].

La carga promedio  $L_a$  esta dada por

(a)  $L_a = L_p f$   
 Donde  $L_p$  = carga pico demandada  
 $f$  = factor de carga



$$(b) L_a = \frac{\text{Energía total demandada en el período de interés}}{\text{Período de interés}} = \frac{E_d}{t} \quad (A.17)$$

Donde  $E_d$  y  $t$  son mostrados en la curva de duración de la carga de la Figura A.1 y  $t$  es normalmente un calendario anual.

(i) *Energy not supplied index, ENS*

Índice de energía no suministrada, ENS

$$\text{ENS} = \text{energía total no suministrada por el sistema} = \sum L_{a(i)} U_i$$

Donde  $L_{a(i)}$  es la carga promedio conectada al punto de carga  $i$ .

(ii) *Average energy not supplied, AENS or average system curtailment index, ASCI.*

Índice promedio de la energía no suministrada, AENS o promedio del acortamiento del sistema, ASCI

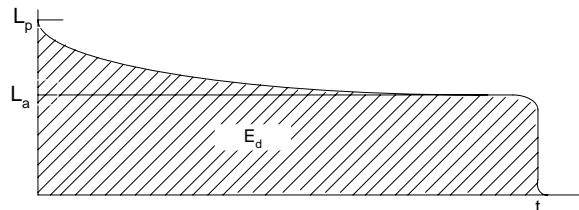
$$\text{AENS} = \frac{\text{Energía total no suministrada}}{\text{Número total de los clientes suministrados}} = \frac{\sum L_{a(i)} U_i}{\sum N_i} \quad (A.18)$$

(iii) *Average customer curtailment index, ACCI*

Índice promedio del acortamiento del cliente

$$\text{ACCI} = \frac{\text{Energía total no suministrada}}{\text{Número total de clientes afectados}} \quad (A.19)$$

**Figura A.14 Ilustración de  $L_p$ ,  $L_a$ ,  $E_d$  y  $t$**



Este índice difiere de AENS en la misma forma que CAIFI difiere de SAIFI. Este es un índice útil para monitorear los cambios de la energía promedio no suministrada entre un año y otro.





Los siguientes índices basados en la carga son:

**Average System Interruption Frequency Index:**

Índice Promedio de la Frecuencia de Interrupción del Sistema

$$ASIFI = \frac{\text{KVA conectados interrumpidos}}{\text{KVA totales conectados suministrados}} \text{ /Año} \quad (\text{A.20})$$

**Average System Interruption Duration Index:**

Índice Promedio de la Duración de Interrupción del Sistema

$$ASIDI = \frac{\text{KVA horas conectados interrumpidos}}{\text{KVA totales conectados suministrados}} \text{ Hora/Año} \quad (\text{A.21})$$

**A.7.3 Índices de calidad de la energía**

**System Average RMS Variation Frequency Index:**

Índice Promedio de la Variación de la Frecuencia RMS del Sistema

$$SARFI_x = \frac{\text{Sags totales de clientes debajo de } x\%}{\text{Número total de clientes suministrados}} \text{ /Año} \quad (\text{A.22})$$

**System Instantaneous Average RMS Variation Frequency Index:**

Índice Promedio de la Variación Instantánea de la Frecuencia del Sistema

$$SIARFI_x = \frac{\text{Sags totales de clientes debajo de } x\% (0.5c - 30c)}{\text{Número total de clientes suministrados}} \text{ /Año} \quad (\text{A.23})$$

**System Momentary Average RMS Variation Frequency Index:**

Índice Promedio de la Variación Momentánea de la Frecuencia del Sistema

$$SMARFI_x = \frac{\text{Sags totales de clientes debajo de } x\% (30c - 3s)}{\text{Número total de clientes suministrados}} \text{ /Año} \quad (\text{A.24})$$

**System Temporary Average RMS Variation Frequency Index:**

Índice Promedio de la Variación Temporal de la Frecuencia del Sistema

$$STARFI_x = \frac{\text{Sags totales de clientes debajo de } x\% (3s - 60s)}{\text{Número total de clientes suministrados}} \text{ /Año} \quad (\text{A.25})$$

# APÉNDICE B

## OPTIMIZACIÓN NUMÉRICA.

### B.1 INTRODUCCIÓN

En este apéndice se describen los conceptos básicos acerca de la optimización, tema que fue considerado para encontrar el número de dispositivos de desconexión que se colocarán en la sección principal de la red, considerando diferentes tipos de dispositivos. Considerando para todo ello el factor económico y la confiabilidad. En este apéndice se podrá observar desde la formulación matemática, los diferentes tipos de optimización que se pueden considerar para realizar una tarea (objetivo) en específico, las técnicas convencionales, hasta el tema de la simulación.

La naturaleza optimiza. Sistemas físicos tienden a un estado de energía mínima. Las moléculas en un sistema químico aislado con otro hasta que el potencial total de energía de sus electrones es minimizada. Los rayos de luz siguen trayectorias que minimizan el tiempo de viaje.

La optimización es una herramienta importante en la ciencia de la decisión y en el análisis de sistemas físicos. Para realizar esto, debemos identificar un *objetivo*, una medida cuantitativa del funcionamiento del sistema bajo estudio. Este objetivo puede ser beneficiar, tiempo, energía potencial, o cualquier otra cantidad o combinación de cantidades que pueden ser representados por un simple número. El objetivo depende de ciertas características del sistema, llamado *variables* o *incógnitas*. Nuestra meta es encontrar valores de las variables que optimiza el objetivo. Frecuentemente las variables son restringidas, o *limitadas*, de alguna manera. Para esos casos, las cantidades como la densidad del electrón en una molécula y el tipo de interés no pueden ser negativas.

El proceso de identificar el objetivo, variables, y límites para un problema dado es conocido como modelar. La construcción de un modelo apropiado es el primer paso- algunas veces es el paso más importante- en el proceso de la optimización. Si el modelo es muy simplista, no nos proporcionará una profundidad útil en el problema práctico, pero si es muy complejo, puede llegar a ser muy difícil de resolver.

Una vez que ha sido formulado el modelo, puede utilizarse un algoritmo de optimización para encontrar su solución. Usualmente, el algoritmo y el modelo son suficientemente complicados que es necesario utilizar una computadora para implementar este proceso. No existe un algoritmo de optimización global. Existen numerosos algoritmos, cada uno de estos son adaptados aun tipo particular de optimización del problema. Es frecuente que sea responsabilidad del usuario elegir un algoritmo que sea apropiado para su específica aplicación. Esta elección es una de las más importantes; esta puede determinar si el problema se resuelve rápida o lentamente y, de hecho, si la solución es encontrada en todos.

# APÉNDICE C

## ALGORITMOS EVOLUTIVOS: ALGORITMOS GENÉTICOS.

### C.1 INTRODUCCIÓN.

En este apéndice se describe la técnica llamada algoritmos genéticos que forma parte de la familia de los algoritmos evolutivos, en este apéndice se verán los principales paradigmas de la computación evolutiva pero enfocándose en los algoritmos genéticos que son los que se utilizaron en la realización de este trabajo. También se podrá observar algunas breves comparaciones entre las diferentes estrategias evolutivas, las diferencias de los AG's con respecto a los métodos convencionales, así como sus ventajas. Para finalizar se describirá un algoritmo genético y se realizará un ejemplo de optimización utilizando los AG's [88-91]

#### C.1.1 PRINCIPALES PARADIGMAS DE LOS ALGORITMOS EVOLUTIVOS

El término *computación evolutiva* o *algoritmos evolutivos*, realmente engloba una serie de técnicas inspiradas biológicamente (en los principios de la teoría Neo-Darwiniana de la evolución natural). En términos generales, para simular el proceso evolutivo en una computadora se requiere[92-94]:

- Codificar las estructuras que se replicarán.
- Operaciones que afecten a los “individuos”.
- Una función de aptitud.
- Un mecanismo de selección.

Aunque hoy en día es cada vez más difícil distinguir las diferencias entre los distintos tipos de algoritmos evolutivos existentes, por razones sobre todo históricas, suele hablarse de tres paradigmas principales:

- Programación Evolutiva
- Estrategias Evolutivas
- Algoritmos Genéticos

Cada uno de estos paradigmas se originó de manera independiente y con motivaciones muy distintas. Aunque este trabajo se concentrará principalmente en el tercero (los algoritmos genéticos).

Algunas aplicaciones de la programación evolutiva son:



- Predicción
- Generalización
- Juegos
- Control automático
- Problema del viajero
- Planeación de rutas
- Diseño y entrenamiento de redes neuronales
- Reconocimiento de patrones

Algunas aplicaciones de las estrategias evolutivas son:

- Problemas de ruteo y redes
- Bioquímica
- Óptica
- Diseño en ingeniería
- Magnetismo

### **C.1.2. Estrategias evolutivas Vs. Programación Evolutiva**

La Programación Evolutiva usa normalmente selección estocástica, mientras que las estrategias evolutivas usan selección determinística.

Ambas técnicas operan a nivel fenotípico (es decir, no requieren codificación de las variables del problema).

La programación evolutiva es una abstracción de la evolución al nivel de las especies, por lo que no se requiere el uso de un operador de recombinación (diferentes especies no se pueden cruzar entre sí). En contraste, las estrategias evolutivas son una abstracción de la evolución al nivel de un individuo, por lo que la recombinación es posible[95,96].

## **C.2 ALGORITMOS GENÉTICOS**

Los algoritmos genéticos (denominados originalmente “planes reproductivos genéticos”, pero se hizo popular bajo el nombre “algoritmos genéticos”) fueron desarrollados por John H. Holland a principios de los 1960s, motivado por resolver problemas de aprendizaje de máquina.

Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda basados en mecanismos de selección natural y naturaleza genética. Toman la analogía del mundo físico; operan creando una población inicial de

soluciones mediante combinaciones de sobrevivencia de estructuras representadas por cadenas de bits que se desenvuelven a través de generaciones. En cada generación, un nuevo conjunto de cadenas se crea con piezas de cadenas de generaciones anteriores. Las soluciones con aptitudes altas se aparean con otras soluciones por cruzamiento de partes de una cadena solución con otra. Las cadenas solución se mutan. A través del tiempo, las operaciones básicas de cruzamiento, mutación y reproducción limpian desechando las soluciones con aptitudes pobres y se van reproduciendo las soluciones con aptitudes altas. Los algoritmos genéticos no son un simple paseo aleatorio. Aprovechan eficientemente la información histórica para especular una nueva búsqueda de puntos con un desarrollo de mejoramiento esperado. Los esquemas de reproducción artificial se desarrollaron por primera vez en los años 70's y llegan a ser más populares en los 80's. La investigación tiene dos objetivos: (1) resumir y alcanzar rigurosamente los procesos adaptándose a sistemas naturales. (2) diseñar software de sistemas artificiales que guarden los mecanismos importantes de sistemas naturales.

El tema central de la investigación en algoritmos genéticos ha sido su robustez. Si un sistema artificial es más robusto, se reducen o eliminan rediseños costosos. Se alcanzan altos niveles de adaptabilidad, existiendo sistemas que desarrollan funciones más extensas y mejores. Las características de auto reparación, auto dirección y reproducción son las reglas para sistemas biológicos, considerando que estas características son escasas en sistemas artificiales.

Los algoritmos genéticos prueban teórica y empíricamente que proporcionan robustez en la búsqueda de espacios complejos. Son computacionalmente simples con una poderosa búsqueda de mejoramiento. Además no se limitan a suposiciones de restricción acerca del espacio de búsqueda (suposiciones acerca de continuidad, existencia de derivadas y otras materias).

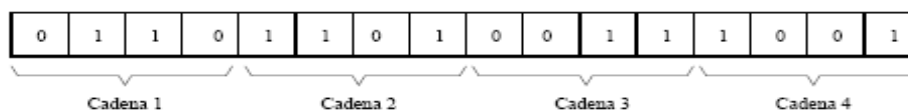
El algoritmo genético enfatiza la importancia de la cruce sexual (operador principal) sobre el de la mutación (operador secundario), y usa selección probabilística[97-99].

El algoritmo básico es el siguiente:

- Generar (aleatoriamente) una población inicial.
- Calcular aptitud de cada individuo.
- Seleccionar (probabilísticamente) en base a aptitud.
- Aplicar operadores genéticos (cruza y mutación) para generar la siguiente población.
- Ciclar hasta que cierta condición se satisfaga.

La representación tradicional es la binaria, tal y como se ejemplifica en la figura C.1

**Figura C.1 Ejemplo de la codificación (mediante cadenas binarias) usada tradicionalmente con los algoritmos genéticos.**





A la cadena binaria se le llama “cromosoma”. A cada posición de la cadena se le denomina “gene” y al valor dentro de esta posición se le llama “alelo”.

Para poder aplicar el algoritmo genético se requiere de los 5 componentes básicos siguientes:

- Una representación de las soluciones potenciales del problema.
- Una forma de crear una población inicial de posibles soluciones (normalmente un proceso aleatorio).
- Una función de evaluación que juegue el papel del ambiente, clasificando las soluciones en términos de su “aptitud”.
- Operadores genéticos que alteren la composición de los hijos que se producirán para las siguientes generaciones.
- Valores para los diferentes parámetros que utiliza el algoritmo genético (tamaño de la población, probabilidad de cruce, probabilidad de mutación, número máximo de generaciones, etc.)

### C. 2.1 Algoritmos Genéticos Vs. otras Estrategias Evolutivas

El AG usa selección probabilística al igual que la Programación Evolutiva, y en contraposición a la selección determinística de las Estrategias Evolutivas.

El AG usa representación binaria para codificar las soluciones a un problema, por lo cual se evoluciona el genotipo y no el fenotipo como en la Programación Evolutiva o las Estrategias Evolutivas.

El operador principal en el AG es la cruce, y la mutación es un operador secundario. En la Programación Evolutiva, no hay cruce y en las Estrategias Evolutivas es un operador secundario.

Ha sido demostrado que el AG requiere de elitismo (o sea, retener intacto al mejor individuo de cada generación) para poder converger al óptimo.

Los AGs no son, normalmente, auto-adaptativos, aunque el uso de dicho mecanismo es posible, y ha sido explorado extensivamente en la literatura especializada.

Algunas aplicaciones de los AGs son las siguientes:

- Optimización (estructural, de topologías, numérica, combinatoria, etc.)
- Aprendizaje de máquina (sistemas clasificadores)
- Bases de datos (optimización de consultas)
- Reconocimiento de patrones (por ejemplo, imágenes)
- Generación de gramáticas (regulares, libres de contexto, etc.)
- Planeación de movimientos de robots



- Predicción

### **C.3 DIFERENCIA DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS CON LOS MÉTODOS CONVENCIONALES**

La principal diferencia de los algoritmos genéticos (AGs) con los métodos convencionales es la robustez, aunque difieren de otras maneras. Las cuatro maneras más importantes que los AGs difieren de la optimización normal y los procedimientos de búsqueda son:

1. Los AGs trabajan con una codificación de los conjuntos de los parámetros, no los parámetros por si mismos.
2. Los AGs buscan una población de puntos, no un punto simple.
3. Los AGs buscan información que es de provecho (función objetivo), no aquella que proviene de información auxiliar.
4. Los AGs usan reglas de transición probabilística, no reglas deterministas.

Muchas técnicas de búsqueda requieren mucha información auxiliar para trabajar. Por ejemplo, las técnicas de gradiente necesitan derivadas (calculadas analíticamente o numéricamente) para habilitar la subida de un pico que se presente. En contraste, los AGs no necesitan información auxiliar: Los AGs son ciegos. Para desarrollar una búsqueda efectiva, requieren solamente valores de la función objetivo asociados con cadenas individuales. Estas características hacen que los AGs establezcan un método de búsqueda de muchos esquemas.

Juntando las cuatro diferencias - Uso directo de un código, búsqueda de una población, ceguera para la información auxiliar, y operadores aleatorios - contribuyen a que los AGs sean robustos y resulten ventajosos sobre otras técnicas usadas comúnmente. En la siguiente sección se explica un algoritmo simple que consta de tres operadores básicos.

### **C.4 VENTAJAS DE LAS TÉCNICAS EVOLUTIVAS**

Es importante destacar las diversas ventajas que presenta el uso de técnicas evolutivas para resolver problemas de búsqueda y optimización:

- Simplicidad Conceptual.
- Amplia aplicabilidad.
- Superiores a las técnicas tradicionales en muchos problemas del mundo real.
- Tienen el potencial para incorporar conocimiento sobre el dominio y para hibridizarse con otras técnicas de búsqueda/optimización.
- Pueden explotar fácilmente las arquitecturas en paralelo.
- Son robustas a los cambios dinámicos.
- Generalmente pueden auto-adaptar sus parámetros.

- Capaces de resolver problemas para los cuales no se conoce solución alguna.

### C.5 ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE

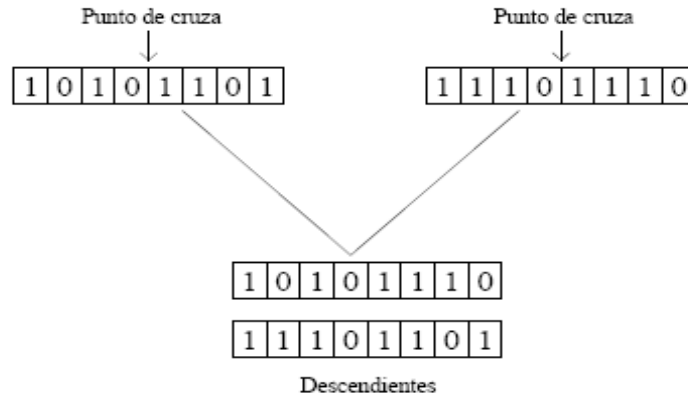
Un AG simple esta compuesto de tres operadores:

1. Reproducción
2. Cruzamiento
3. Mutación

La *reproducción* es un proceso donde se copian cadenas individuales acorde a los valores de la función objetivo. Para copiar las cadenas se hace de acuerdo a sus valores ajustabilidad donde las cadenas con valores altos tienen una probabilidad alta de contribuir en una o más descendencias en la siguiente generación. Una vez que una cadena se selecciona para reproducirse, se hace una replica exacta de la cadena.

Después de la *reproducción*, el *cruzamiento* (figura C.2) se lleva a cabo mediante dos pasos. Primeramente, las cadenas son apareadas encogiéndolas aleatoriamente. Segundo, cada par de cadenas se cruzan como sigue: una posición  $k$  a lo largo de la cadena se escoge aleatoriamente en forma uniforme entre 1 y la longitud de la cadena menos uno (1,  $l-1$ ). Dos cadenas nuevas se crean por un cambio de todos los caracteres entre la posición  $k + 1$  y  $l$ .

**Figura C.2 Esquema para mostrar el cruzamiento entre dos cadenas, mostrando el sitio de cruce escogido aleatoriamente.**



La *mutación* juega un papel secundario en la operación de los AGs. La mutación es necesaria, al igual que la reproducción y el cruzamiento. La mutación sirve para evitar convergencias prematuras (una situación donde miembros de la población tienen cadenas similares de bits sin tender a un punto óptimo del espacio) previniendo incestos, esto es, no permitiendo que miembros similares de la población se apareen. En la siguiente sección se muestra un ejemplo sencillo para entender mejor los tres operadores básicos de los AGs.

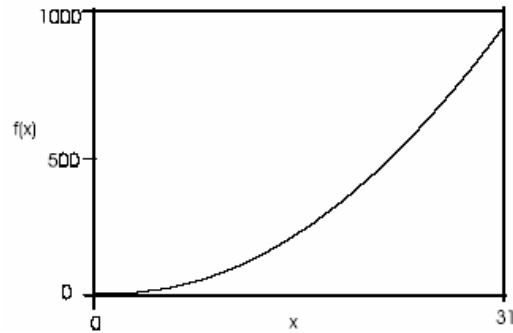
### C.6 EJEMPLO DE UN ALGORITMO GENÉTICO

Como ejemplo, considerar el problema de optimización mostrado en la figura C.3 Se desea maximizar la función  $f(x) = x^2$  en el intervalo  $[0,31]$ . Con los métodos más tradicionales se trataría de jugar con el parámetro  $x$ , escogiéndolo de tal manera hasta obtener el valor más alto de la



función objetivo. Con AGs, el primer paso del proceso de optimización es codificar el parámetro  $x$  como una cadena de longitud finita.

**Figura C.3 Ejemplo de optimización de la función  $f(x)=x^2$  en el intervalo entero [0,31].**



Se comienza con una población de cadenas y consecutivamente generaciones sucesivas de poblaciones de cadenas. Por ejemplo en este problema se tienen cadenas de cinco bits. Donde la primera generación se forma por el lanzamiento de una moneda 20 veces (águila=1, sol=0), con tamaño de población  $n=4$ .

11001  
00110  
10010  
11000

una vez creada la población inicial, se procede a evaluar la ajustabilidad de cada cadena, esto se hace por ejemplo aplicando la base 10 de números, por ejemplo para la cadena 10010 es:

$$1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 16 + 2 = 18$$

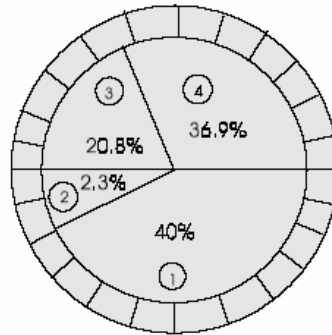
Para una cadena de cinco bits (código binario) se puede obtener números entre 0 (00000) y 31 (11111). Aplicando las operaciones básicas de AGs (reproducción, cruzamiento y mutación), la ajustabilidad de la cadena 01000 decodificada en manera binaria es  $2^3 = 8$ . De aquí que para la cadena 01000  $x = 8$ . Para calcular su ajustabilidad simplemente es el cuadrado del valor de  $x$  obteniendo una ajustabilidad de  $f(x) = 64$ . Otros  $x$  y  $f(x)$  se pueden obtener de manera similar.

**Tabla C.1 Cadenas para el ejemplo y sus valores de aptitud**

No.	Cadena	Ajustabilidad	% del total
1	11001	625	40.0
2	00110	36	2.3
3	10010	324	20.8
4	11000	576	36.9
Total		1561	100.0

Una generación de un algoritmo genético se inicia con la reproducción. La selección de la nueva generación se lleva a cabo escogiendo un sitio de acuerdo al peso mediante una rueda de ruleta (figura C.4) cuatro veces.

Figura C.4 Asignación de reproducción mediante una rueda de ruleta con tamaños de aberturas de acuerdo a la aptitud de cada cadena. Datos tomados de las tablas C.1 y C.2.



Usando esta rueda de ruleta, la cadena 3 y 4 se reproducen en una copia, la cadena 1 se reproduce con dos copias, la cadena 2 no se reproduce. Como se muestra al centro de la tabla C.2.

**TABLA C.2 Algoritmo genético a mano**

No. de Cadena	Población Inicial (Generada Aleatoriamente)	Valor de x	$f(x)=x^2$	$p_{select_i} = \frac{f_i}{\sum f}$	Copia Esperada $\frac{f_i}{f}$	Conteo Actual (de Rueda de Ruleta)
1	1 1 0 0 1	25	625	0.40	1.601	2
2	0 0 1 1 0	6	36	0.023	0.092	0
3	1 0 0 1 0	18	324	0.208	0.830	1
4	1 1 0 0 0	24	576	0.369	1.475	1
Suma			1561	1.00	4.00	4.0
Promedio			<u>390</u>	0.25	1.00	1.0
Máximo			<u>625</u>	0.40	1.601	

Grupo escogido después de la Reproducción (Se muestra el Sitio de Cruce)	Apareo (Seleccionado Aleatoriamente)	Sitio de Cruzamiento (Seleccionado Aleatoriamente)	Nueva población	Valor de x	$f(x)=x^2$
1 1   0 0 1	2	2	1 1 0 0 1	25	625
1 1   0 0 1	1	2	1 1 0 0 1	25	625
1 0 0   1 0	4	3	1 0 0 0 0	16	256
1 1 0   0 0	3	3	1 1 0 1 0	26	676
					2182
					<u>546</u>
					<u>676</u>

Notas:

- 1) La población inicial se forma de cuatro repeticiones de lanzar cinco veces una moneda (águila=1, sol=0)
- 2) La reproducción se desarrolla lanzando cuatro veces un dardo a la rueda de ruleta (aleatoriamente).
- 3) El cruzamiento es a través de una decodificación binaria de 2 lanzes de moneda (SS=00<sub>2</sub>=0=sitio de cruce 1, AA=11<sub>2</sub>=3= sitio de cruce 4).
- 4) Probabilidad de cruzamiento se supone que es la unidad  $p_c=1.0$ .
- 5) Probabilidad de mutación es 0.001,  $p_m=0.001$ , Mutaciones esperadas= $5*4*0.001=0.02$ . En este caso ninguna mutación se espera en cada generación.

Ahora por cruzamiento (apareo de cadenas) se tienen dos pasos: (1) las cadenas son apareadas aleatoriamente, escogiendo un par con más ajustabilidad y (2) las cadenas son apareadas cruzándose entre ellas, escogiendo aleatoriamente el sitio de cruzamiento. Refiriéndose nuevamente a la tabla 4.2, la selección aleatoria de cadenas, resulta que la primera es escogida para aparearse con la segunda. Con un cruzamiento el sitio 2, las dos cadenas 11001 y 11001 se cruzan y crean las nuevas cadenas 11001 y 11001.

La mutación se hace bit por bit, donde se supone que la probabilidad de mutación =0.001. Con 20 transferencias de posiciones de bit se espera  $20*0.001=0.02$  bits, donde esto indica que ningún bit será cambiado.

Siguiendo las operaciones de reproducción, cruzamiento y mutación, las nuevas poblaciones se prueban. Como se puede observar el valor máximo de ajustabilidad es incrementado de 625 a 676 de la generación 0 a la 1 (tablas C.1 y C.2). Donde se puede decir que el algoritmo genético presenta una convergencia al óptimo que es 961. La siguiente tabla se muestra las cadenas solución hasta la población no.3.

**TABLA C.3 Cadenas de solución hasta la generación 3**

Población no.2.	Valor de x	Valor de $x^2$
1 1 0 1 0	26	676
1 1 0 1 0	26	676
1 1 0 1 1	27	729
1 1 0 0 0	24	576
Población no.3.	Valor de x	Valor de $x^2$
1 1 0 0 0	24	576
1 1 0 1 1	27	729
1 1 0 0 0	24	576
1 1 0 1 1	27	729

Como se observa en la tabla anterior, el valor de 729 se duplica de la población 1 a la población 2, esto muestra que el algoritmo genético alcanza el óptimo. Las demás poblaciones no se muestran debido a que el valor de 729 permanece dominante, esto se debe a que la probabilidad de mutación es muy pequeña ( $p_m=0.001$ ), y no se producen mutaciones en cada población y por lo tanto se provocan incestos, y esto no permite que el algoritmo genético explore todo el espacio.

Ahora, si la probabilidad de mutación se aumenta de  $p_m=0.001$  a  $p_m=0.1$ , se tiene que el número de mutaciones esperadas es:  $5*4*0.1=2$ . En la siguiente tabla se muestran las mejores cadenas solución para cada población empleando una  $p_m=0.1$ .

**TABLA C.4 Mejores cadenas para una probabilidad de mutación  $p_m=0.1$**

No. de población	Cadena solución	Valor de x	Valor de $x^2$
1	1 1 0 0 0	24	576
2	1 1 0 0 1	25	625
3	1 1 0 0 1	25	625
4	1 1 0 0 1	27	729
5	1 1 0 0 1	25	625
6	1 1 0 0 1	25	625
7	1 1 0 0 1	25	625
8	1 1 0 0 1	25	625
9	1 1 1 1 1	31	961

Como se observa en la tabla anterior, de la población 5 a la 8 la cadena solución permanece sin cambio, y hasta la población 9 se alcanza el óptimo de 961, de aquí se concluye que la probabilidad de mutación es importante para prevenir incestos, provocando que el algoritmo genético explore todo el espacio.

La pregunta obvia es: ¿Como los algoritmos genéticos se desenvuelven de generación en generación?, esto se puede observar en las cadenas que presentan esquemas de la forma 11### son las que sobreviven de generación en generación, formando esquemas o similitudes de planillas.

Los AGs buscan espacios solución mediante recombinaciones y manteniendo *esquemas* de la población. Cada miembro de la población muestrea todos los posibles *esquemas* mediante sus bits correspondientes. Por ejemplo, la cadena de bits 1 0 0 1 0 muestrea la región de espacio, 1 #### (# representa 0 o 1). Así como también muestrea la región de espacio # 0 ###, etc. De ésta manera, esquemas en el espacio se muestrean implícitamente. Esta habilidad inherente de exploración de muestreo de los AGs es llamada: paralelismo implícito. Esto se refiere a que el muestreo de numerosos esquemas y un efectivo remuestreo de esquemas buenos, se mantienen a través de generaciones.



Después de que el algoritmo de optimización ha sido aplicado al modelo, se debe ser capaz de reconocer si ha encontrado una solución. En muchos casos, existen elegantes expresiones matemáticas conocidas como condiciones de optimabilidad para verificar que el grupo de las variables son de hecho la solución del problema. Si las condiciones de optimabilidad no son satisfechas, pueden dar información útil de cómo puede ser mejorada la solución estimada. Finalmente, el modelo puede mejorar aplicando técnicas tales como la del análisis de sensibilidad, la cual indica la sensibilidad de la solución para realizar cambios en el modelo y en los datos.

## B.2 FORMULACIÓN MATEMÁTICA.

En términos matemáticos, la optimización es la minimización o maximización de una función sujeta a limitaciones en sus variables. Utilizamos la siguiente notación:

$x$  es un vector de variables, también llamado *incógnitas* o *parámetros*;  
 $f$  es la función objetivo, una función de  $x$  que queremos maximizar o minimizar;  
 $c$  es el vector de límites que las incógnitas deben satisfacer. Este es un vector función de las variables  $x$ . El número de componentes en  $c$  es el número de restricciones individuales que colocaremos en las variables.

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(x) \quad \text{sujeto a} \quad \begin{cases} c_i(x) = 0 & i \in \mathcal{E} \\ c_i(x) \geq 0 & i \in I \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

Aquí  $f$  y cada  $c_i$  son escalares- el valor de las funciones de las variables  $x$ , y  $I, \mathcal{E}$  son grupos de índices.

Como un simple ejemplo, considere el problema

$$\min(x_1 - 2)^2 + (x_2 - 1)^2 \quad \text{sujeto a} \quad \begin{cases} x_1^2 - x_2 \leq 0 \\ x_1 + x_2 \leq 2 \end{cases} \quad (\text{B.2})$$

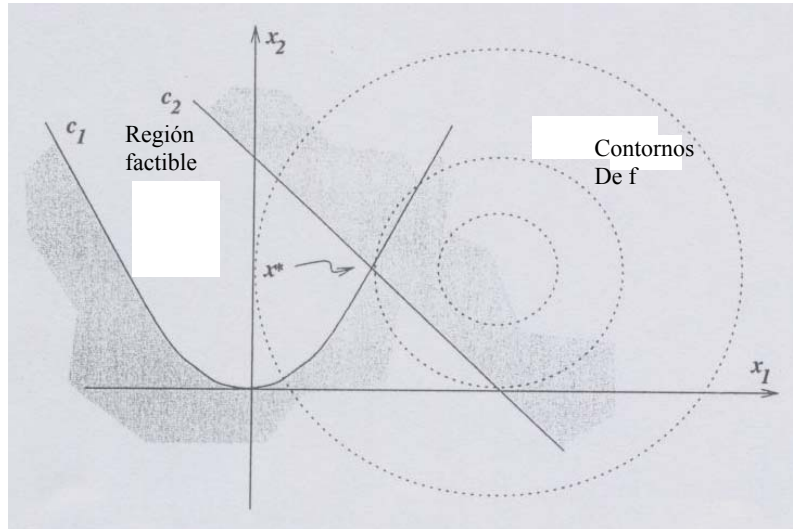
Podemos escribir este problema en la forma (1.1) definiendo

$$f(x) = (x_1 - 2)^2 + (x_2 - 1)^2, \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix},$$

$$c(x) = \begin{bmatrix} c_1(x) \\ c_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_1^2 + x_2 \\ -x_1 - x_2 + 2 \end{bmatrix}, \quad I = \{1, 2\}, \quad \mathcal{E} = \emptyset.$$

La Figura B.1 muestra los contornos de la función objetivo, es decir, el grupo de puntos cuales para  $f(x)$  tienen un valor constante. También se muestra la región factible, la cual es el grupo de puntos que satisfacen todos los límites, y el punto óptimo  $x^*$ , la solución del problema. Note que es sombreado el lado no factible de los límites de la desigualdad.

**Figura B.1 Representación geométrica de un problema de optimización**



El ejemplo anterior también ilustra que las transformaciones son frecuentemente necesarias para expresar un problema de optimización en la forma (B.1). Frecuentemente esto es más natural o conveniente para etiquetar a las incógnitas con dos o tres subíndices, o para referirse a las variables diferentes para diferentes nombres, así que el etiquetar de nuevo es necesario para alcanzar la forma estándar. Otra diferencia común es que requerimos *maximizar* más que *minimizar*  $f$ , pero podemos acomodar este cambio fácilmente *minimizando*- $f$  en la ecuación (B.1).

### B.2.1 EJEMPLO: UN PROBLEMA DE TRANSPORTACIÓN.

Una compañía química tiene dos fábricas  $F_1$  y  $F_2$  y una docena de distribuidores  $R_1, \dots, R_{12}$ . Cada fábrica  $F_i$  puede producir  $a_i$  toneladas de cierto producto químico cada semana;  $a_i$  es llamada *capacidad* de la planta. Cada distribuidor  $R_j$  tiene una demanda conocida de  $b_j$  toneladas del producto. El costo de envío de una tonelada del producto de la factoría  $F_i$  al distribuidor  $R_j$  es  $c_{ij}$ .

El problema es determinar cuanto cuesta enviar el producto de cada fábrica a cada distribuidor para satisfacer todos los requerimientos y minimizar el costo. Las variables del problema son  $x_{ij}$ ,  $i = 1, 2$ ,  $j = 1, \dots, 12$ , donde  $x_{ij}$  es el número de toneladas del producto enviado de la fábrica  $F_i$  al distribuidor  $R_j$ ; observe la figura B.2. Podemos escribir el problema como:



$$\min \sum_{ij} c_{ij} x_{ij} \tag{B.3}$$

sujeto a

$$\sum_{j=1}^{12} x_{ij} \leq a_i, \quad i = 1, 2, \tag{B.4a}$$

$$\sum_{i=1}^2 x_{ij} \geq b_j, \quad j = 1, \dots, 12, \tag{B.4b}$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \quad j = 1, \dots, 12. \tag{A.4c}$$

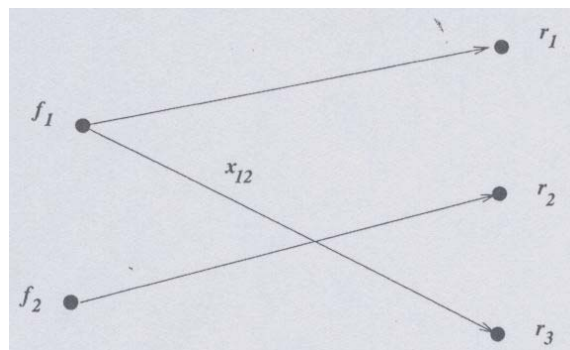
En un modelo practico para este problema, podremos también incluir costos asociados de la manufactura y almacén del producto. Este tipo de problema es conocido como problema de *programación lineal*, desde que la función objetivo y los todos límites son funciones lineales.

### B.2.2 OPTIMIZACION CONTINUA CONTRA DISCRETA.

En algunos problemas de optimización las variables tienen sentido solo si toman valores enteros. Suponer que en el problema de transportación, las fabricas producen tractores en lugar de químicos. En este caso, la  $x_{ij}$  puede representar enteros (esto es, el número de tractores enviados) mas que números reales. (No tendría mucho sentido avisar a la compañía enviar 5.4 tractores de la fabrica 1 al distribuidor 12). La estrategia obvia es ignorar el requisito de integralidad, resolviendo el problema con variables reales, y entonces redondear todos los componentes al entero más cercano no garantiza obtener soluciones que sean cercanas al óptimo. Problemas de este tipo deben manejarse utilizando la herramienta de la optimización discreta. La formulación matemática cambia añadiendo el límite

$$x_{ij} \in \mathbf{Z} \quad \text{para toda } i \text{ e } j,$$

**Figura B.2 Problema de transportación**



a los límites existentes (B.4), donde  $Z$  es el grupo de todos los enteros. El problema es conocido como *problema de optimización entera*.

El término genérico de optimización discreta usualmente se refiere a los problemas en que la solución que buscamos es uno de los números de un número de objetos en un grupo finito. Por el contrario, los problemas de *optimización continua* encuentran una solución desde un incontable grupo finito – típicamente un grupo de vectores con componentes reales. Los problemas de optimización continua son normalmente más fáciles de resolver, debido a la suavidad de las funciones hace posible usar la información del objetivo y límite en un punto particular  $x$  para deducir información acerca del comportamiento de la función en todos los puntos cercanos a  $x$ . No puede hacerse la misma declaración para los problemas discretos, donde los puntos que son cercanos en algún sentido pueden tener valores marcados diversos de la función. Por otra parte, el grupo de las posibles soluciones es muy grande para hacer una búsqueda exhaustiva para el mejor valor en este grupo finito [9].

Algunos modelos contienen variables que pueden variar continuamente y otros que pueden lograr solo valores enteros; se refieren a estos como *problemas mixtos de programación entera*.

### B.2.3 OPTIMIZACION LIMITADA E ILIMITADA.

Los problemas con la forma general (A.1) pueden ser clasificados acuerdo a la naturaleza de la función objetivo y los límites (lineal, no lineal, convexo), el número de las variables (largo o pequeño), la suavidad de las funciones (diferenciable o no diferenciable), y etcétera. Posiblemente la distinción más importante es entre los problemas que tienen constantes en las variables y aquellas que no las tienen.

Problemas de *optimización ilimitadas* se presentan directamente en muchas aplicaciones prácticas. Si existen límites naturales en las variables, algunas veces es seguro desatenderlos y asumir que ellos no tienen efecto en la solución óptima. Los problemas ilimitados se presentan también como reformulaciones de problemas de optimización limitados, en cuales las constantes son remplazadas por términos de penalización en la función objetivo que tiene el efecto de desalentar los límites de violación.

Problemas de optimización limitada se presentan desde modelos que incluyen límites explícitos en las variables. Estos límites pueden ser simples límites como  $0 \leq x_i \leq 100$ , más general límites lineales tales como  $\sum_i x_i \leq 1$ , o desigualdades no lineales que representen una relación compleja entre las variables.

Cuando la función objetivo y todas las constantes son funciones lineales de  $x$ , el problema es un problema de *programación lineal*.



### B.2.4 OPTIMIZACION GLOBAL Y LOCAL.

Los algoritmos de optimización más rápidos buscan solo una solución local, un punto en el cual la función objetivo es más pequeña que todos los demás puntos factibles a su alrededor, en su vecindad. No siempre encuentran a la mejor de todas las soluciones, que es, la *solución global*. Las soluciones globales son necesarias en algunas aplicaciones, pero son usualmente difíciles de identificar y aun más difícil de localizar. Un importante caso especial es la *programación convexa*, en la cual todas las soluciones locales son también soluciones globales. Los problemas de optimización lineal caen en la categoría de programación convexa. Sin embargo, problemas generales no lineales, limitados o ilimitados, pueden procesar soluciones locales que no son soluciones globales.

### B.2.5 OPTIMIZACION ESTOCASTICA Y DETERMINISTICA.

En algunos problemas de optimización, el modelo no puede ser completamente especificado esto depende de las cantidades que son desconocidas en el momento de la formulación. En el problema de transportación, por ejemplo, la demanda del cliente  $b_j$  en los distribuidores no puede ser precisamente especificada en la práctica. Esta característica es compartida por muchos modelos de planeación económicos y financieros, los cuales frecuentemente dependen en el movimiento futuro de los índices de interés y el futuro comportamiento de la economía.

Sin embargo, frecuentemente, modeladores pueden predecir o estimar las cantidades desconocidas con un cierto grado de confianza. Ellos pueden, por ejemplo, con un número de posibles escenarios para los valores de las cantidades desconocidas e incluso asignar una probabilidad a cada escenario. En el problema de transportación, el encargado del distribuidor puede ser capaz de estimar patrones de demanda basados en el comportamiento del cliente anterior, y podrían ser escenarios diferentes para la demanda que corresponde a los diferentes factores temporales o condiciones económicas. Los algoritmos de *optimización estocástica* usan esas cuantificaciones de la incertidumbre para producir soluciones que optimiza el funcionamiento esperado del modelo.

Los problemas de *optimización determinística*, son en los cuales el modelo es completamente especificado.

## B.3 ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN.

Los algoritmos de optimización son iterativos. Comienzan con una conjetura inicial de los valores óptimos de las variables y generan una secuencia de mejoría estimada hasta que alcanzan una solución. La estrategia usada para mover de una iteración a la siguiente varía de un algoritmo a otro. La mayoría de las estrategias hacen uso de la función objetivo, las constantes  $c$ , y posiblemente la primera y segunda derivada de estas funciones. Algunos algoritmos acumulan información recolectada en iteraciones previas, mientras otros usan



solo información local del punto actual. Sin importar de estas especificaciones, todos los buenos algoritmos deben poseer las siguientes propiedades:

- Robustez. Deben funcionar bien en una amplia variedad de problemas en sus clases, para todas las elecciones razonables de las variables iniciales.
- Eficiencia. No deben requerir mucho tiempo de cómputo o almacenamiento.
- Exactitud. Deben ser capaces de identificar una solución con precisión, sin ser excesivamente sensible a los errores en los datos o al hacer redondeos aritméticos de errores que ocurren cuando el algoritmo es impreso en una computadora.

Estas metas pueden estar en conflicto. Por ejemplo, un método de rápida convergencia para una programación no lineal puede requerir de mucho almacenamiento computacional en problemas grandes. Por otra parte un método robusto puede ser mucho más lento. El punto central de la optimización numérica es la compensación entre índice de convergencia y requerimientos de almacenamiento, y entre robustez y velocidad.

## B.4 TECNICAS CONVENCIONALES DE OPTIMIZACIÓN

Las operaciones de búsqueda (OR) y la ciencia dirigida (MC) son disciplinas que procuran ayudar a la decisión directiva realizando modelos matemáticos que describen la esencia de un problema y aplican procedimientos matemáticos para resolver el modelo.

Primero exploramos la naturaleza de los modelos de optimización en general. El modelo matemático de un problema de negocios es un sistema de ecuaciones y expresiones matemáticas que describen la esencia del problema. Si existen para realizar  $n$  decisiones cuantificables, son representados por variables de decisión (es decir, beneficio) es redefinido como una función de las variables de decisión (es decir,  $\text{Beneficio} = 2x_1 + 5x_2$ ). Esta función es llamada *función objetivo*. Si existen restricciones en los valores que las variables de decisión pueden tomar, estas se expresan matemáticamente. Estas restricciones son típicamente expresadas como desigualdades (es decir,  $x_1 + 2x_2 \leq 3$ ) o ecuaciones (es decir,  $x_1 x_2 = 7$ ), y son llamados *limites*. La meta es entonces elegir los valores de las variables de decisión que alcanzan el mejor valor de la función objetivo sujeta a satisfacer cada una de las constantes.

Por ejemplo, considerar el problema de elegir el nivel de producción de  $n$  diferentes productos para maximizar el beneficio, sujeto a  $m$  restricciones en los niveles de producción (es decir, debido al límite de recursos). El modelo entonces es elegir  $x_1, x_2, \dots, x_n$  para

Maximizar  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$



Sujeto a

$$\begin{aligned}
 g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq b_1 \\
 g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq b_2 \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) &\leq b_m
 \end{aligned}
 \tag{B.5}$$

y

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0.$$

En este modelo, las variables de decisión  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  representan los niveles de producción, la función objetivo  $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  mide el beneficio, y los límites son representados por las desigualdades para  $g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_i$  para  $i=1, 2, \dots, m$ .

Cualquier elección de los valores de  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$  es llamado *solución*, mientras que una solución satisfaga a todas las constantes es una solución *factible*. El grupo de todas las soluciones factibles es llamado región factible. Una solución en la región factible que minimiza la función objetivo es llamada una *solución óptima*.

Otros modelo de optimización pueden tener la meta de minimizar la función objetivo (es decir, minimizar los costos). También, los modelos pueden tener una mezcla de límites, algo con  $\leq$ , con  $\geq$ , y algo con  $=$ , o puede no tener límites.

#### B.4.1 CLASIFICANDO MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

Antes de resolver un modelo de optimización, es importante considerar la forma y las propiedades matemáticas de la función objetivo, límites, y las variables de decisión. Por ejemplo, la función objetivo puede ser lineal o no lineal, diferenciable o no, cóncava o convexa, etc. Las variables de decisión pueden ser continuas o discretas. La región factible puede ser convexa o no convexa. Estas diferencia cada impacto de cómo el modelo puede resolverse, y así los modelos de optimización son clasificados de acuerdo a estas diferencias. Esta sección define un número de propiedades matemáticas, y se clasifican modelos de optimización de acuerdo a estas propiedades.

Muchas soluciones de técnicas de optimización dependen de la función objetivo y/o las funciones en los límites siendo *funciones lineales*. Una función es lineal si se puede expresar en la forma  $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2, \dots, + c_nx_n$ , donde las  $c_i$  son constantes. Si la función objetivo y todas las funciones de límite son funciones lineales, entonces el modelo es llamado *modelo de programación lineal*.

En (B.5), fue una simple meta- maximizar el beneficio. Sin embargo, algunas veces no es posible incluir todos los objetivos directivos en un simple objetivo sobrepuesto, tal como maximizar el beneficio o minimizar el costo. Por estas razones, los modelos pueden incluir funciones de objetivo *múltiple* y el análisis del problema puede requerir una consideración

individual de los objetivos separados. La *programación meta* proporcionar una forma de esforzarse hacia varios objetivos *simultáneamente*.

Las técnicas de programación lineal y no lineal convencionalmente asumen que las variables de decisión son *continuas*. Esto es, las variables de decisión son permitidas para tener cualquier valor que satisfaga a los límites, incluyendo valores no lineales. En muchas aplicaciones, sin embargo, las variables de decisión tienen sentido solo si tienen valores enteros. Por ejemplo, esto es frecuentemente necesario asignar persona o equipo en cantidades enteras. Así, algunos modelos de optimización incluyen variables de decisión discretas, usualmente restringiendo a una o todas las variables de decisión a valores enteros. Un modelo donde todas las variables requieren ser enteros es llamado *modelo de programación entera*. Si alguna de las variables son continuas, pero otras requieren ser enteras, es llamado *modelo de programación entera-mixta*. Un modelo de programación entera puede ser categorizado como un modelo de programación lineal (si todas las funciones en el modelo son lineales) o un modelo de programación no lineal entero (si cualquiera de las funciones es no lineal). Esto es común cuando se identifica un modelo de programación lineal de tipo entero para botar el adjetivo lineal.

Un modelo donde cualquier función objetivo o cualquiera de los límites incluye una función no lineal es llamado *modelo de programación no lineal*. Los problemas de programación no lineal se presentan en muchas diferentes formas. Un algoritmo simple no puede resolver todos estos diferentes tipos de problemas, en lugar de eso, los algoritmos han sido desarrollados para resolver casos individuales (tipos especiales) de problemas de programación no lineal. Por ejemplo, la función objetivo puede ser cóncava, convexa, o ninguna de ellas, diferenciable o no diferenciable, cuadrática o no, etc. Los límites pueden ser lineal o no lineal, o el problema puede ser libre (ilimitado). La región factible puede ser un grupo convexo. Muchos de estos términos y clasificaciones son definidos mas adelante.

#### 4.1 PROGRAMACION LINEAL

La programación lineal es una de las técnicas más utilizadas para operaciones de búsqueda y ciencia dirigida . Su nombre significa que la planeación (programación) esta realizada con un modelo matemático (llamado *modelo de programación lineal*) donde todas las funciones en el modelo son funciones *lineales*.

Considerar el ejemplo obtenido en (A.5). Si la contribución del beneficio de cada producto es proporcional al nivel de producción  $x_j$ , entonces cada producto contribuye un beneficio  $c_j x_j$  (donde  $c_j$  es una constante). Además suponer que  $b_i$  es la cantidad disponible de recurso  $i$ , y que el uso de cada recurso  $i$  es proporcional al nivel de producción  $x_j$  e igual a  $a_{ij} x_j$  (donde  $a_{ij}$  es una constante). El resultado del modelo de programación lineal es entonces elegir  $x_1, x_2, \dots, x_n$  para

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar} && c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n \\ &\text{Sujeto a} && \\ &&& a_{11} x_1 + a_{12} x_2 + \dots + a_{1n} x_n \leq b_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\
 * \\
 * \\
 a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m
 \end{aligned}
 \tag{B.6}$$

y

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0.$$

Otra forma común para un modelo de programación lineal es minimizar la función objetivo, sujeta a límites funcionales con signos  $\geq$  y límites no negativos. Entonces una interpretación típica es que la función objetiva representa el costo total para elegir una mezcla de actividades y los límites funcionales cubren diferentes tipos de beneficios. En particular, la función por el lado izquierdo cada límite funcional proporciona el nivel de un tipo particular de beneficios que son obtenidos desde la mezcla de actividades, y la constante en lado derecho presenta el nivel mínimo aceptable de beneficios. Aun otros modelos de programación tienen un símbolo de igualdad en lugar de desigualdad en algunos o todos los límites funcionales. Estos límites representan requerimientos ajustados para el valor de la función de lado izquierdo. Esto también es bastante común para modelos de programación de gran tamaño que incluyen una mezcla de límites funcionales- algunos con signos  $\leq$ , algunos con signos  $\geq$ , y algunos con signos  $=$ .

#### B.4.1.1 Algunas aplicaciones de la programación lineal

La programación lineal ha sido aplicada a una amplia variedad de problemas. Estas aplicaciones incluyen la determinación de la mejor mezcla de productos para producir dando un limitado grupo de recursos, calendarización del personal para minimizar el costo mientras se conoce los requerimientos del servicio, y mucho mas.

Un número de aplicaciones importantes ajustan un tipo de modelo de programación lineal llamado *problema del costo mínimo del flujo*. Una aplicación típica de este tipo implica buenos envíos a través de una red de distribución desde ciertos puntos de suministro a ciertos puntos de demanda. Proporcionando el suministro disponible desde cada punto de suministro, la cantidad necesaria en cada punto de demanda de la red de distribución, el objetivo es determinar como encaminar la mercancías para minimizar el costo total de envío.

Algunas otras importantes aplicaciones de programación lineal son casos especiales del problema del costo mínimo del flujo. Un caso especial, llamado *problema de transportación*, implica envíos directos desde los puntos de suministro a los puntos de demanda (donde solo los límites en cantidades de envíos son los suministrados y demandados en esos puntos), así solo las decisiones para realizar son que tanto cuesta enviar desde el punto de suministro hasta el punto de demanda. Un segundo caso especial, llamado *problema de asignación*, implica la asignación de personas (o máquinas o vehículos o plantas) para trabajar minimizando el costo total o el tiempo para presentar esas

tareas. *El problema de trayectorias más cortas*, el cual implica encontrar la ruta más corta (en distancia, costo, o tiempo) a través de una red desde un origen a un destino.

#### **B.4.1.1.2 Resolviendo modelos de programación lineal**

En 1947, Goerge Dantzig desarrollo un algoritmo eficiente, llamado *método simplex*, para encontrar una solución optimiza para un modelo de programación lineal. El método simplex explota algunas propiedades básicas de soluciones óptimas para modelos de programación lineal. Debido a que toda las funciones en el modelo son funciones lineales, el grupo de soluciones factibles (región factible) es convexa, como será definido más adelante. Los vértices de la región factible juegan un papel especial en encontrar una solución óptima. Un modelo tendrá una solución óptima si esta tiene cualquier solución factible y los límites evitan mejorar el valor de la función objetivo indefinidamente. Cualquier modelo debe tener exactamente una solución óptima o un número infinito de ellas. En el caso anterior, una solución óptima debe ser una cima de la región factible. En el último caso, en al menos dos vértices deben ser soluciones óptimas, y todas las combinaciones lineales convexas de estos vértices con los valores más favorables de la función objetivo para identificar todas las soluciones óptimas.

Basado en estos hechos, el método simplex es un algoritmo iterativo que solo examina vértices de la región factible. En cada iteración, utiliza procedimientos algebraicos para mover a lo largo un borde exterior de la región factible desde la cima actual a una cima adyacente que sea mejor. El algoritmo termina cuando una cima es alcanzada y no tiene mejores vértices adyacentes, debido a la convexidad de la región factible implica que esta cima es óptima.

El método simplex es un *algoritmo de tiempo exponencial*. Esto es, el tiempo de solución puede teóricamente crecer exponencialmente en el número de variables y límites. Sin embargo, esto ha probado consistentemente ser más eficiente en la práctica. Avanzando el tiempo tiende a crecer aproximadamente al cubo del número de los límites funcionales, y menos que lineal en el número de las variables. Los problemas con cientos de límites funcionales y variables de decisión son rutinariamente resueltas. Además continúa el mejoramiento en la implementación de la computadora del método simplex y sus variantes (particularmente *el método dual simplex*) ahora algunas veces hacen esto posible resolviendo problemas masivos extendiéndose en los cientos de miles de límites funcionales y millones de variables de decisión. Una manera para eficientar en tales grandes problemas es que la trayectoria seguida pase solo en una pequeña fracción de todos los vértices antes de alcanzar una solución óptima. El número de iteraciones (vértices atravesados) generalmente es el mismo orden de magnitud como el número de límites funcionales.

Versiones en otras versiones del método simplex también son capaces de resolver ciertos tipos especiales de problemas de programación lineal en solo una pequeña fracción del tiempo que podría requerir por el método simplex general. Por ejemplo, una de estas versiones es el *método de la red simplex*, el cual es ampliamente utilizado para resolver problemas del flujo de costos mínimos. Además, más similares algoritmos especializados

son capaces de resolver los casos especiales del problema del flujo de costo mínimo mencionado anteriormente, el problema de transportación, los problemas de asignación, el problema de trayectorias cortas, y el problema de máximo flujo.

En años recientes, ha habido una ráfaga de investigación para desarrollar *métodos de punto interior*. La aplicación de estos métodos para la programación lineal ha alcanzado un alto nivel de sofisticación. Estos algoritmos se mueven a través del interior de la región factible hasta que convergen a una solución óptima. Una característica clave de esta aproximación es que el número de iteraciones y el tiempo total de ejecución tienden a crecer muy lentamente (más lento que para el método simplex) como el tamaño del problema incrementa. Además, las mejores implementaciones tienden a ser más rápidas que el método simplex para problemas relativamente grandes. Sin embargo, esto no siempre es verdad, debido a la eficiencia de cada aproximación depende de varias maneras en la estructura especial en cada problema individual.

#### **B.4.1.2 Técnica: Programación meta**

Los modelos descritos en las otras secciones asumen que los objetivos de la organización conduciendo el estudio pueden ser abarcados en un simple objetivo de eliminación, como maximizar el beneficio total o minimizar el costo total, así este objetivo de eliminación puede expresarse en una simple función objetivo para el modelo. Sin embargo, esta asunción no siempre es realista. La dirección de algunas organizaciones frecuentemente se enfoca simultáneamente en una amplia variedad de objetivos deferentes. En este caso, se necesita una *decisión multicriterio*.

Han sido desarrollados un número considerable de decisiones multicriterio. Aquí se describe solo uno de estos, la técnica popular llamada *programación meta*.

La aproximación de la programación meta es establecer una meta numérica específica para cada uno de los objetivos, formula una función objetivo para cada objetivo, y luego busca una solución que minimice la penalización total determinada para faltar estas metas. Esta falta total es expresada como una suma de desviaciones de esas funciones objetivo desde sus metas respectivas. Existen tres metas posibles. Una es *la más baja* (lower), *meta unilateral* que coloca un límite más bajo que no se quiere caer debajo de este, así una falta de determinada solo si la función objetivo correspondiente cae por debajo de la meta. Un segundo tipo es *una superior* (upper), *una meta unilateral* que coloca un límite superior que no se quiere exceder (aunque caer debajo del límite es bueno), así es determinada una falta solo si la función objetivo correspondiente excede la meta. El tercer tipo es una meta con *dos aspectos* que coloca un objetivo específico que no se desea faltar de cualquier modo, así la falta es determinada si la función objetivo correspondiente se desvía de la meta en cualquier dirección.

Los problemas de programación pueden ser categorizados de acuerdo al tipo convencional del modelo de optimización al que es ajustado excepto para tener metas de tipo multicriterio en vez de un objetivo simple. El caso más importante es la *programación meta lineal*, donde todas las funciones objetivo y funciones límites son funciones lineales. En

este caso, es posible reformular el modelo de programación de meta lineal en un modelo de programación lineal, así que el método simplex extremadamente eficiente puede ser utilizado para resolver el modelo. Una clave para esta reformulación es que la falta total a ser minimizada puede expresarse como una función lineal de nuevas variables que representan las desviaciones relevantes desde las metas respectivas.

Otra categorización es de acuerdo a como comparar las metas de acuerdo a su importancia. En un caso, llamada *programación meta no comparada*, todas las metas son de importancia comparable. En este caso, cuando se evalúa la falta total para perder metas, los pesos en las respectivas desviaciones son del mismo orden de magnitud. En otro caso, llamado *programación meta preferente*, existe una jerarquía de prioridad de niveles para las metas, así las metas de primer importancia reciben un atención de primer prioridad, las de segunda importancia reciben atención de segunda prioridad, y así sucesivamente (si existen mas de dos niveles de prioridad).

### B.4.1.3 Programación entera

Una de las asunciones claves de la programación lineal es que todas las variables de decisión son *variables continuas*, así que valores enteros o no enteros son permitidos para estas variables. Sin embargo, muchos problemas se presentan en la práctica donde algunas de todas las variables de decisión necesitan ser restringidas a valores enteros. La programación entera es diseñada para tratar con tales problemas.

La forma de un modelo de programación entera (lineal) es idéntica a la que se muestra en la sección B.4.1 para un modelo de programación lineal excepto que este tiene límites adicionales especificando que ciertas variables de decisión deben tener un valor entero. Si cada variable de decisión tiene tal limite, el modelo es llamado modelo de programación lineal *puro*, este podría ser un modelo de programación entera mixta si solo algunas de sus variables de decisión tiene este limite.

#### B.4.1.3.1 El papel de los modelos de la programación entera binaria

Ha habido numerosas aplicaciones de la programación entera que envuelven una extensión directa de la programación lineal donde la asunción de variables de decisión continua debe ser desechada. Sin embargo, otra área de la aplicación podría ser de igual gran importancia, llamada, problemas que envuelven “decisiones de si o no”. En tales decisiones, las dos posibles elecciones son *si* y *no*. Por ejemplo, ¿se debe emprender un proyecto en particular? ¿Se debe realizar una inversión en particular?

Con dos elecciones, se pueden representar tales decisiones por variables por variables de decisión que son restringidas a solo dos valores, 0 y 1. Así, la decisión  $j$ -ésima si o no debe ser representada por,  $x_j$  tal que

$$x_j = \begin{cases} 1, & \text{Si la decisión } j \text{ es si} \\ 0, & \text{Si la decisión } j \text{ es no} \end{cases}$$



Tales variables son llamadas *variables binarias*. Consecuentemente, los modelos de programación lineal donde todas las variables enteras restringidas son además restringidas para ser variables binarias comúnmente son referidos como *modelos de programación entera binaria* (modelos BIP). Un modelo BIP es *puro* si todas las variables son variables binarias, se considera un modelo BIP *mixto* si solo algunas de las variables son variables binarias y el resto son variables continuas.

Los modelos BIP (puros o mixtos) están entre los modelos de optimización más utilizados. A continuación se enlistan algunos ejemplos de importantes tipos de modelos BIP, donde las decisiones *si* o *no* son representadas por variables binarias para cada ejemplo son identificados en paréntesis.

- Presupuesto de capital con oferta fija de inversión (para cada oferta de inversión, ¿debe ser tomada?)
- Selección de sitio (para cada posible localización de los sitios para nuevas instalaciones, ¿debe ser seleccionada?)
- Diseño y distribución de redes (para cada combinación de un centro de distribución y una área de mercado, ¿ese centro de distribución debe ser asignado para servir esa área de mercado?)
- Calendarización de actividades interrelacionadas (para cada combinación de una actividad y un periodo de tiempo, ¿debe comenzar esa actividad en ese periodo de tiempo?)

Tales aplicaciones de modelos BIP frecuentemente han proporcionado muchos ahorros para las compañías involucradas. Por ejemplo, ahorros anuales de cientos de millones de dólares han sido logrados en la industria de aerolíneas aplicando modelos BIP para problemas de calendarización de vuelos y equipos.

#### **B.4.1.3.2 Resolviendo modelos de programación entera**

El tradicional acercamiento que ha sido utilizado para resolver los modelos de programación entera con variables enteras o binarias es aplicar un algoritmo que es basado en la *técnica rama-limite*. El concepto básico de esta técnica es *dividir y conquistar*. Desde que el problema original es largo es muy difícil resolverlo directamente, esto es dividido en pequeños y más pequeños subproblemas hasta que estos subproblemas pueden ser conquistados. La división (*ramificación*) es realizada particionando el grupo entero de soluciones factibles en pequeños y más pequeños subgrupos. La conquista (*penetración*) es realizada de manera parcial por la *limitación* de que tan buena es la mejor solución en el subgrupo y entonces descartar el subgrupo si su límite indica que este posiblemente no puede contener una solución óptima para el problema original. Esta limitación es comúnmente realizada utilizando el método simplex o método dual simplex para resolver los subproblemas actuales de *relajación LP* (el modelo de programación lineal obtenido suprimiendo los límites enteros desde el subproblema).

La eficiencia computacional de los algoritmos de rama-limite para programación entera es absolutamente limitada, y esto no es comparable a la eficiencia del método simple para la programación lineal. Tales algoritmos frecuentemente fallan para resolver modelos de programación entera con más que cientos enteros o variables binarias.

Debido a que muchos modelos de programación entera presentan en la práctica son muy grandes para resolver por el algoritmo rama-limite, investigaciones en años recientes se han enfocado en desarrollar más eficientemente a los *algoritmos rama-corte*. Este tipo de algoritmo combina técnicas de rama-limite con otros dos tipos de técnicas: *pre-procesamiento automático del problema* y la *generación de cortes planos*. El pre-procesamiento automático del problema envuelve una inspección de cómputo de la formulación suministrado por el usuario del modelo de programación entera para las reformulaciones que hacen al modelo más rápido para resolver sin eliminar cualquiera de las soluciones factibles. Esto implica identificar variables que pueden fijarse en un o de sus posibles valores, identificando y eliminando límites redundantes, y aligerando algunas constantes sin eliminar cualquier solución factible. Generando cortes planos implica introducir nuevo límites funcionales que reducen la región factible para la relajación LP sin eliminar cualquier solución factible para el modelo de programación entera. Esto es de gran ayuda en proveer límites más apretados cuando resuelve la relajación LP del problema original o cualquiera de sus subproblemas.

Los nuevos algoritmos rama-corte han proporcionado un dramático mejoramiento en la eficiencia computacional para resolver los modelos de programación entera. Por ejemplo, algunas veces resuelven exitosamente problemas BIP con cientos de variables binarias.

Una cantidad significativa de investigación esta siendo conducida a desarrollar algoritmos para la *programación entera no lineal*. Sin embargo, este es un problema muy difícil y el progreso hasta la fecha ha sido absolutamente limitado. Tales algoritmos todavía no han sido adoptados para usarse ampliamente en la práctica.

#### **B.4.1.4 Programación no lineal.**

Para la mayoría de los modelos en las secciones anteriores, se asume que todas sus funciones (función objetivo y funciones limite) son lineales. Sin embargo, existen muchos problemas prácticos el los cuales estas asunciones no se iguales. Por ejemplo, cuando hay economías de escala, la función de producción es no lineal. En problemas de transportación, si existe volumen discontinuo en costos de envío, entonces el costo de envío es no lineal con respecto al volumen enviado. En la lista de problemas de selección, la correlación entre el funcionamiento de varias seguridades causa el riesgo que la función sea no lineal. Para muchos problemas las no linealidades son suficientemente pequeñas que es razonable aproximarlos con funciones lineales. Sin embargo, cuando las no linealidades no son pequeñas, frecuentemente se deben tratar directamente con modelos de programación no lineal.

Una forma general para el problema de programación no lineal es encontrar  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  para

$$\begin{aligned} &\text{Maximizar } f(x) \\ &\text{Sujeto a} \\ &\quad g(x) \leq b_i \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \tag{B.7}$$

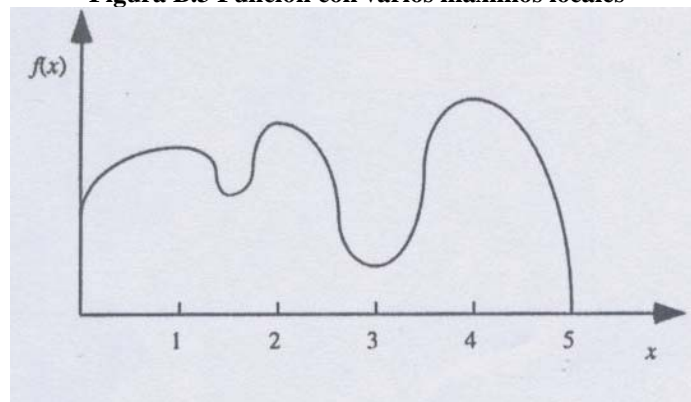
y

$$x \geq 0$$

Son posibles otras formas (minimización o  $\geq$  límites), pero pueden ser convertidos a (B.7). Existen varias complicaciones que se presentan en la programación no lineal que no se presentan en la programación lineal. Primero, desiguales modelos de programación lineal, la solución óptima no esta necesariamente en los limites de ka región factible. Además, un algoritmo general para resolver modelos de programación no lineal necesita considerar a todas las soluciones en la región factible, no sola a las que están en el límite.

Una segunda complicación de la programación no lineal es que un máximo local (o mínimo) no necesita ser una meta máxima (o mínima). Considerar, por ejemplo, la función de variable simple  $f(x)$  trazada en la Figura 1.1 esta función tiene tres máximos locales (en  $x = 1$ ,  $x = 2$ , y  $x = 4$ ), pero solo uno ( $x = 4$ ) es el máximo global.

**Figura B.3 Función con varios máximos locales**

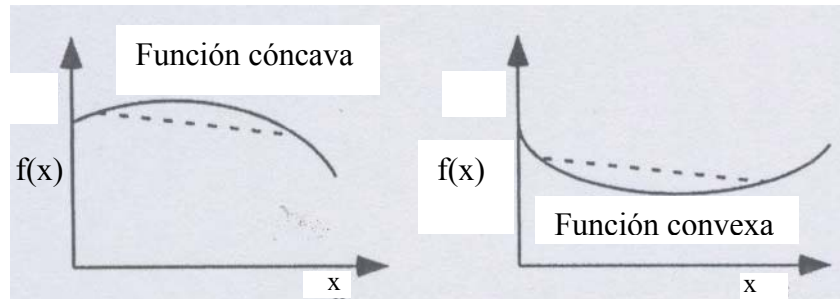


La mayoría de los algoritmos de programación no lineal busca localmente para mejorar a las soluciones y por lo tanto puede quedar atrapado en un máximo local, sin ninguna manera de garantizar que es el máximo global. Sin embargo, bajo algunas condiciones, un máximo local es garantizado ser un máximo global.

En un modelo que no tiene limites, la función objetivo que es *cóncava* garantiza que un local máximo es un máximo global. Similarmente, la función objetivo que es *convexa* garantiza que un mínimo local es un mínimo global. Una función cóncava es una función que siempre es una curva hacia abajo (o no totalmente curva). Una función convexa es curva siempre hacia arriba (o no totalmente curva). De manera más específica,  $f(x)$  es una *función convexa* si para cada par de puntos en la gráfica de la función, el segmento de línea

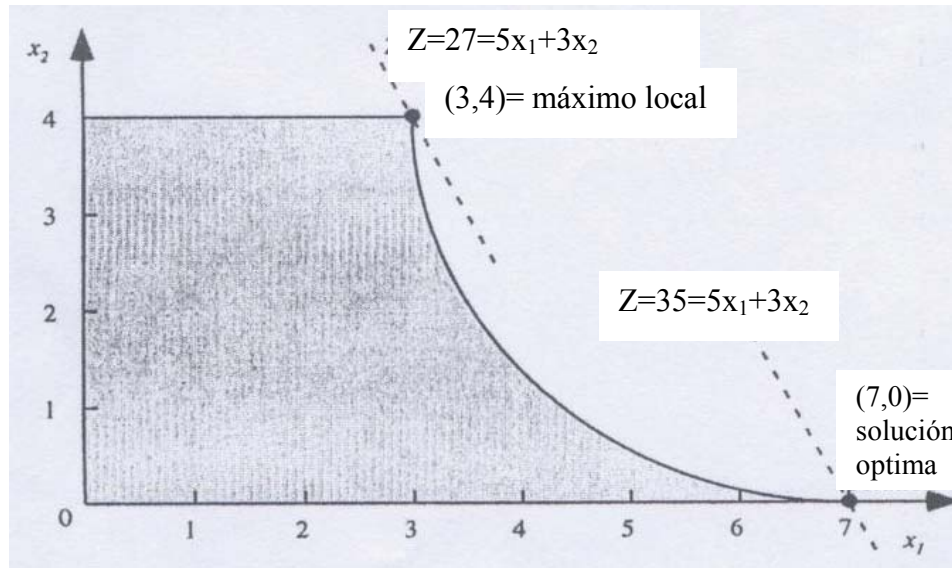
junta los dos puntos en o sobre la gráfica. Ejemplos de ambas funciones se muestran en la Figura B.4. Una función lineal es cóncava y convexa. La función mostrada en la Figura B.3 no es ni cóncava y ni convexa.

**Figura B.4 Una función cóncava y una función convexa**



Sin embargo, si existen limites, entonces incluso un modelo con una función objetivo cóncava puede tener un máximo local que no es un máximo global (o una función objetivo puede tener un mínimo local que no es un mínimo global). Considerar a un problema con dos variables donde la función objetivo es maximizar  $5x_1 + 3x_2$ , con la región factible mostrada en la Figura A.6. Este problema tiene un máximo local en (3,4) y (7,0), pero solo (7,0) es un máximo global.

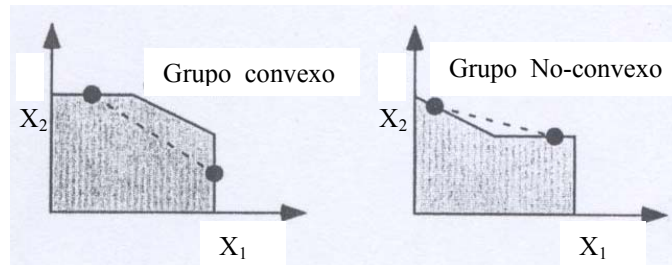
**Figura B.5 Región factible no convexa con óptimo local múltiple**



Para un problema de optimización limitado, es más necesario garantizar que un máximo local es un máximo global. En particular, la región factible debe ser un *grupo convexo*. Un grupo convexo es un grupo de puntos tales que el segmento de línea conecta cualquier par de puntos en el grupo entero dentro del grupo. Ejemplos, de grupos convexos y no convexos se muestran en la B.6 Si  $f(x)$  es cóncavo y la región factible forma un grupo convexo, entonces cualquier máximo local debe ser también un máximo global.

Si todas las funciones  $g_i(x)$  [para los límites  $g_i(x) \leq b_i$ ] son funciones convexas, entonces la región factible resultante será un grupo convexo. Así, un modelo linealmente limitado tendrá una región convexa factible. Sin embargo, la región factible en la Figura B.6 es claramente convexa.

**Figura B.6 Grupo convexo y no convexo**



#### B.4.1.4.1 Tipos de modelos de programación no lineal.

Los problemas de programación no lineal son de muchas diferentes maneras y formas. Un algoritmo simple no puede resolver todos estos diferentes tipos de problemas. Además, los problemas de programación no lineal son clasificados de acuerdo a las propiedades de la función objetivo y los límites.

Un modelo de *programación no lineal libre* no tiene límites. Así, la meta es simplemente maximizar  $f(x)$  sobre todos los valores de las variables de decisión  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

Los *modelos de programación no lineales limitados* linealmente tiene límites lineales, pero la función objetivo es no lineal. Un número algoritmos especiales han sido desarrollados para estos casos, incluyendo un poco el método extendido simplex para considerar la función objetivo no lineal.

Un importante tipo especial de un modelo no lineal limitado linealmente es un *modelo de programación cuadrática*. Los modelos de programación cuadrática tienen límites lineales, pero son caracterizados por una función objetivo que es cuadrática. Esto es, el cuadrado de una simple variables de decisión, o un producto de dos variables de decisión (es decir  $5x_1$ ,  $2x_1^2$ , o  $3x_1x_2$ ). Muchos algoritmos han sido desarrollados para la programación cuadrática con la adicional asunción que la función objetivo es cóncava. Una aproximación aplicable en este caso es usar una extensión directa del método simplex para encontrar el máximo global.

La *programación convexa* cubre una clase amplia de problemas los cuales incluyen las asunciones que la función objetivo  $f(x)$  es cóncava y todas las funciones  $g_i(x)$  [para los límites  $g_i(x) \leq b_i$ ] son funciones convexas, así que la región factible es un grupo convexo. Estas asunciones son suficientes para asegurar que cualquier máximo local es un máximo global.

La *programación no convexa* incluye a todos los modelos de programación no lineal que no satisface la asunción de la programación convexa. Para estos modelos, incluso si es encontrado un máximo local, nada garantiza que esto será un máximo global. Excepto para pocos casos especiales, no hay algoritmo que garantice encontrar una solución óptima para tales problemas. Una aproximación común para estos problemas es aplicar un algoritmo para encontrar un máximo local, y entonces reiniciar un número de veces desde una variedad de soluciones de ensayo inicial para encontrar un máximo local lo más distinto posible. El paso final es elegir al mejor máximo local.

## B.5 Simulación

Anteriormente se había enfocado en decisiones realizadas cuando las consecuencias de las decisiones alternativas son conocidas con un grado razonable de certidumbre. Este ambiente permitido de toma de decisiones formula modelos de ayuda con funciones objetivo que especifican la consecuencias estimadas de cualquier combinación de decisiones. Aunque estas consecuencias usualmente no se pueden predecir con completa certeza, podrían como mínimo ser estimadas con suficiente exactitud para justificar el utilizar dichos modelos (junto con análisis de sensibilidad, etc.)

Sin embargo, las decisiones frecuentemente deben hacerse en ambientes que son mucho más cargados con incertidumbre. Además, las decisiones pueden necesitar tomar en cuenta la incertidumbre de muchos eventos futuros. Este es el caso cuando hacer decisiones acerca de cómo diseñar y operar sistemas estocásticos (sistemas que se desarrollan con respecto al tiempo de manera probabilística) para optimizar sus funcionamientos.

La simulación es una técnica ampliamente utilizada para analizar sistemas estocásticos en preparación para hacer estos tipos de decisiones. Esta técnica implica utilizar una computadora para *imitar* (simular) la operación de un proceso entero o un sistema. Por ejemplo, la simulación es frecuentemente usada para presentar un análisis de riesgo en procesos financieros para repetidamente imitar la evolución de las transacciones implicadas para generar un perfil de las posibles respuestas. La simulación también es ampliamente utilizada para analizar sistemas estocásticos que continuarán operando indefinidamente. Para tales sistemas, la computadora genera aleatoriamente y graba las ocurrencias de los eventos que conduce el sistema justo como sería su operación física. Debido a su velocidad, la computadora puede simular incluso años de operación en materia de segundos. Grabando el funcionamiento de la operación simulada del sistema para un número de diseños alternativos o procedimientos de operación capaces de evaluar y comparar estas alternativas antes de elegir una.

La técnica de simulación ha sido una importante herramienta del diseñador. Por ejemplo, la simulación del vuelo de un avión en un túnel con viento es una práctica estándar cuando es diseñado un aeroplano. Teóricamente las leyes de la física pueden ser utilizadas para obtener la misma información acerca de cómo el funcionamiento de los cambios del aeroplano como los parámetros de diseño son alterados. Sin embargo, como materia práctica, el análisis podría ser muy complicado para realizar todo esto. Otra alternativa

podría ser construir aeroplanos reales con diseños alternativos y probarlos en un vuelo real para elegir el diseño final, pero esto podría ser más que costoso (como inseguro). Por lo tanto, después es presentado para desarrollar un diseño áspero un algún análisis teórico preliminar, simular el vuelo en un túnel de viento es una herramienta vital para experimentar con diseños específicos. Estas cantidades de simulación para imitar el funcionamiento de aeroplanos reales en un ambiente controlado para *estimar* cual será su funcionamiento real. Después de que es desarrollado un diseño detallado de esta manera, se puede construir un modelo prototipo y probarlo en un vuelo real para el diseño final.

La simulación juega esencialmente este mismo papel en muchos estudios OR/MS. Sin embargo, más que diseñar un aeroplano, el equipo OR/MS se trata de desarrollar un diseño o procedimientos de operación para algún sistema estocástico. Mas que usar un túnel de viento, el funcionamiento del sistema real es imitado utilizando distribuciones de probabilidad para generar aleatoriamente varios eventos que ocurren en el sistema. Por lo tanto, un modelo de simulación sintetiza el sistema construyendo componente por componente y evento por evento. Entonces el modelo corre el sistema simulado para obtener observaciones estadísticas del funcionamiento del sistema que resulta de varios eventos generados aleatoriamente. Debido a que el funcionamiento de la simulación típicamente requiere generar y procesar una vasta cantidad de datos, estos experimentos estadísticos simulados son inevitablemente presentados en una computadora.

Cuando la simulación es utilizada como parte de un estudio OR/MS, comúnmente es precedido y seguido por los mismos pasos descritos anteriormente para el diseño del aeroplano. En particular, primero es realizado algún análisis preliminar (tal vez con modelos matemáticos aproximados) para desarrollar un diseño áspero del sistema (incluyendo sus procedimientos de operación). Entonces la simulación es utilizada para experimentar con diseños específicos para estimar que tan bueno es cada funcionamiento. Después de esta manera es desarrollado y seleccionado un diseño detallado, el sistema probablemente es probado en uso real para el diseño final.

Para preparar la simulación para un sistema complejo, *el modelo de simulación* detallado necesita ser formulado para describir la operación del sistema y como es simulado. Un modelo de simulación tiene varios bloques constructores básicos:

- Una definición del *estado del sistema*
- Una lista de los *posibles estados* del sistema que pueden ocurrir
- Una lista de los *posibles eventos* que podrían cambiar el estados del sistema
- Una disposición para un *reloj de simulación*, localizado en algunas direcciones en el programa de simulación, que grabará el paso del tiempo (simulado)
- Un método para generar aleatoriamente los eventos de varios tipos.
- Una formula para identificar el estado de transiciones que son generados por los varios tipos de eventos

Esta hecho un gran proceso en desarrollar software especial para integrar eficientemente el modelo de simulación en una programa de computadora. Este software incluye lenguajes generales de simulación propuestos, aplicaciones de simuladores orientados para simular



---

tipos específicos de sistemas, y software de animación para exhibir simulaciones de computadora en acción, como software para presentar simulaciones en hojas de balance.

Dos amplias categorías de simulaciones son simulaciones de eventos discretos y continuos. *Una simulación de eventos discretos* es uno en donde los cambios en el estado del sistema ocurren instantáneamente en puntos aleatorios en el tiempo como resultado de la ocurrencia de eventos discretos. *Una simulación continua* es una donde los cambios en el estado del sistema ocurren continuamente respecto al tiempo.

Ahora la simulación es una de las técnicas OR/MS mas ampliamente utilizada, y esta continuamente crece en popularidad debida de su gran versatilidad. Se enlista a continuación algunos ejemplos de importantes tipos de aplicaciones de simulación.

- Diseño y operación de sistemas en cola
- Manejo de sistemas de inventario
- Estimar la probabilidad de terminación de un proyecto por un plazo
- Diseño y operación de sistemas de manufactura
- Diseño y operación de sistemas de distribución
- Análisis de riesgo financiero
- Aplicaciones de cuidado de la salud
- Aplicaciones a otros servicios industriales

La simulación es una herramienta poderosa para analizar sistemas estocásticos tales como estos proporcionando estimaciones de cómo el sistema podría funcionar con varios diseños alternativos y procedimientos de operación. Sin embargo, la simulación no determina por si misma como optimizar el funcionamiento del sistema. Una técnica suplementaria es necesaria para utilizar estimaciones proporcionadas por la simulación para buscar valores óptimos (o por lo menos valores óptimos aproximados) de las variables de decisión involucrando el diseño y procedimientos de operación para el sistema. Algoritmos de optimización evolutivos (y otras metaheurísticas) tienen fuerza potencial para ser utilizados en conjunción con la simulación de esta manera.



# APÉNDICE C

## ALGORITMOS EVOLUTIVOS: ALGORITMOS GENÉTICOS.

### C.1 INTRODUCCIÓN.

En este apéndice se describe la técnica llamada algoritmos genéticos que forma parte de la familia de los algoritmos evolutivos, en este apéndice se verán los principales paradigmas de la computación evolutiva pero enfocándose en los algoritmos genéticos que son los que se utilizaron en la realización de este trabajo. También se podrá observar algunas breves comparaciones entre las diferentes estrategias evolutivas, las diferencias de los AG's con respecto a los métodos convencionales, así como sus ventajas. Para finalizar se describirá un algoritmo genético y se realizará un ejemplo de optimización utilizando los AG's [88-91]

#### C.1.1 PRINCIPALES PARADIGMAS DE LOS ALGORITMOS EVOLUTIVOS

El término *computación evolutiva* o *algoritmos evolutivos*, realmente engloba una serie de técnicas inspiradas biológicamente (en los principios de la teoría Neo-Darwiniana de la evolución natural). En términos generales, para simular el proceso evolutivo en una computadora se requiere[92-94]:

- Codificar las estructuras que se replicarán.
- Operaciones que afecten a los “individuos”.
- Una función de aptitud.
- Un mecanismo de selección.

Aunque hoy en día es cada vez más difícil distinguir las diferencias entre los distintos tipos de algoritmos evolutivos existentes, por razones sobre todo históricas, suele hablarse de tres paradigmas principales:

- Programación Evolutiva
- Estrategias Evolutivas
- Algoritmos Genéticos

Cada uno de estos paradigmas se originó de manera independiente y con motivaciones muy distintas. Aunque este trabajo se concentrará principalmente en el tercero (los algoritmos genéticos).

Algunas aplicaciones de la programación evolutiva son:



- Predicción
- Generalización
- Juegos
- Control automático
- Problema del viajero
- Planeación de rutas
- Diseño y entrenamiento de redes neuronales
- Reconocimiento de patrones

Algunas aplicaciones de las estrategias evolutivas son:

- Problemas de ruteo y redes
- Bioquímica
- Óptica
- Diseño en ingeniería
- Magnetismo

### **C.1.2. Estrategias evolutivas Vs. Programación Evolutiva**

La Programación Evolutiva usa normalmente selección estocástica, mientras que las estrategias evolutivas usan selección determinística.

Ambas técnicas operan a nivel fenotípico (es decir, no requieren codificación de las variables del problema).

La programación evolutiva es una abstracción de la evolución al nivel de las especies, por lo que no se requiere el uso de un operador de recombinación (diferentes especies no se pueden cruzar entre sí). En contraste, las estrategias evolutivas son una abstracción de la evolución al nivel de un individuo, por lo que la recombinación es posible[95,96].

## **C.2 ALGORITMOS GENÉTICOS**

Los algoritmos genéticos (denominados originalmente “planes reproductivos genéticos”, pero se hizo popular bajo el nombre “algoritmos genéticos”) fueron desarrollados por John H. Holland a principios de los 1960s, motivado por resolver problemas de aprendizaje de máquina.

Los algoritmos genéticos son algoritmos de búsqueda basados en mecanismos de selección natural y naturaleza genética. Toman la analogía del mundo físico; operan creando una población inicial de

soluciones mediante combinaciones de sobrevivencia de estructuras representadas por cadenas de bits que se desenvuelven a través de generaciones. En cada generación, un nuevo conjunto de cadenas se crea con piezas de cadenas de generaciones anteriores. Las soluciones con aptitudes altas se aparean con otras soluciones por cruzamiento de partes de una cadena solución con otra. Las cadenas solución se mutan. A través del tiempo, las operaciones básicas de cruzamiento, mutación y reproducción limpian desechando las soluciones con aptitudes pobres y se van reproduciendo las soluciones con aptitudes altas. Los algoritmos genéticos no son un simple paseo aleatorio. Aprovechan eficientemente la información histórica para especular una nueva búsqueda de puntos con un desarrollo de mejoramiento esperado. Los esquemas de reproducción artificial se desarrollaron por primera vez en los años 70's y llegan a ser más populares en los 80's. La investigación tiene dos objetivos: (1) resumir y alcanzar rigurosamente los procesos adaptándose a sistemas naturales. (2) diseñar software de sistemas artificiales que guarden los mecanismos importantes de sistemas naturales.

El tema central de la investigación en algoritmos genéticos ha sido su robustez. Si un sistema artificial es más robusto, se reducen o eliminan rediseños costosos. Se alcanzan altos niveles de adaptabilidad, existiendo sistemas que desarrollan funciones más extensas y mejores. Las características de auto reparación, auto dirección y reproducción son las reglas para sistemas biológicos, considerando que estas características son escasas en sistemas artificiales.

Los algoritmos genéticos prueban teórica y empíricamente que proporcionan robustez en la búsqueda de espacios complejos. Son computacionalmente simples con una poderosa búsqueda de mejoramiento. Además no se limitan a suposiciones de restricción acerca del espacio de búsqueda (suposiciones acerca de continuidad, existencia de derivadas y otras materias).

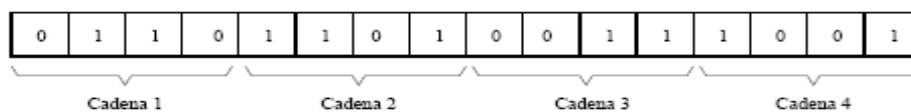
El algoritmo genético enfatiza la importancia de la cruce sexual (operador principal) sobre el de la mutación (operador secundario), y usa selección probabilística[97-99].

El algoritmo básico es el siguiente:

- Generar (aleatoriamente) una población inicial.
- Calcular aptitud de cada individuo.
- Seleccionar (probabilísticamente) en base a aptitud.
- Aplicar operadores genéticos (cruza y mutación) para generar la siguiente población.
- Ciclar hasta que cierta condición se satisfaga.

La representación tradicional es la binaria, tal y como se ejemplifica en la figura C.1

**Figura C.1 Ejemplo de la codificación (mediante cadenas binarias) usada tradicionalmente con los algoritmos genéticos.**





A la cadena binaria se le llama “cromosoma”. A cada posición de la cadena se le denomina “gene” y al valor dentro de esta posición se le llama “alelo”.

Para poder aplicar el algoritmo genético se requiere de los 5 componentes básicos siguientes:

- Una representación de las soluciones potenciales del problema.
- Una forma de crear una población inicial de posibles soluciones (normalmente un proceso aleatorio).
- Una función de evaluación que juegue el papel del ambiente, clasificando las soluciones en términos de su “aptitud”.
- Operadores genéticos que alteren la composición de los hijos que se producirán para las siguientes generaciones.
- Valores para los diferentes parámetros que utiliza el algoritmo genético (tamaño de la población, probabilidad de cruce, probabilidad de mutación, número máximo de generaciones, etc.)

### C. 2.1 Algoritmos Genéticos Vs. otras Estrategias Evolutivas

El AG usa selección probabilística al igual que la Programación Evolutiva, y en contraposición a la selección determinística de las Estrategias Evolutivas.

El AG usa representación binaria para codificar las soluciones a un problema, por lo cual se evoluciona el genotipo y no el fenotipo como en la Programación Evolutiva o las Estrategias Evolutivas.

El operador principal en el AG es la cruce, y la mutación es un operador secundario. En la Programación Evolutiva, no hay cruce y en las Estrategias Evolutivas es un operador secundario.

Ha sido demostrado que el AG requiere de elitismo (o sea, retener intacto al mejor individuo de cada generación) para poder converger al óptimo.

Los AGs no son, normalmente, auto-adaptativos, aunque el uso de dicho mecanismo es posible, y ha sido explorado extensivamente en la literatura especializada.

Algunas aplicaciones de los AGs son las siguientes:

- Optimización (estructural, de topologías, numérica, combinatoria, etc.)
- Aprendizaje de máquina (sistemas clasificadores)
- Bases de datos (optimización de consultas)
- Reconocimiento de patrones (por ejemplo, imágenes)
- Generación de gramáticas (regulares, libres de contexto, etc.)
- Planeación de movimientos de robots



- Predicción

### **C.3 DIFERENCIA DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS CON LOS MÉTODOS CONVENCIONALES**

La principal diferencia de los algoritmos genéticos (AGs) con los métodos convencionales es la robustez, aunque difieren de otras maneras. Las cuatro maneras más importantes que los AGs difieren de la optimización normal y los procedimientos de búsqueda son:

1. Los AGs trabajan con una codificación de los conjuntos de los parámetros, no los parámetros por si mismos.
2. Los AGs buscan una población de puntos, no un punto simple.
3. Los AGs buscan información que es de provecho (función objetivo), no aquella que proviene de información auxiliar.
4. Los AGs usan reglas de transición probabilística, no reglas deterministas.

Muchas técnicas de búsqueda requieren mucha información auxiliar para trabajar. Por ejemplo, las técnicas de gradiente necesitan derivadas (calculadas analíticamente o numéricamente) para habilitar la subida de un pico que se presente. En contraste, los AGs no necesitan información auxiliar: Los AGs son ciegos. Para desarrollar una búsqueda efectiva, requieren solamente valores de la función objetivo asociados con cadenas individuales. Estas características hacen que los AGs establezcan un método de búsqueda de muchos esquemas.

Juntando las cuatro diferencias - Uso directo de un código, búsqueda de una población, ceguera para la información auxiliar, y operadores aleatorios - contribuyen a que los AGs sean robustos y resulten ventajosos sobre otras técnicas usadas comúnmente. En la siguiente sección se explica un algoritmo simple que consta de tres operadores básicos.

### **C.4 VENTAJAS DE LAS TÉCNICAS EVOLUTIVAS**

Es importante destacar las diversas ventajas que presenta el uso de técnicas evolutivas para resolver problemas de búsqueda y optimización:

- Simplicidad Conceptual.
- Amplia aplicabilidad.
- Superiores a las técnicas tradicionales en muchos problemas del mundo real.
- Tienen el potencial para incorporar conocimiento sobre el dominio y para hibridizarse con otras técnicas de búsqueda/optimización.
- Pueden explotar fácilmente las arquitecturas en paralelo.
- Son robustas a los cambios dinámicos.
- Generalmente pueden auto-adaptar sus parámetros.



- Capaces de resolver problemas para los cuales no se conoce solución alguna.

### C.5 ALGORITMO GENÉTICO SIMPLE

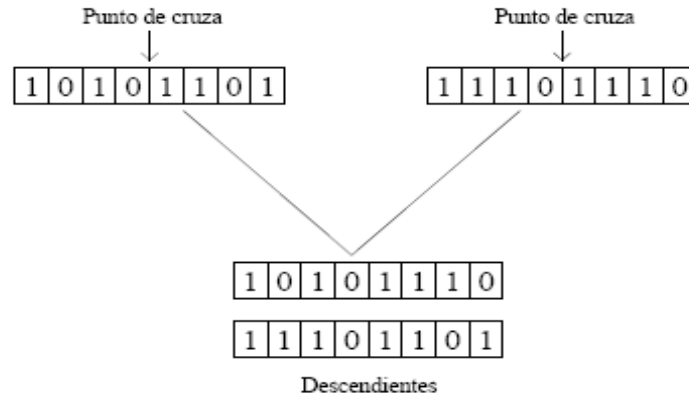
Un AG simple esta compuesto de tres operadores:

1. Reproducción
2. Cruzamiento
3. Mutación

La *reproducción* es un proceso donde se copian cadenas individuales acorde a los valores de la función objetivo. Para copiar las cadenas se hace de acuerdo a sus valores ajustabilidad donde las cadenas con valores altos tienen una probabilidad alta de contribuir en una o más descendencias en la siguiente generación. Una vez que una cadena se selecciona para reproducirse, se hace una replica exacta de la cadena.

Después de la *reproducción*, el *cruzamiento* (figura C.2) se lleva a cabo mediante dos pasos. Primeramente, las cadenas son apareadas encogiéndolas aleatoriamente. Segundo, cada par de cadenas se cruzan como sigue: una posición  $k$  a lo largo de la cadena se escoge aleatoriamente en forma uniforme entre 1 y la longitud de la cadena menos uno (1,  $l-1$ ). Dos cadenas nuevas se crean por un cambio de todos los caracteres entre la posición  $k + 1$  y  $l$ .

**Figura C.2 Esquema para mostrar el cruzamiento entre dos cadenas, mostrando el sitio de cruce escogido aleatoriamente.**



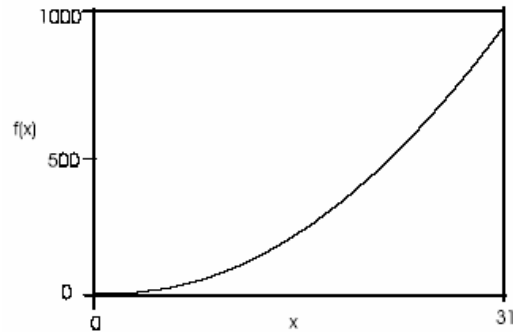
La *mutación* juega un papel secundario en la operación de los AGs. La mutación es necesaria, al igual que la reproducción y el cruzamiento. La mutación sirve para evitar convergencias prematuras (una situación donde miembros de la población tienen cadenas similares de bits sin tender a un punto óptimo del espacio) previniendo incestos, esto es, no permitiendo que miembros similares de la población se apareen. En la siguiente sección se muestra un ejemplo sencillo para entender mejor los tres operadores básicos de los AGs.

### C.6 EJEMPLO DE UN ALGORITMO GENÉTICO

Como ejemplo, considerar el problema de optimización mostrado en la figura C.3 Se desea maximizar la función  $f(x) = x^2$  en el intervalo  $[0,31]$ . Con los métodos más tradicionales se trataría de jugar con el parámetro  $x$ , escogiéndolo de tal manera hasta obtener el valor más alto de la

función objetivo. Con AGs, el primer paso del proceso de optimización es codificar el parámetro  $x$  como una cadena de longitud finita.

**Figura C.3 Ejemplo de optimización de la función  $f(x)=x^2$  en el intervalo entero [0,31].**



Se comienza con una población de cadenas y consecutivamente generaciones sucesivas de poblaciones de cadenas. Por ejemplo en este problema se tienen cadenas de cinco bits. Donde la primera generación se forma por el lanzamiento de una moneda 20 veces (águila=1, sol=0), con tamaño de población  $n=4$ .

11001  
00110  
10010  
11000

una vez creada la población inicial, se procede a evaluar la ajustabilidad de cada cadena, esto se hace por ejemplo aplicando la base 10 de números, por ejemplo para la cadena 10010 es:

$$1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 16 + 2 = 18$$

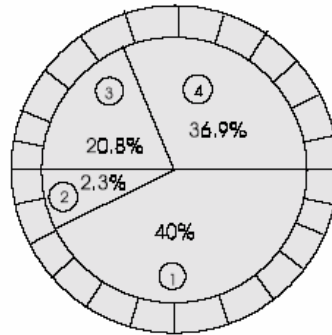
Para una cadena de cinco bits (código binario) se puede obtener números entre 0 (00000) y 31 (11111). Aplicando las operaciones básicas de AGs (reproducción, cruzamiento y mutación), la ajustabilidad de la cadena 01000 decodificada en manera binaria es  $2^3 = 8$ . De aquí que para la cadena 01000  $x = 8$ . Para calcular su ajustabilidad simplemente es el cuadrado del valor de  $x$  obteniendo una ajustabilidad de  $f(x) = 64$ . Otros  $x$  y  $f(x)$  se pueden obtener de manera similar.

**Tabla C.1 Cadenas para el ejemplo y sus valores de aptitud**

No.	Cadena	Ajustabilidad	% del total
1	11001	625	40.0
2	00110	36	2.3
3	10010	324	20.8
4	11000	576	36.9
Total		1561	100.0

Una generación de un algoritmo genético se inicia con la reproducción. La selección de la nueva generación se lleva a cabo escogiendo un sitio de acuerdo al peso mediante una rueda de ruleta (figura C.4) cuatro veces.

**Figura C.4** Asignación de reproducción mediante una rueda de ruleta con tamaños de aberturas de acuerdo a la aptitud de cada cadena. Datos tomados de las tablas C.1 y C.2.



Usando esta rueda de ruleta, la cadena 3 y 4 se reproducen en una copia, la cadena 1 se reproduce con dos copias, la cadena 2 no se reproduce. Como se muestra al centro de la tabla C.2.

**TABLA C.2** Algoritmo genético a mano

No. de Cadena	Población Inicial (Generada Aleatoriamente)	Valor de x	$f(x)=x^2$	$p_{select_i} = \frac{f_i}{\sum f}$	Copia Esperada $\frac{f_i}{f}$	Conteo Actual (de Rueda de Ruleta)
1	1 1 0 0 1	25	625	0.40	1.601	2
2	0 0 1 1 0	6	36	0.023	0.092	0
3	1 0 0 1 0	18	324	0.208	0.830	1
4	1 1 0 0 0	24	576	0.369	1.475	1
Suma			1561	1.00	4.00	4.0
Promedio			<u>390</u>	0.25	1.00	1.0
Máximo			<u>625</u>	0.40	1.601	

Grupo escogido después de la Reproducción (Se muestra el Sitio de Cruce)	Apareo (Seleccionado Aleatoriamente)	Sitio de Cruzamiento (Seleccionado Aleatoriamente)	Nueva población	Valor de x	$f(x)=x^2$
1 1   0 0 1	2	2	1 1 0 0 1	25	625
1 1   0 0 1	1	2	1 1 0 0 1	25	625
1 0 0   1 0	4	3	1 0 0 0 0	16	256
1 1 0   0 0	3	3	1 1 0 1 0	26	676
					2182
					<u>546</u>
					<u>676</u>

Notas:



- 1) La población inicial se forma de cuatro repeticiones de lanzar cinco veces una moneda (águila=1, sol=0)
- 2) La reproducción se desarrolla lanzando cuatro veces un dardo a la rueda de ruleta (aleatoriamente).
- 3) El cruzamiento es a través de una decodificación binaria de 2 lanzes de moneda (SS=00<sub>2</sub>=0=sitio de cruce 1, AA=11<sub>2</sub>=3= sitio de cruce 4).
- 4) Probabilidad de cruzamiento se supone que es la unidad  $p_c=1.0$ .
- 5) Probabilidad de mutación es 0.001,  $p_m=0.001$ , Mutaciones esperadas= $5*4*0.001=0.02$ . En este caso ninguna mutación se espera en cada generación.

Ahora por cruzamiento (apareo de cadenas) se tienen dos pasos: (1) las cadenas son apareadas aleatoriamente, escogiendo un par con más ajustabilidad y (2) las cadenas son apareadas cruzándose entre ellas, escogiendo aleatoriamente el sitio de cruzamiento. Refiriéndose nuevamente a la tabla 4.2, la selección aleatoria de cadenas, resulta que la primera es escogida para aparearse con la segunda. Con un cruzamiento el sitio 2, las dos cadenas 11001 y 11001 se cruzan y crean las nuevas cadenas 11001 y 11001.

La mutación se hace bit por bit, donde se supone que la probabilidad de mutación =0.001. Con 20 transferencias de posiciones de bit se espera  $20*0.001=0.02$  bits, donde esto indica que ningún bit será cambiado.

Siguiendo las operaciones de reproducción, cruzamiento y mutación, las nuevas poblaciones se prueban. Como se puede observar el valor máximo de ajustabilidad es incrementado de 625 a 676 de la generación 0 a la 1 (tablas C.1 y C.2). Donde se puede decir que el algoritmo genético presenta una convergencia al óptimo que es 961. La siguiente tabla se muestra las cadenas solución hasta la población no.3.

**TABLA C.3 Cadenas de solución hasta la generación 3**

Población no.2.	Valor de x	Valor de $x^2$
1 1 0 1 0	26	676
1 1 0 1 0	26	676
1 1 0 1 1	27	729
1 1 0 0 0	24	576
Población no.3.	Valor de x	Valor de $x^2$
1 1 0 0 0	24	576
1 1 0 1 1	27	729
1 1 0 0 0	24	576
1 1 0 1 1	27	729

Como se observa en la tabla anterior, el valor de 729 se duplica de la población 1 a la población 2, esto muestra que el algoritmo genético alcanza el óptimo. Las demás poblaciones no se muestran debido a que el valor de 729 permanece dominante, esto se debe a que la probabilidad de mutación es muy pequeña ( $p_m=0.001$ ), y no se producen mutaciones en cada población y por lo tanto se provocan incestos, y esto no permite que el algoritmo genético explore todo el espacio.

Ahora, si la probabilidad de mutación se aumenta de  $p_m=0.001$  a  $p_m=0.1$ , se tiene que el número de mutaciones esperadas es:  $5*4*0.1=2$ . En la siguiente tabla se muestran las mejores cadenas solución para cada población empleando una  $p_m=0.1$ .

**TABLA C.4 Mejores cadenas para una probabilidad de mutación  $p_m=0.1$**

No. de población	Cadena solución	Valor de x	Valor de $x^2$
1	1 1 0 0 0	24	576
2	1 1 0 0 1	25	625
3	1 1 0 0 1	25	625
4	1 1 0 0 1	27	729
5	1 1 0 0 1	25	625
6	1 1 0 0 1	25	625
7	1 1 0 0 1	25	625
8	1 1 0 0 1	25	625
9	1 1 1 1 1	31	961

Como se observa en la tabla anterior, de la población 5 a la 8 la cadena solución permanece sin cambio, y hasta la población 9 se alcanza el óptimo de 961, de aquí se concluye que la probabilidad de mutación es importante para prevenir incestos, provocando que el algoritmo genético explore todo el espacio.

La pregunta obvia es: ¿Como los algoritmos genéticos se desenvuelven de generación en generación?, esto se puede observar en las cadenas que presentan esquemas de la forma 11### son las que sobreviven de generación en generación, formando esquemas o similitudes de planillas.

Los AGs buscan espacios solución mediante recombinaciones y manteniendo *esquemas* de la población. Cada miembro de la población muestrea todos los posibles *esquemas* mediante sus bits correspondientes. Por ejemplo, la cadena de bits 1 0 0 1 0 muestrea la región de espacio, 1 #### (# representa 0 o 1). Así como también muestrea la región de espacio # 0 ###, etc. De ésta manera, esquemas en el espacio se muestrean implícitamente. Esta habilidad inherente de exploración de muestreo de los AGs es llamada: paralelismo implícito. Esto se refiere a que el muestreo de numerosos esquemas y un efectivo remuestreo de esquemas buenos, se mantienen a través de generaciones.



# APÉNDICE D

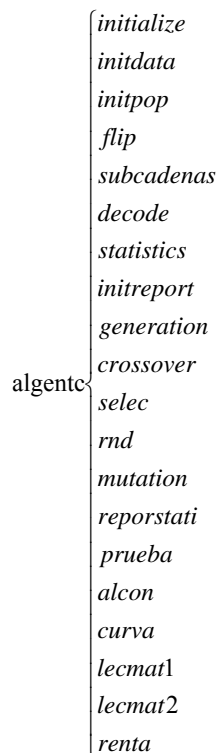
## DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA DIGITAL

### D.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se describe el programa digital y en la sección D.2 se explica como introducir los datos para ser ejecutado.

El programa digital cuenta con un programa principal llamado “algentc” donde se lleva a cabo la localización óptima de dispositivos de seccionamiento para la planeación de sistemas de distribución radial. El programa se compone de un programa principal y veinte subrutinas, como se muestra en la Figura D.1. En este programa se tienen las declaraciones de variables globales y vectores para facilitar su dimensionamiento. Dicho programa está escrito en lenguaje FORTRAN.

Figura D.1 Organigrama del programa digital “algentc”





---

---

## D.2 DESCRIPCIÓN DE LAS SUBRUTINAS

La subrutina “initialize” es la primera parte del algoritmo genético y consta de varias subrutinas que se describen a continuación.

La subrutina “initdata” es la que permite obtener de un archivo de lectura los datos para inicializar el algoritmo genético, como son el número máximo de generaciones, tamaño del cromosoma, etc.

La subrutina “initpop” genera a la población inicial del algoritmo, además de proporcionar un valor a cada individuo, dependiendo del valor de los alelos de este mediante la subrutina “decode”.

La subrutina “subcadenas” genera cadenas de valores lógicos (falso y verdadero) a subcadenas con valores 0, 1 y 2, que son las que representarán al sistema y serán las consideradas en la evaluación.

En la subrutina “prueba” se realiza el análisis de confiabilidad y rentabilidad, por medio de las subrutinas “ALCON”, “LECMAT1”, “LECMAT2”, “CURVA”, y “RENTA”, que a continuación se describen.

El programa “ALCON” se toma como una subrutina, la cual obtiene básicamente los cortes mínimos de primer orden para cada nodo de carga, evaluando la confiabilidad total del sistema, esta subrutina tiene la función de leer los datos del grafo modelador como se describe en [5]. Los detalles de este programa se describen en [52]. Cabe mencionar que las subrutinas son llamadas por el comando RUNQQ que sirve para citar el programa ejecutable (.EXE) de otro programa principal (por ejemplo la subrutina “RENTA”).

La subrutina “CURVA” evalúa los costos de la energía no suministrada en cada combinación mediante el uso de la curva de daño al consumidor que se describe en la sección 2.12.

La subrutina “LECMAT1” lee los parámetros (tasa de falla y tiempo de reparación) generados por la subrutina “ALCON” y posteriormente calcula la indisponibilidad para cada punto de carga, esto para la red que sea considerada como el sistema base.

La subrutina “LECMAT2” lee los parámetros (tasa de falla y tiempo de reparación) generados por la subrutina “ALCON” y posteriormente calcula la indisponibilidad para cada punto de carga, esto para las redes propuestas (es decir para todos los pobladores que serán comparados con el sistema base).

La subrutina “RENTA” obtiene los índices de confiabilidad (IAC, DIC, SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI, ENS, AENS) para después evaluar la rentabilidad de la red considerada como base y posteriormente evalúa la rentabilidad del resto de los pobladores, teniendo así una base de comparación para tomar una decisión de que red es la que ofrece



una mayor relación costo-beneficio (mayores beneficios con una menor inversión). Cabe mencionar que los índices de confiabilidad que se toman en cuenta para el estudio de la rentabilidad son el SAIFI y SAIDI, el resto de los índices son considerados solo como indicadores.

Para el estudio de la rentabilidad se utilizaron los métodos de evaluación económica VPN, RBC y la TIR.

La subrutina “statistics” realiza la estadística de los valores de las aptitudes de los individuos, encontrando su valor promedio, máximo y mínimo, además de realizar una selección de aptitudes positivas.

En las subrutinas “initreport” y “reporstati” se realiza el reporte de las generaciones, el cual se puede observar en el archivo de salida “dates.sal”.

En la subrutina “generation” se realiza el siguiente ciclo evolutivo, es decir se elige a la cadena que será considerada como base, siendo esta la más débil de la generación anterior, se seleccionan a los dos individuos más fuertes y se generan a los dos hijos utilizando las subrutinas “selec”, “crossover” y “mutation” que son las que simulan la selección, el cruzamiento y la mutación respectivamente, estos hijos son evaluados sobre la cadena que fue elegida como la base, obteniendo de esa manera los valores de las aptitudes de cada uno de los individuos generados, realizando este ciclo hasta completar la población. Una vez generado el número de pobladores establecidos se realiza la sustitución de la generación anterior por la nueva generada.

### **D.3 DATOS DE ENTRADA PARA EL PROGRAMA DIGITAL**

Los datos iniciales del algoritmo son los que se encuentran en el archivo “dates.dat”, el cual es un archivo de entrada que permite leer los datos principales que requiere el algoritmo genético:

Popsiz:= tamaño de la población

lchrom:= longitud del cromosoma

maxgen:= número de la máxima generación

pcross:= probabilidad de cruzamiento

pmutation:= probabilidad de mutación

Los datos de la subrutina “prueba” son tomados de los archivos “BER.DAT”, “bernoulli.sal”, “ICOST.DAT”, “ENTRADA.DAT”, y “RBC.SAL”.



En el archivo “BER.DAT” se leen los datos de la curva de daño al consumidor, así también los datos para la evaluación económica mediante los siguientes parámetros:

NSEC:= Número de dispositivos de seccionamiento en el grafo modelador (Localizaciones posibles).

SEC(i):= Almacena los dispositivos de seccionamiento de acuerdo al rotulo del grafo modelador, donde  $i=, NSEC$ .

NPUNTOS:= Número de puntos de la curva de daño al consumidor compuesta.

CURV(i):= Almacena el costo en dólares por el tiempo de interrupción a los clientes.

DOLLAR:= Es el tipo de cambio para hacer la conversión de dólares a pesos (para esta tesis la relación es de 12 pesos por cada dólar).

Costo\_dd:= Costo de cada cuchilla desconectadora

Costo\_res:= Costo de cada restaurador

Costo\_mano:= Costo de la instalación de la cuchilla desconectadora

Costo\_mano\_res:= Costo de la instalación del restaurador

BKW:= Costo por KW interrumpido

BKWH:= Costo por KWH

TI:= Tasa de interés

TE:= Años para realizar el estudio

NCTE:= Alimentador

KWSIS:= KW del sistema

NP:= Número de los puntos de carga en la red

USUARIOS(CD):= Número de usuarios conectados en cada punto de carga, donde  $CD=1, NP$ .

CARGA\_PROM(CD):= Carga promedio en cada punto de carga, donde  $CD=1, NP$ .



El archivo “bernoulli.sal” es generado por la subrutina “prueba”, en el cual se imprime el cromosoma que será considerado para la evaluación de la confiabilidad mediante la subrutina “ALCON”. Los parámetros del archivo bernoulli.sal son:

NSEC:= Número de localizaciones en donde se puede colocar un dispositivo de seccionamiento, obtenido por el proceso de optimización.

a(i,j):= almacena el vector binario (cromosoma) que indica la presencia o no presencia de un dispositivo de seccionamiento (0=no hay presencia de un dispositivo, 1=cuchilla, 2=restaurador) en las localizaciones posibles dentro del grafo modelador (red).

SEC(K):= Almacena el número correspondiente al nodo del grafo modelador donde existe posibilidad de asignación de dispositivos de seccionamiento, donde  $K=1, NSEC$ .

El archivo “ICOST.DAT” es generado por la subrutina “ALCON” y es llamado a la subrutina “prueba”. Básicamente son los resultados de la evaluación de confiabilidad para un caso particular en el proceso de optimización y es utilizada por las subrutinas “CURVA”, “LECMAT1”, y “LECMAT2”. Los parámetros de ICOST.DAT son los siguientes:

NP:= Lee el número de los nodos de carga (nodos pozo en el grafo modelador)

NODOS\_POSIB(IK):= Almacena los nodos de carga del grafo modelador, donde  $IK=1, NP$ .

CARGA\_NP(IK):= Almacena la carga en MW del nodo pozo, donde  $IK=1, NP$ .

NE:= Es el número total de nodos del grafo modelador.

INDE1(IK,JK):= Almacena la tasa de falla ( $\lambda$ ) de todos los nodos del grafo que pueden fallar, de tal manera que afectan a cada nodo pozo del grafo, donde  $IK=1, NP$  y  $JK=1, NE$ .

INDE2(IK,JK):= Almacena el tiempo de reparación ( $r$ ) de todos los nodos del grafo que pueden fallar, de tal manera que afectan a cada nodo pozo del grafo, donde  $IK=1, NP$  y  $JK=1, NE$ .

El archivo “ENTRADA.DAT” es un archivo de entrada que sirve para realizar el estudio de la rentabilidad mediante la subrutina “RENTA”, haciendo una comparación entre la rentabilidad de la red base con respecto a otra, sus parámetros son:

CCD:= Costo de la cuchilla desconectadora

CLMOI:= Costo de la mano de obra

CI:= Costo por KW interrumpido



CKWH:= Costo por el KWH

TI:= Tasa de interés

AN:= Número de años para el estudio

AL:= Alimentador

CS:= KW del sistema

N:= Número de los puntos de carga

UC:= Número de usuarios conectados en cada punto de carga

CP:= Carga promedio conectada en cada punto de carga

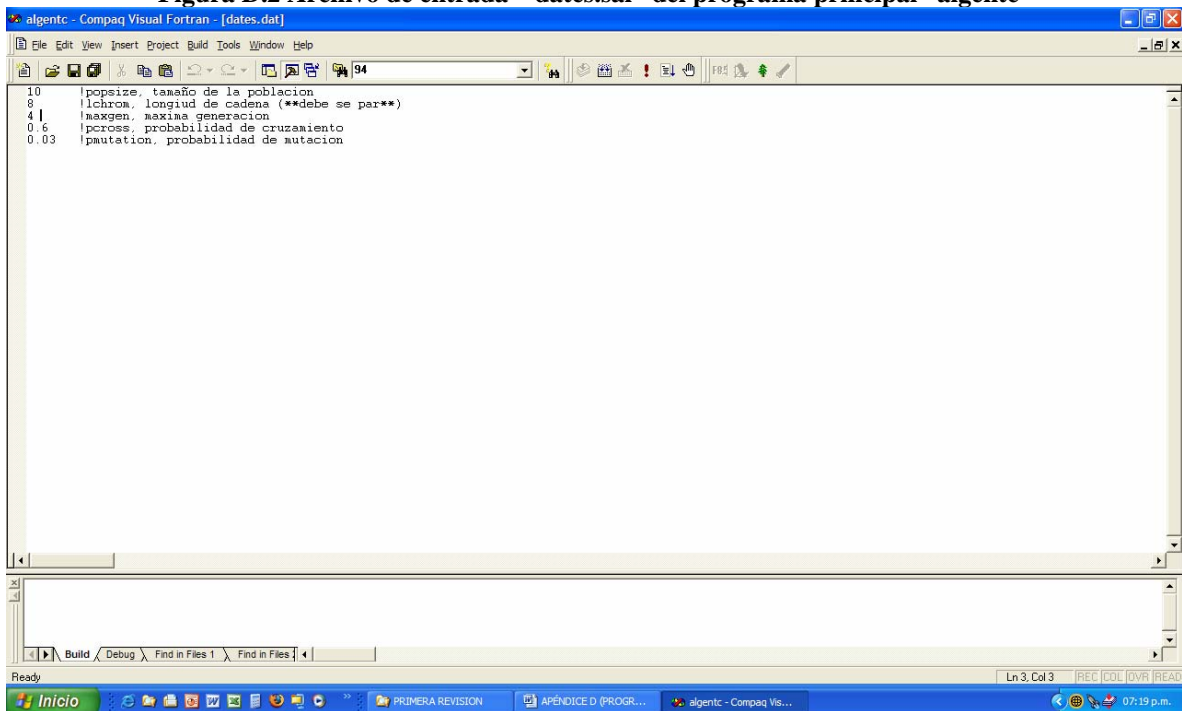
TF:= Valor de la tasa de falla para cada punto de carga

DIC:= Indisponibilidad en cada punto de carga

#### D.4 FORMATO DE LOS ARCHIVOS DE ENTRADA Y SALIDA

Para ejemplificar el formato de los archivos de entrada y de salida se toman los datos del ejemplo descrito en la sección 5.2.1. El archivo “dates.dat” es leído por el programa principal “algentc”, contiene la información necesaria para ejecutar el algoritmo genético. Este archivo se puede observar en la Figura D.2

**Figura D.2 Archivo de entrada “dates.sal” del programa principal “algentc”**







El archivo “DIS.DAT” es leído por la subrutina “ALCON”, básicamente contiene la información del grafo modelador y los parámetros de confiabilidad (tasa de falla, tiempo de reparación y/o tiempo de switcheo) de cada nodo del grafo. Este archivo se puede observar en la Tabla D.1.

A continuación se describe los detalles de la Tabla D.1:

- 1-Número de puntos de carga en el sistema.
- 2-Representación de los puntos de carga en el grafo modelador.
- 3-Carga conectada en los nodos pozo (MW).
- 4-El 22 indica el número total de nodos en el grafo y el 3 indica al grado máximo de conectividad en un nodo.
- 5-Representan la matriz de conectividad del grafo, en cada columna se almacenan todos los nodos conectados a un nodo.
- 6-Índica el número de nodos fuente.
- 7-Representación de los nodos fuente en el grafo.
- 8-Número de nodos de suministro alternativo.
- 9-Representación del suministro alternativo en el grafo modelador.
- 10-Índica el número de nodos ficticios.
- 11-Representación de los nodos ficticios en el grafo modelador.
- 12-Número de nodos de respaldo (interruptor general).
- 13-Índica el nodo de respaldo en el grafo modelador.
- 14-Número de nodos normalmente abiertos.
- 15-Representación del nodo normalmente abierto en el grafo modelador.
- 16-Número de nodos normalmente cerrados.
- 17-Representación de los nodos normalmente cerrados en el grafo modelador.



---

18-Datos de confiabilidad para los nodos del grafo modelador en orden ascendente (la primer columna indica la frecuencia de fallas pasivas, la segunda el tiempo promedio de reparación, la tercera la frecuencia de fallas activas, la cuarta el tiempo promedio de switcheo, la quinta la probabilidad de bloqueo, la sexta la frecuencia de mantenimiento y la séptima el tiempo promedio de mantenimiento). Los nodos (filas) 1, 4, 7, 10, 12,13 y 14 representan las líneas principales y laterales en el grafo modelador. Los nodos restantes (nodos ficticios) se consideran totalmente confiables, en consecuencia sus parámetros de confiabilidad son ceros.



Los datos del archivo DIS.DAT se dan en formato libre.

Los archivos DIS.SAL e ICOST.DAT son generados por la subrutina “ALCON”, en DIS.SAL arroja los resultados de la evaluación de confiabilidad para una posible localización de dispositivos de seccionamiento del proceso de optimización, y en ICOST.DAT arroja los parámetros (tasa de falla y tiempo promedio de reparación) para cada nodo de carga y para toda la red. Los detalles del archivo ICOST.DAT se pueden ver en la Tabla D.2.

**Tabla D.2 Archivo ICOST.DAT generado por la subrutina ALCON**

3	→ Número de nodos de carga en el sistema			
15	16	17	→ Representación de los puntos de carga en el grafo modelador	
10.00000	10.00000	10.00000	→ Carga conectada a cada punto de carga (KW)	
22	→ Número total de nodos en el grafo modelador			
0.2300000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.2000000	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.3000000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.1000000
0.0000000E+00	0.7500000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	→ Tasas de falla para el primer punto de carga		
0.2300000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.2000000	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.3000000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.1000000
0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.5000000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	→ Tasas de falla para el segundo punto de carga		
0.2300000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.2000000	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.3000000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.1000000
0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.2500000	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	→ Tasas de falla para el tercer punto de carga		
11.00000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.5000000	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.5000000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.5000000
0.0000000E+00	1.0000000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	→ Tiempos promedio de reparación para el primer punto de carga		
11.00000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	3.0000000	0.0000000E+00
0.0000000E+00	3.0000000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.5000000
0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.0000000	0.0000000E+00	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	→ Tiempos promedio de reparación para el segundo punto de carga		
11.00000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	3.0000000	0.0000000E+00
0.0000000E+00	3.0000000	0.0000000E+00	0.0000000E+00	3.0000000
0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	1.0000000	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00	0.0000000E+00
0.0000000E+00	0.0000000E+00	→ Tiempos promedio de reparación para el tercer punto de carga		

Cabe mencionar que el tamaño del archivo ICOST.DAT depende del número de los puntos de carga y de los nodos totales del grafo modelador.

En LECMAT1 se generan los archivos de salida MATRIZ.SAL, INDICES.SAL e INDICE\_BASE.DAT. La salida MATRIZ.SAL arroja la matriz de los parámetros (tasa de falla, tiempo promedio de reparación e indisponibilidad), en INDICES.SAL se escriben las sumatorias de cada uno de los parámetros y en INDICE\_BASE.DAT se imprimen solo los valores de las sumatorias de los parámetros (tasa de falla e indisponibilidad) que se tomarán en cuenta para el estudio de la rentabilidad (solo para la red base). El archivo de entrada



para las subrutinas LECMAT1 y LECMAT2 es el archivo ICOST.DAT. Los archivos MATRIZ.SAL, INDICES.SAL e INDICE\_BASE.DAT se observan en la Tabla D.3 y en las Figuras D.2 y D.3 respectivamente.

**Tabla D.3 Archivo de salida MATRIZ.SAL de la subrutina LECMAT1**

la matriz de la tasa de falla es:

```
0.2300000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.2000000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.3000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.1000000
0.0000000E+00 0.7500000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.2300000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.2000000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.3000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.1000000
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.5000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.2300000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.2000000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.3000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.1000000
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.2500000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00
```

la matriz del tiempo de reparación es:

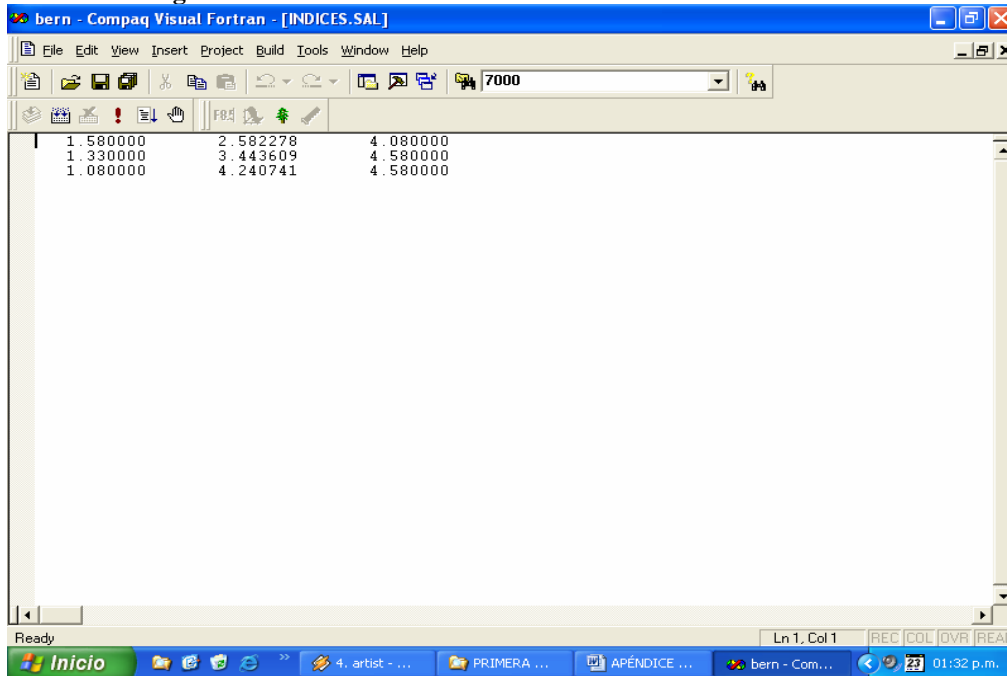
```
11.00000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 3.000000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.5000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.5000000
0.0000000E+00 1.000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00
11.00000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 3.000000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 3.000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.5000000
0.0000000E+00 0.0000000E+00 1.000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00
11.00000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 3.000000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 3.000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 3.000000
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 1.000000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00
```

la matriz de la indisponibilidad es:

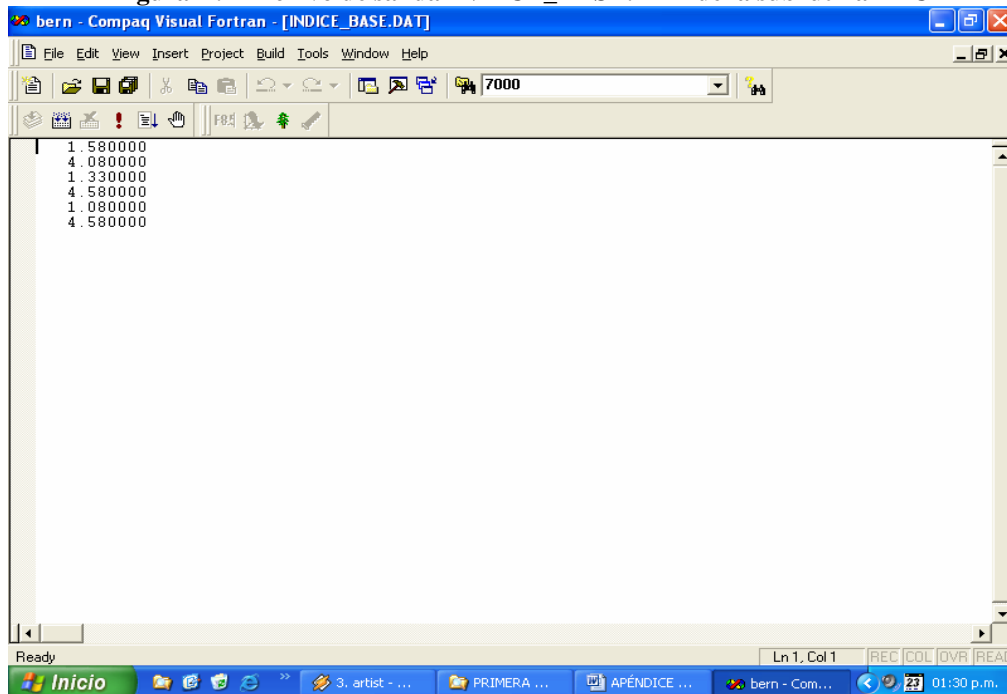
```
2.530000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.6000000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.1500000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 5.0000001E-02
0.0000000E+00 0.7500000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00
2.530000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.6000000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.9000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 5.0000001E-02
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.5000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00
2.530000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.6000000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.9000000 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.3000000
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.2500000 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00 0.0000000E+00
0.0000000E+00 0.0000000E+00
```

El tamaño del archivo MATRIZ.SAL depende del número de los puntos de carga, de los nodos totales y del número de las secciones de línea (principales y laterales) en el grafo modelador.

**Figura D.3 Archivo de salida INDICES.SAL de la subrutina LECMAT1**



**Figura D.4 Archivo de salida INDICE\_BASE.DAT de la subrutina LECMAT1**



En LECMAT2 se generan los archivos de salida MATRIZ.SAL, INDICES.SAL e INDICE\_PRO.DAT. La salida MATRIZ.SAL arroja la matriz de los parámetros (tasa de falla, tiempo promedio de reparación e indisponibilidad), en INDICES.SAL se escriben las sumatorias de cada uno de los parámetros y en INDICE\_PRO.DAT se imprimen solo los valores de las sumatorias de los parámetros (tasa de falla e indisponibilidad) que se tomarán en cuenta para el estudio de la rentabilidad (para las redes propuestas). Los archivos MATRIZ.SAL, INDICES.SAL e INDICE\_PRO.DAT se pueden observar en la Tabla D.4 y en las Figuras D.5 y D.6 respectivamente.

En RENTA los archivos de entrada son los generados por LECMAT1 y LECMAT2, es decir, INDICE\_BASE.DAT (Tabla D.5) e INDICE\_PRO.DAT (Tabla D.8) respectivamente, así también el archivo ENTRADA.DAT que es generado en la subrutina “prueba”. Los archivos de salida generados por la subrutina RENTA son RENTA.SAL y RBC.SAL. En el archivo ENTRADA.DAT se observan los datos necesarios para realizar el estudio de rentabilidad, en el archivo RENTA.SAL se escriben los índices de confiabilidad (IAC, DIC, SAIFI, SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI, ENS, AENS) del sistema base como del sistema propuesto, así también, los resultados del estudio de rentabilidad (VPN, RBC y TIR) de los dos sistemas bajo estudio, obteniendo así un valor de RBC para cada red propuesta. Una vez que son analizadas todas las redes propuestas, se tomará la decisión de que red es la que ofrece una mayor relación costo-beneficio. Los archivos ENTRADA.DAT, RENTA.SAL y RBC.SAL se pueden observar en la Figura D.6, en la Tabla D.5 y en la Figura D.7 respectivamente.

En la subrutina “prueba” el archivo de entrada es BER.DAT. El archivo BER.DAT contiene la información para obtener los índices de confiabilidad, así como los datos para realizar el estudio de rentabilidad, también contiene la información necesaria para la curva de daño al consumidor. El archivo BER.DAT se puede observar en la Figura D.9.

El tamaño de los archivos ICOST.DAT, MATRIZ.SAL (de LECMAT1), MATRIZ.SAL (de LECMAT2) depende del número de los puntos de carga, de los nodos totales y del número de las secciones de línea (principales y laterales) en el grafo modelador, mientras que el tamaño de los archivos INDICES.SAL (de LECMAT1), INDICE\_BASE.DAT, INDICES.SAL (de LECMAT2), INDICE\_PRO.DAT dependen del número de los puntos de carga y del número de los nodos totales del grafo.

Los archivos “dates.sal”, “cadbin.sal” y “costosinv.sal” son los archivos de salida del programa principal “algentc”, la diferencia entre ellos es que en el primero se observan las poblaciones por cada generación pero en forma lógica, es decir T y F (Verdadero y Falso) además de los datos estadísticos por cada generación, en cambio en el segundo archivo se observan las poblaciones por cada generación en forma binaria (0’s y 1’s), además de los valores de aptitud para cada individuo por cada generación. En el tercer archivo (“costosinv.sal”) se pueden observar los costos de inversión de cada proyecto por cada generación. De tal manera que con los datos obtenidos en estos archivos se puede hacer la elección del proyecto más rentable, considerando diversas variables como el límite económico e índices de confiabilidad. Estos archivos se pueden observar en las Figuras D.9, D.10 y D.11 respectivamente.



**Tabla D.4 Archivo de salida MATRIZ.SAL de la subrutina LECMAT2**

la matriz de la tasa de falla es:

```

0.2300000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.2000000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.3000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.1000000
0.0000000E+00  0.7500000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.2300000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.2000000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.3000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.1000000
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.5000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.2300000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.2000000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.3000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.1000000
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.2500000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00

```

la matriz del tiempo de reparación es:

```

11.00000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.5000000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.5000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.5000000
0.0000000E+00  1.000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00
11.00000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  3.000000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  3.000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.5000000
0.0000000E+00  0.0000000E+00  1.000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00
11.00000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  3.000000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  3.000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  3.000000
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  1.000000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00

```

la matriz de la indisponibilidad es:

```

2.530000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.1000000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.1500000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  5.0000001E-02
0.0000000E+00  0.7500000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00
2.530000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.6000000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.9000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  5.0000001E-02
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.5000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00
2.530000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.6000000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.9000000  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.3000000
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.2500000  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00  0.0000000E+00
0.0000000E+00  0.0000000E+00

```



Figura D.5 Archivo de salida INDICES.SAL de la subrutina LECMAT2

```

1.580000      2.265823      3.580000
1.330000      3.443609      4.580000
1.080000      4.240741      4.580000
    
```

Figura D.6 Archivo de salida INDICE\_PRO.DAT de la subrutina LECMAT2

```

1.580000
3.580000
1.330000
4.580000
1.080000
4.580000
    
```

Figura D.7 Archivo de entrada ENTRADA.DAT (para la subrutina RENTA) generado por la subrutina “prueba”

```
52676.76
32800.00
0.4800000
0.9000000
0.1000000
20.00000
1
30000
3
250.0000
10000.00
100.0000
10000.00
50.00000
10000.00
1
30000
3
250.0000
10000.00
100.0000
10000.00
50.00000
10000.00
```



**Tabla D.5 Archivo de salida RENTA.SAL de la subrutina RENTA**

PARA EL SISTEMA 1

EN EL ALIMENTADOR 1

EL IAC ES: 582.0000  
EL DIC ES: 1707.0000  
EL SAIFI ES: 1.4550  
EL SAIDI ES: 4.2675  
EL CAIDI O TIU ES: 2.9330  
EL ASAI ES: 0.9995129  
EL ASUI ES: 0.0004872  
EL ENS ES: 132400.0000  
EL AENS ES: 331.0000

EL VPN ES 1159330.

PARA EL SISTEMA 2

EN EL ALIMENTADOR 1

EL IAC ES: 582.0000  
EL DIC ES: 1582.0000  
EL SAIFI ES: 1.4550  
EL SAIDI ES: 3.9550  
EL CAIDI O TIU ES: 2.7182  
EL ASAI ES: 0.9995485  
EL ASUI ES: 0.0004515  
EL ENS ES: 127400.0000  
EL AENS ES: 318.5000

EL VPN ES 1087496.

DEL ESTUDIO DE RENTABILIDAD OBTENEMOS:

EL VPN BENEFICIO ES: 611554  
EL VPN ES: 526077  
CON UNA  $i$  DE 0.7925718  
LA TIR QUE HACE CERÓ A VPN ES 67.40986  
DANDO UN VALOR DE -192034.8

EL RBC ES 7.154623

POR LO TANTO EL PROYECTO ES RENTABLE AQUI

Figura D.8 Archivo de salida RBC.SAL de la subrutina RENTA

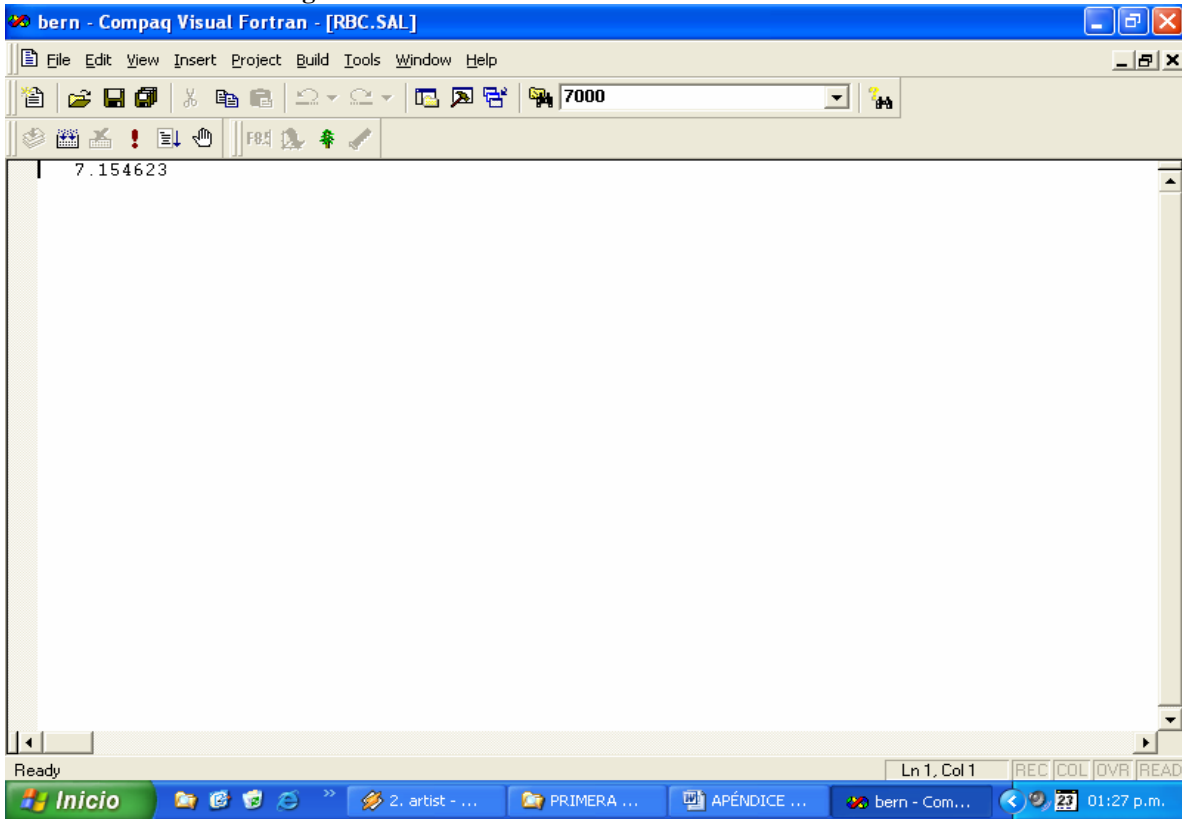


Figura D.9 Archivo de entrada BER.DAT para la subrutina “prueba”

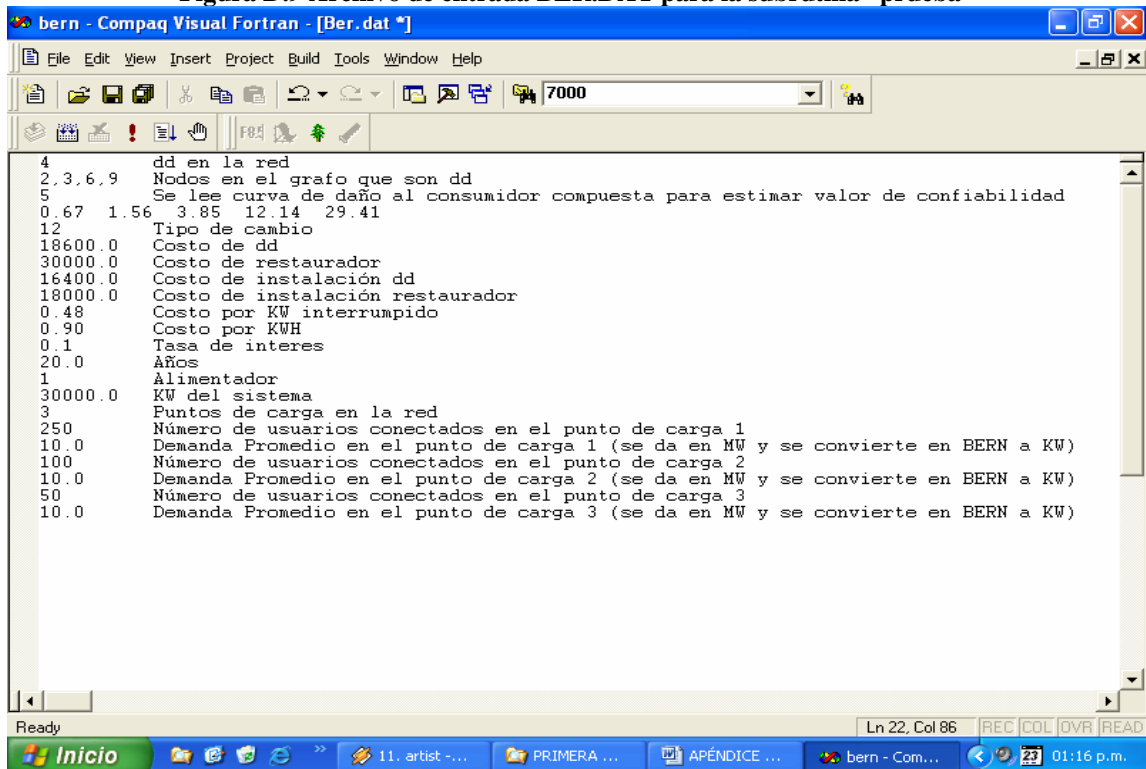


Figura D.10 Archivo de salida “dates.sal” del programa “algente”

```

11 TTTTTTTTT
12 TTTTTTTTT
13 FTTTTTTTT
14 FTTTTTTTT
15 FTTTTTTTT
16 FTTTTTTTT
17 TTTTTTTTT
18 FTTTTTTTT
19 TTTTTTTTT
20 FTTTTTTTT
21 FTTTTTTTT
22 TTTTTTTTT
23 FTTTTTTTT
24 TTTTTTTTT
25 TTTTTTTTT
26 FTTTTTTTT
27 FTTTTTTTT
28 FTTTTTTTT
29 FTTTTTTTT
30 FTTTTTTTT
31 TTTTTTTTT
32 FTTTTTTTT
33 TTTTTTTTT
34 FTTTTTTTT
35 FTTTTTTTT
36 FTTTTTTTT
37 FTTTTTTTT
38 TTTTTTTTT
39 TTTTTTTTT
40 FTTTTTTTT

Tamaño de la población (popsize)      40
Longitud de la cromosoma (lchroma)    8
Máximo # de generaciones (maxgen)    30
Probabilidad de cruzamiento (pcross)  0.600000
Probabilidad de mutación (pmutation)  0.030000

*** Estadística de generación inicial ***
Valor máximo de fitness de la población inicial  0.2834768E+01
Valor promedio de fitness de la población inicial 0.1296185E+01
Valor mínimo de fitness de la población inicial  0.3648996E+00
    
```

Figura D.11 Archivo de salida “dates.sal” del programa “algente”

```

1 2 1 0
1 2 1 1
2 1 1 2
1 1 1 1
1 1 1 1
1 1 1 2
0 1 0 1
1 1 2 2
1 1 0 2
1 2 1 0
0 0 1 0
1 1 2 0
2 1 2 1
1 1 1 1
1 2 1 1
1 0 0 2
0 1 2 1
0 1 2 2
1 0 0 2
1 1 1 1
1 2 1 2
2 2 1 1
0 1 1 0
0 1 1 1
0 1 1 1
1 1 0 2
0 1 2 0
2 1 2 2
2 1 1 2
0 1 2 1

RBC-fitness      1 0.0000000E+00
RBC-fitness      2 -3.586616
RBC-fitness      3 0.9475616
RBC-fitness      4 -1.321980
RBC-fitness      5 -3.586616
RBC-fitness      6 0.8223413
RBC-fitness      7 2.645023
RBC-fitness      8 -10.70380
RBC-fitness      9 0.9011050
RBC-fitness     10 1.076019
RBC-fitness     11 0.8784319
RBC-fitness     12 0.3955866
RBC-fitness     13 0.3955866
RBC-fitness     14 0.9475616
RBC-fitness     15 -3.586616
    
```

Figura D.12 Archivo de salida “costosinv.sal” del programa “algentc”

```

183504
170504
181700
168464
203464
135727
168464
203464
203464

**** Reporte de la generación **** 2
203464
181700
168464
181700
203464
203464
146700
203464
168464
203464

**** Reporte de la generación **** 3
203464
183727
146700
168464
168464
203464
203464
113040
168464
168464

**** Reporte de la generación **** 4

Loaded 'ntdll.dll', no matching symbolic information found.
Loaded 'C:\WINDOWS\system32\kernel32.dll', no matching symbolic information found.
Loaded 'C:\WINDOWS\system32\apphelp.dll', no matching symbolic information found.
Loaded 'C:\WINDOWS\system32\advapi32.dll', no matching symbolic information found.
Loaded 'C:\WINDOWS\system32\rpcrt4.dll', no matching symbolic information found.
The thread 0xC88 has exited with code 0 (0x0)

```



## D.5 CÓDIGO FUENTE DEL PROGRAMA “ALGENTC” Y SUBRUTINAS

A continuación se observa el código fuente del programa principal *algentc* y de las subrutinas.

```

|*****
! Programa Principal
|
|*****
logical*1 oldpop(50,50)
integer popsize,gen
integer nmutation,ncross,lchrom,maxgen
real oldfit(50),pcross,pmutation
real max,avg,min,sumfitness
integer cadenpos,cp(50) !de statistics
real fitness(50) !de statistics
integer vec(50,50),bloques !de subcadenas
real, dimension(32800):: rbc ! de prueba

Common/a/popsize,lchrom,maxgen,pcross,pmutation
Common/b/nmutation,ncross
Common/c/oldpop,oldfit
Common/d/max,avg,min,sumfitness
common/w/vec ! de subcadenas
common/z/bloques ! de subcadenas
common/y/rbc ! de prueba
common/r/cadenpos,fitness ! de statistics
common/v/cp ! de statistics

Common/a/popsize,lchrom,maxgen,pcross,pmutation
Common/b/nmutation,ncross
Common/c/oldpop,oldfit
Common/d/max,avg,min,sumfitness
common/r/cadenpos,fitness !de statistics
common/v/cp !de statistics
common/w/vec !de subcadenas
common/z/bloques !de subcadenas
common/y/rbc ! de prueba

call initdata
call initpop
call subcadenas
call prueba
call statistics
call initreport

return
end

open(1,file='dates.dat')
open(2,file='dates.sal')
open(5,file='datesp.sal')
open(7,file='cadena.sal')
open(6,file='select.sal')
open(11,file='cadena2.dat')
open(90,file='datos.sal')
open(91,file='dats.dat')
open(92,file='valcad.sal')
open(93,file='veccad.sal')
open(94,file='cadbin.sal')
!open(89,file='datos2.dat')
open(97,file='poblagens.sal')
open(98,file='oldfit.dat')
open(100,file='costosinv.sal')
|*****
gen=0
call initialize
do i=1,maxgen
gen=gen+1
call generation(gen)
call statistics
call subcadenas
call reporstati
end do
stop
end

! *****
subroutine initialize
!
|*****
logical*1 oldpop(50,50)
real pcross,pmutation
real min,max,avg,sumfitness
real oldfit(50)
integer popsize,lchrom,maxgen
integer nmutation,ncross

integer vec(50,50),bloques
real, dimension(32800):: rbc
integer cadenpos,cp(50)
real fitness(50)

Common/a/popsize,lchrom,maxgen,pcross,pmutation
Common/b/nmutation,ncross
Common/c/oldpop,oldfit
Common/d/max,avg,min,sumfitness
common/w/vec ! de subcadenas
common/z/bloques ! de subcadenas
common/y/rbc ! de prueba
common/r/cadenpos,fitness ! de statistics
common/v/cp ! de statistics

call initdata
call initpop
call subcadenas
call prueba
call statistics
call initreport

return
end

! *****
subroutine initdata
!
|*****
real pcross,pmutation
integer popsize,lchrom,maxgen
integer nmutation,ncross
integer cp(50)

Common/a/popsize,lchrom,maxgen,pcross,pmutation
Common/b/nmutation,ncross
common/v/cp !agregado

read(1,*)popsize
read(1,*)lchrom
read(1,*)maxgen
read(1,*)pcross
read(1,*)pmutation

nmutation=0
ncross=0

return
end

! *****
subroutine initpop
! *****
logical*1 fli,oldpop(50,50)
integer seed(1)
real pcross,pmutation
real proba,objf
integer popsize,lchrom,maxgen
integer nmutation,ncross
integer deco,x
real oldfit(50)

Common/a/popsize,lchrom

```



```

Common/c/oldpop,oldfit

seed=123456789

call random_seed(put=seed)

write(2,(/,20x,"*** Reporte de generación ***
0"/,2x,"#",13x,"Cadena",22x,"x",7x,"fitness",/))

write(94,(/,20x,"*** Reporte de generación *** 0"/,/)
write(100,(/,20x,"*** Reporte de generación *** 0"/,/)

do j=1,popsize
  do j1=1,lchrom
    proba=0.5

    call flip(proba,fl)
    chrom(j,j1)=fl
    oldpop(j,j1)=fl
  end do

  call decode(oldpop,lchrom,j,deco)
  x=deco

write(2,10j,(oldpop(j,i),i=1,lchrom),x,oldfit(j)
write(5,*,j,(oldpop(j,i),i=1,lchrom),' deco',x,' va',oldfit(j)
write(7,*,(oldpop(j,i),i=1,lchrom)
write(11,*,(oldpop(j,i),i=1,lchrom)
write(94,*,j,(oldpop(j,i),i=1,lchrom),x,oldfit(j)
10 format(i3,2x,30i1,i14,3x,f6.4)

end do

write(94,*)

return
end

! *****
subroutine flip(probability,fl)
! *****
logical*1 fl
real ran
real probability

if(probability .eq. 1.0)then
  fl=.true.
else
  call random_number(ran)

if(ran .le. probability)then
  fl=.true.
else
  fl=.false.
end if

end if

return
end

! *****
subroutine subcadenas
! *****
logical*1 a(50,50)
integer bloques,lchrom,popsize
integer b(50,50),blo(50),c(50),cp(50)
integer vec(50,50),u,r,w
logical*1 oldpop(50,50)

```

```

Common/a/popsize,lchrom
Common/c/oldpop
common/w/vec
common/z/bloques
common/h/j

bloques=lchrom/2

do o=1,bloques
  blo(o)=o*2
end do

do i=1,popsize
  u=1
  c(u)=0

  if (popsize==1)then
    h=j
  else
    h=i
  end if

do m=1,lchrom

  if(oldpop(h,m)==.true.)then
    b(h,m)=1
  else
    b(h,m)=0
  end if

  c(u)=c(u)+b(h,m)
  vec(h,u)=c(u)

  if(m.eq.blo(u))then
    u=u+1

  if(u.gt.bloques)then
    do y=1,u-1
      cp(y)=c(y)
      c(y)=0
    end do
  end if
end if

end do

write(93,'(30I3)')(vec(h,u),u=1,bloques)
write(94,'(30I3)')(vec(h,u),u=1,bloques)
write(90,'(30I3)')(b(h,m),m=1,lchrom)
write(91,'(30I3)')(b(h,m),m=1,lchrom)
write(92,'(30I3)')(b(h,m),m=1,lchrom)
write(93,'(30I3)')(b(h,m),m=1,lchrom)
write(97,'(30I3)')(vec(h,u),u=1,bloques) !poblagens

end do

return
end

! *****
subroutine prueba
! *****
real oldfit(50)
integer bloques,lchrom,popsize,i
integer vec(50,50)
INTEGER,DIMENSION(100) :: SEC
integer cam(100),maxp,maxd,M,D,P,C
INTEGER :: NSEC, NPUNTOS, NP, NE
INTEGER, DIMENSION(1) :: NR,ii

```





```

INTEGER,DIMENSION(32800,20) :: A
REAL,DIMENSION(100) :: CURV, USUARIOS,
CARGA_PROM
REAL, DIMENSION(500,32800) :: INDE1, INDE2
REAL, DIMENSION(0:32800) :: CARGA_NP, ICOST1
REAL, DIMENSION(32800) :: COSTV, RBC
INTEGER, DIMENSION(0:32800) :: NODOS_POSIB, NPOSIA,
NPOSI_A
INTEGER, DIMENSION(0:100) :: KM,KME
INTEGER(2) RESULT
INTEGER(4) frequency, duration
INTEGER j,k
REAL MIN_COSTO,DOLLAR,
costo_dd,costo_res,costo_mano,costo_mano_res

Common/a/popsizelchrom
common/w/vec
common/z/bloques
common/y/rbc

OPEN(4,FILE='SALIDA.SAL')
OPEN(8,FILE='BER.DAT')
open(100,file='costosinv.sal')

READ(8,*)NSEC
READ(8,*)(SEC(I),I=1,NSEC)
READ(8,*)NPUNTOS
READ(8,*)(CURV(I),I=1,NPUNTOS)
READ(8,*)DOLLAR
READ(8,*)costo_dd
READ(8,*)costo_res
READ(8,*)costo_mano
READ(8,*)costo_mano_res
READ(8,*)BKW
READ(8,*)BKWH
READ(8,*)TI
READ(8,*)TE
READ(8,*)NCTE
READ(8,*)KWSIS
READ(8,*)NP

DO CD=1,NP
  READ(8,*)USUARIOS(CD)
  READ(8,*)CARGA_PROM(CD) ! Carga Promedio en
  cada punto de carga
END DO

CLOSE(8)

open(unit=19,file='bernoulli.sal')

WRITE(19,*)NSEC
write(19,*)(vec(1,j),J=1,bloques)
WRITE(19,*)(SEC(K),K=1,NSEC)

CLOSE(19)

RESULT=RUNQQ('ALCON', '-c -r')
IF(RESULT /= 0)THEN
  WRITE(*,('FALLA EN EL PROGRAMA ALCON'))
  PRINT*,I
  CALL BEEPQQ(frequency, duration)
  PAUSE
  STOP
END IF

OPEN(8000,FILE='ICOST.DAT')
READ(8000,*)NP
READ(8000,*)(NODOS_POSIB(IK),IK=1,NP)
READ(8000,*)(CARGA_NP(IK),IK=1,NP)
READ(8000,*)NE
DO IK=1,NP
  READ(8000,*)(INDE1(IK,JK),JK=1,NE)
END DO
DO IK=1,NP
  READ(8000,*)(INDE2(IK,JK),JK=1,NE)
END DO

CLOSE(8000)

CALL
CURVA(NPUNTOS,CURV,NP,CARGA_NP,NE,INDE1,INDE2,
I,COSTV)

RESULT=RUNQQ('LECMAT2', '-c -r')
IF(RESULT /= 0)THEN
  WRITE(*,('FALLA EN EL PROGRAMA LECMAT'))
  PRINT*,I
  CALL BEEPQQ(frequency, duration)
  PAUSE
  STOP
END IF

NCONTA1=0

READ(8000,*)NE
DO IK=1,NP
  READ(8000,*)(INDE1(IK,JK),JK=1,NE)
END DO
DO IK=1,NP
  READ(8000,*)(INDE2(IK,JK),JK=1,NE)
END DO

CLOSE(8000)

RESULT=RUNQQ('LECMAT1', '-c -r')
IF(RESULT /= 0)THEN
  WRITE(*,('FALLA EN EL PROGRAMA LECMAT'))
  PRINT*,I
  CALL BEEPQQ(frequency, duration)
  PAUSE
  STOP
END IF

RBC=0
COSTV=0

DO I=2,popsizelchrom

  KKK=KKK+1
  open(unit=19,file='bernoulli.sal')

  WRITE(19,*)NSEC
  write(19,*)(vec(i,j),J=1,bloques)
  WRITE(19,*)(SEC(K),K=1,NSEC)

  CLOSE(19)

RESULT=RUNQQ('ALCON', '-c -r')
IF(RESULT /= 0)THEN
  WRITE(*,('FALLA EN EL PROGRAMA ALCON'))
  PRINT*,I
  CALL BEEPQQ(frequency, duration)
  PAUSE
  STOP
END IF

OPEN(8000,FILE='ICOST.DAT')
READ(8000,*)NP
READ(8000,*)(NODOS_POSIB(IK),IK=1,NP)
READ(8000,*)(CARGA_NP(IK),IK=1,NP)
READ(8000,*)NE
DO IK=1,NP
  READ(8000,*)(INDE1(IK,JK),JK=1,NE)
END DO
DO IK=1,NP
  READ(8000,*)(INDE2(IK,JK),JK=1,NE)
END DO

CLOSE(8000)

CALL
CURVA(NPUNTOS,CURV,NP,CARGA_NP,NE,INDE1,INDE2,
I,COSTV)

RESULT=RUNQQ('LECMAT2', '-c -r')
IF(RESULT /= 0)THEN
  WRITE(*,('FALLA EN EL PROGRAMA LECMAT'))
  PRINT*,I
  CALL BEEPQQ(frequency, duration)
  PAUSE
  STOP
END IF

NCONTA1=0

```



```

NCONTA2=0

DO JJ=1,bloques
  IF(vec(i,JJ) == 1)NCONTA1=NCONTA1+1
  IF(vec(i,JJ) == 2)NCONTA2=NCONTA2+1
END DO

COSTV(I)=(COSTV(I)*DOLLAR)+((NCONTA1*costo_dd)+(N
CONTA2*costo_res))

XCOS=(NCONTA1*costo_mano)+(NCONTA2*costo_mano_res
)

costoinv=0.0
costoinv=(costv(i)+xcos)+costoinv
costoinver(i)=costoinv

  OPEN(9000,FILE='ENTRADA.DAT')

  WRITE(9000,*)COSTV(I)
  WRITE(9000,*)XCOS
  WRITE(9000,*)BKW
  WRITE(9000,*)BKWH
  WRITE(9000,*)TI
  WRITE(9000,*)TE
  WRITE(9000,*)NCTE
  WRITE(9000,*)KWSIS
  WRITE(9000,*)NP
  DO KH=1,NP
  WRITE(9000,*)USUARIOS(KH)
  WRITE(9000,*)CARGA_PROM(KH)*1000.0
  END DO
  WRITE(9000,*)NCTE
  WRITE(9000,*)KWSIS
  WRITE(9000,*)NP
  DO KH=1,NP
  WRITE(9000,*)USUARIOS(KH)
  WRITE(9000,*)CARGA_PROM(KH)*1000.0
  END DO

CLOSE(9000)

RESULT=RUNQQ('RENTA', '-c -r')
IF(RESULT /= 0)THEN
  WRITE(*,('FALLA EN EL PROGRAMA RENTA'))
  PRINT*,I
  CALL BEEPQQ(frequency, duration)
  PAUSE
  STOP
  END IF

OPEN(14000,FILE='RBC.SAL')
READ(14000,*)RBC(I)
CLOSE(14000)

PRINT*,i

END DO

NR=MAXLOC(RBC(1:popsize))

write(*,*)(vec(NR(1),j),j=1,bloques) !imprime la combinación
ganadora (una anterior)
write(*,*)
ii=NR
write(*,*)          !iteracion ganadora si no se
considera a la cadena inicial
write(*,*)!la combinacion ganadora esta en la iteracion',ii
write(*,*)

rbcpos=0.0

do j=1,popsize
write(*,*)'valores rbc',j
write(*,*)rbc(j)
if(rbc(j).gt.0)then
rbcpos=rbcpos+1
end if
end do

do j=2,popsize
write(100,*)costoinver(j)
end do

if (rbcpos.eq.0)then
write(*,*)'no es rentable el sistema propuesto'
else
write(*,*)'es rentable el sistema propuesto'
end if

return
end

! *****
subroutine decode(chrom,lbits,j1,deco)
! *****
logical*1 chrom(50,50)
integer deco,accum,powerof2
integer lbits,j1

accum=0.0
powerof2=1.0
do j=lbits,1,-1
if(chrom(j1,j))accum=accum+powerof2
powerof2=powerof2*2
end do
deco=accum

return
end

! *****
subroutine statistics
! *****
logical*1 pop(50,50)
real oldfit(50)
real fitness(50),fitness(50)
real min,max,avg,sumfitness
integer popsize
real, dimension(32800):: rbc
integer cadenpos,cadeneg,cp(50),contpos

Common/a/popsize
Common/c/pop,fitness
!common/h/oldfit
Common/d/max,avg,min,sumfitness
common/y/rbc
common/r/cadenpos,fitnes
common/v/cp

cadenpos=0.0
cadeneg=0.0
a=0.0
contpos=0.0

!rbc(1)=1.7341539E-12
!rbc(2)=1.8183922E-06
!rbc(3)=1.7341539E-12
!rbc(4)=1.7341539E-12

```



```

!rbc(5)=6.0466202E-03
!rbc(1)=0.2390677
!rbc(2)=1.8183922E-06
!rbc(3)=-1.7341539
!rbc(4)=1.7341539E-12
!rbc(5)=-6.0466202E-03

!rbc(1)=1.8183922E-06
!rbc(2)=-6.0466202E-03
!rbc(3)=0.2895054
!rbc(4)=-1.7341539
!rbc(5)=0.2390677

do j=1,popsize
WRITE(94,*)RBC-fitness',j,RBC(j)
contpos=contpos+1
  if(rbc(j).gt.0)then
    a=a+1
    fitness(a)=rbc(j)
    cp(a)=contpos
    cadenpos=cadenpos+1
  else
    cadeneg=cadeneg+1
  end if
end do

if(cadenpos.eq.1)then
!WRITE(*,*)'solo una cadena positiva'
sumfitness=fitness(a)
min=fitness(a)
max=fitness(a)
avg=sumfitness
  write(5,*)'max',max
  write(5,*)'min',min
  write(5,*)'avg',avg
  write(5,*)
! write(*,*)'sumfitness',sumfitness
!   write(*,*)'max',max
! write(*,*)'min',min
! write(*,*)'avg',avg
! write(*,*)
else
! WRITE(*,*)'mas de una cadena positiva'
sumfitness=fitness(1)
  min=fitness(1)
  max=fitness(1)

do j=2,cadenpos
  sumfitness=sumfitness+fitness(j)
  if(fitness(j) .gt. max)max=fitness(j)
  if(fitness(j) .lt. min)min=fitness(j)
end do

avg=sumfitness/cadenpos

write(5,*)'max',max
write(5,*)'min',min
write(5,*)'avg',avg
write(5,*)
!   write(*,*)'sumfitness',sumfitness
!   write(*,*)'max',max
! write(*,*)'min',min
! write(*,*)'avg',avg
! write(*,*)
end if

do j=1,cadenpos
fitnes(j)=fitness(j)

```

```

end do
return
end

! *****
      subroutine initreport
! *****
real pcross,pmutation
real min,max,avg,sumfitness
integer popsize,lchrom,maxgen

Common/a/popsize,lchrom,maxgen,pcross,pmutation
Common/d/max,avg,min,sumfitness

  write(2,10)popsize
10  format(/,6x,'Tamaño de la población (popsize)      ',i3)
  write(2,20)lchrom
20  format(/,6x,'Longitud de la cromosoma (lchrom)      ',i3)
  write(2,30)maxgen
30  format(/,6x,'Máximo # de generaciones (maxgen)      ',i3)
  write(2,40)pcross
40  format(/,6x,'Probabilidad de cruzamiento (pcross)      ',f8.6)
  write(2,50)pmutation
50  format(/,6x,'Probabilidad de mutación (pmutation)
',f8.6)
  write(2,60)
60  format(/,8x,'*** Estadística de generación inicial ***')
  write(2,70)max
70  format(/,1x,'Valor máximo de fitness de la población inicial
',e13.7)
  write(2,80)avg
80  format(/,1x,'Valor promedio de fitness de la población inicial
',e13.7)
  write(2,90)min
90  format(/,1x,'Valor mínimo de fitness de la población inicial
',e13.7)
  write(2,100)sumfitness
100 format(/,1x,'sumatoria de fitness de la población inicial
',e13.7)

return
end

! *****
      subroutine generation(gen)
! *****
logical*1 oldpop(50,50),newpop(50,50),oldpopbase(50,50)
integer popsize,sel,mate1,mate2,j,jcross,gen
integer nmutation,ncross,lchrom,maxgen,deco,x
integer parent1(50),parent2(50),xsite(50)
dimension x1(50)
real oldfit(50),newfit(50),pcross,pmutation
real max,avg,min,sumfitness,rand,partsum
integer
vec(50,50),veca(50,50),bloques,vecc(50,50),cp(50),cadenpos
real, dimension(32800):: rbc
real fitnes(50)
INTEGER, DIMENSION(1) :: NR,ii

Common/a/popsize,lchrom,maxgen,pcross,pmutation
Common/b/nmutation,ncross
Common/c/oldpop,oldfit
Common/d/max,avg,min,sumfitness
Common/e/sel
Common/f/mate1,mate2
Common/g/newpop
Common/h/j

```



```

Common/i/jcross
Common/z/bloques
Common/w/vec
Common/y/rbc
common/v/cp
common/r/cadenpos,fitnes

!      call gettim(i,j,k,nseed)
!      call seed(nseed)

popsizeint=popsize

do i=1,popsize
write(*,*)rbc',rbc(i)
write(*,*)
end do

NR=MINLOC(RBC(1:popsize))

ii=NR

write(*,*)
! write(*,*)'el rbc mayor es',ii
! write(*,*)
! write(*,*)
write(*,*)'el rbc menor es',ii

do j=1,popsize
do i=1,bloques
vec(j,i)=vec(j,i)
end do
write(*,*)'vec imp',(vec(j,i),i=1,bloques)
end do

do i=1,popsize
vecc(1,i)=vec(NR(1),i)
end do

write(*,*)'vecc',(vecc(1,i),i=1,bloques)
write(*,*)

j=1

10 if(j .gt. popsize)goto 20

call selec
mate1=sel

write(6,*)'mate1',mate1
write(6,*)

call selec
mate2=sel

write(6,*)'mate2',mate2
write(6,*)

write(*,*)'cadena a considerar',(oldpop(mate1,s),s=1,lchrom)
write(*,*)'cadena a considerar',(oldpop(mate2,s),s=1,lchrom)

call crossover

call decode(newpop,lchrom,j,deco)
x=deco
x1(j)=deco

write(*,*)x y deco cadena hijo 1',x,x1(j)
write(*,*)hijo y cedana hijo (j,i)',j,(newpop(j,i),i=1,lchrom)

do i=1,lchrom

oldpop(j,i)=newpop(j,i)
newpop(j,i)=newpop(j,i)
end do

popsize=1
write(*,*)
write(*,*)'oldpop',(oldpop(j,i),i=1,lchrom)
call subcadenas
write(*,*)'cadena hijo 1 codificada',(vec(j,i),i=1,bloques)

write(*,*)'popsize',popsize

do i=1,bloques
vec(2,i)=vec(j,i)
end do
do i=1,bloques
vec(1,i)=vecc(1,i)
end do

write(*,*)'primer cadena',(vec(1,i),i=1,bloques)
write(*,*)'segunda cadena',(vec(2,i),i=1,bloques)
popsize=2

call prueba

do i=1,popsize
write(*,*)
write(*,*)'rbc',rbc(i)
write(*,*)
end do

objf=rbc(popsize)

newfit(j)=obj.
parent1(j)=mate1
parent2(j)=mate2
xsite(j)=jcross
jl=j+1

call decode(newpop,lchrom,jl,deco)
x=deco
x1(j+1)=deco

write(*,*)
write(*,*)'cadena hijo 2'
write(*,*)
write(*,*)x y deco cadena hijo 2',x,x1(j+1)
write(*,*)'cedana hijo (j+1,i)',(newpop(j+1,i),i=1,lchrom)

do i=1,lchrom
!se crea oldpop de newpop (cadena hijo
2) para poder
oldpop(j,i)=newpop(j+1,i) !ser leida por la subrutina
subcadenas
end do

popsize=1
write(*,*)
write(*,*)'oldpop',(oldpop(j,i),i=1,lchrom)

call subcadenas

write(*,*)'cadena hijo 2 codificada',(vec(j,i),i=1,bloques)

write(*,*)'popsize',popsize

do i=1,bloques
vec(2,i)=vec(j,i) !se crea la cadena hijo 2 a vec(j+1,i)
end do

do i=1,bloques

```



```

    vec(1,i)=vecc(1,i)
end do

write(*,*)primer cadena',(vec(1,i),i=1,bloques)
write(*,*)segunda cadena',(vec(2,i),i=1,bloques)

popsize=2
call prueba

do i=1,popsize
  write(*,*)
  write(*,*)rbc',rbc(i)
  write(*,*)
end do

objf=rbc(popsize)

newfit(j+1)=obj.
parent1(j+1)=mate1
parent2(j+1)=mate2
xsite(j+1)=jcross

j=j+2

popsize=popsizeint

goto 10

20 continue

write(2,'(//,15x,"**** Reporte de la generación ****",i2)')gen
write(2,'(//,1x,"#",1x,"Padres",2x,"SitioX",9x,"Cadena",&
22x,"x",10x,"fitness"/)')
write(94,'(//,15x,"**** Reporte de la generación ****",i2)')gen
write(100,'(//,15x,"**** Reporte de la generación ****",i2)')gen

  do i=1,popsize
    write(2,'(i2,1x,"(",i2,",",i2,")",i3,4x,3011,2x,e10.4,5x,&
f6.4)')i,parent1(i),parent2(i),xsite(i),(newpop(i,l),l=1,lchrom),x1(i)
,newfit(i)
    write(94,*),i,(newpop(i,l),l=1,lchrom),x1(i),newfit(i)
  end do
  write(94,*)
  do i=1,popsize
    write(*,*)'i y newfit',i,newfit(i)
    ! oldfit(i)=newfit(i)
    rbc(i)=newfit(i)

    do l=1,lchrom
      oldpop(i,l)=newpop(i,l)
    end do
  end do

return
end

! *****
  subroutine selec
! *****
logical*1 pop(50,50)
integer popsize,sel
real fitness(50),oldfit(50),fitnes(50)
real max,avg,min,sumfitness,rand,partsum
!real*4 ranval,ran
real ranval
real,dimension(32800)::rbc
integer cadenpos,cdp1(50),cp(50)

Common/a/popsize

```

```

Common/c/pop,fitness
Common/d/max,avg,min,sumfitness
Common/e/sel
common/y/rbc
common/v/cp
common/r/cadenpos,fitnes

write(*,*)
write(*,*)rbc positivas',(cp(a),a=1,cadenpos)
write(*,*)

  if(cadenpos.eq.1)then

    do j=1,cadenpos
      sel=cp(j)
    end do

  end if

  if(cadenpos.gt.1)then

    do j=1,cadenpos
      write(*,*)fitness(j),fitness(j),j
      fitness(j)=fitness(j)
    end do

  partsum=0

  j=0

  call random_number(ranval)
  rand=ranval*sumfitness

  write(*,*)
  write(*,*)rand',rand
  write(*,*)sumfitness',sumfitness
  write(6,*)
  write(6,*)rand',rand
  write(6,*)sumfitness',sumfitness

  10 j=j+1

  partsum=partsum+fitness(j)

  write(*,*)
  write(*,*)rand',rand
  write(*,*)sumfitness',sumfitness
  write(*,*)fitness',fitness(j)
  write(*,*)partsum y j',partsum,j
  write(6,*)
  write(6,*)rand',rand
  write(6,*)sumfitness',sumfitness
  write(6,*)fitness',fitness(j)
  write(6,*)partsum y j',partsum,j

  if((partsum .ge. rand) .or. (j .eq. popsize))goto 20
  goto 10

20 continue
  sel=cp(j)

  write(6,*)sel',sel
  write(6,*)

  end if

  write(*,*)cadena seleccionada'
  write(*,*)sel',sel
  write(6,*)cadena seleccionada'
  write(6,*)sel',sel

```



```

return
end

! *****
      subroutine crossover
! *****
logical*1 parent(50,50),fli,muta,child(50,50)
integer lc,m,jcross,mate1,mate2,jj
integer popsize,mate,j
integer nmutation,ncross,lchrom,maxgen
real pcross,pmutation

Common/a/popsize,lchrom,maxgen,pcross,pmutation
Common/b/nmutation,ncross
Common/c/parent
Common/f/mate1,mate2
Common/g/child
Common/h/jj
Common/i/jcross
Common/k/mate,j,muta

call flip(pcross,fli)

write(6,*)'fli',fli
write(6,*)
if(fli)then
  lc=lchrom-1
  write(6,*)'lc',lc
  write(6,*)

  call rnd(1,lc,m)
  jcross=mn
  ncross=ncross+1

else

jcross=lchrom

end if

do j=1,jcross
  mate=mate1
  call mutation
  child(jj,j)=muta
  mate=mate2
  call mutation
  child(jj+1,j)=muta
end do

if(jcross.ne.lchrom)then
do j=jcross+1,lchrom
  mate=mate2
  call mutation
  child(jj,j)=muta
  mate=mate1
  call mutation
  child(jj+1,j)=muta
end do
end if

return
end

! *****
      subroutine rnd(low,high,m)
! *****
integer low,high,m
real*4 ranval,ran
real ranval

if(low.ge.high)then
  i=low
else
  call random_number(ranval)
  i=aint(ranval*(high-low+1)+low)
  if(i.gt.high)then
    i=high
  end if
end if

m=i

return
end

! *****
      subroutine mutation
! *****
logical*1 allelevel(50,50),fli,mutate,muta,oldpop(50,50)
integer popsize,lchrom,maxgen
integer nmutation,ncross
integer mate,j
real pcross,pmutation

Common/a/popsize,lchrom,maxgen,pcross,pmutation
Common/b/nmutation,ncross
Common/c/allelevel
Common/k/mate,j,muta

call flip(pmutation,fli)
write(6,*)'fli mutation',fli
mutate=fli

write(6,*)'mutate',mutate

if(mutate)then
  nmutation=nmutation+1

  if(allelevel(mate,j))then

write(6,*)'valor del alelo',allelevel(mate,j)

    muta=.false.
    else
    muta=.true.
    end if

  else
    muta=allelevel(mate,j)
  end if

  write(6,*)'muta',muta

return
end

! *****
      subroutine reporstati
! *****
real min,max,avg,sumfitness
integer popsize,lchrom,maxgen
integer nmutation,ncross

Common/a/popsize,lchrom,maxgen
Common/b/nmutation,ncross
Common/d/max,avg,min,sumfitness

write(2,70)max
70 format(/,5x,'Valor máximo de fitness de la población
',e13.7)

```



## Apéndice D – Descripción del programa digital



```

write(2,80)min
80 format(/,5x,'Valor mínimo de fitness de la población
',e13.7)
write(2,90)avg
90 format(/,5x,'Valor promedio de fitness de la población
',e13.7)
write(2,100)sumfitness
100 format(/,5x,'Sumatoria de fitness de la población
',e13.7)
write(2,110)nmutation
110 format(/,5x,'Número de mutaciones',i4)
write(2,120)ncross
120 format(/,5x,'Número de cruzamientos',i4)

return
end

SUBROUTINA CURVA
!*****
! Subrutina para cálculo de costo de interrupción al consumidor
!*****
SUBROUTINE CURVA
(NPUNTOS,CURV,NP,CARGA_NP,NE,INDE1,INDE2,KK,COSTV)

! NP = Numero de puntos de carga de la red de distribución
! NE = Numero de cortes asociados a cada NP

INTEGER :: NPUNTOS, I, J, NP, NE, KK

REAL,DIMENSION (500) :: CURV
REAL, DIMENSION(0:32800) :: CARGA_NP
REAL, DIMENSION(500,32800)::INDE1, INDE2
REAL :: SUMC1,SUMC2, ICOST, OM, COSTO, DURA, LAMDA
REAL, DIMENSION(32800) :: COSTV

SUMC1=0.0

DO I=1,NP
SUMC1=SUMC1+CARGA_NP(I)
END DO

SUMC2=0.0

DO I=1,NP
DO J=1,NE

LAMDA=INDE1(I,J)
DURA=INDE2(I,J)

if(DURA > 8.0)then
om=(curv(5)-curv(4))/(8.0-4.0)
costo=(dura*om)+((om*(-4.0))+curv(4))
else if(dura > 0.0166 .and. dura <= 0.3333)then
om=(curv(2)-curv(1))/(0.3333-0.0166)
costo=(dura*om)+((om*(-0.0166))+curv(1))
else if(dura > 0.3333 .and. dura <= 2.0)then
om=(curv(3)-curv(2))/(2.0-0.3333)
costo=(dura*om)+((om*(-0.3333))+curv(2))
else if(dura > 2.0 .and. dura <= 4.0)then
om=(curv(4)-curv(3))/(4.0-2.0)
costo=(dura*om)+((om*(-2.0))+curv(3))
else if(dura > 4.0 .and. dura <= 8.0)then
om=(curv(5)-curv(4))/(8.0-4.0)
costo=(dura*om)+((om*(-4.0))+curv(4))
end if

SUMC2=SUMC2+(COSTO*LAMDA)
END DO
END DO

ICOST=SUMC1*SUMC2
COSTV(KK)=ICOST

END SUBROUTINE CURVA

SUBROUTINA LECMAT1
!*****
! Subrutina para calcular los parámetros (tasa de falla, tiempo de
reparación e indisponibilidad) del archivo ICOST.DAT. Para la red
existente.
!*****
DIMENSION A(15,50),B(15,50),C(15,50)
dimension pear(1000), dema(1000)

OPEN(UNIT=1,FILE='ICOST.DAT') !ENTRADA DE LAS
MATRICES (TASA DE FALLA Y TIEMPO DE REPARACIÓN)

OPEN(UNIT=7,FILE='MATRIZ.SAL') !SALIDA DE LAS
MATRICES

OPEN(UNIT=8,FILE='INDICES.SAL') !SALIDA DE LOS
INDICES

OPEN(UNIT=9,FILE='INDICE_BASE.DAT') !SALIDA PARA EL
CALCULO DE RANTABILIDAD

READ(1,*)NP
!número de nodos de carga en el sistema

READ(1,*)(PCAR(I),I=1,NP)

READ(1,*)(DEMA(I),I=1,NP)

READ(1,*)NE !nodos totales

DO I=1,NP
READ(1,*)(a(I,J),J=1,NE)
END DO

DO I=1,NP
READ(1,*)(b(I,J),J=1,NE)
END DO

!Se calcula la matriz de indisponibilidad y se describen los índices de cada
punto de carga que se utilizaran para calcular los índices de confiabilidad

DO I=1,NP
DO J=1,NE

C(I,J)=a(I,J)*b(I,J)
U1=U1+a(I,J)
U3=U3+C(I,J)

END DO

U2=U3/U1
!WRITE(8,*)'los indices son:'
WRITE(8,*)U1,U2,U3
WRITE(9,*)U1
WRITE(9,*)U3
U1=0
U2=0
U3=0

END DO

!Se escriben la matrices de tasa de falla, tiempo de reparación e
indisponibilidad

DO i=1,NP
if(i.eq.1)then

```



```

write(7,*)
write(7,*)'la matriz de la tasa de falla es:'
end if
WRITE(7,*)(a(I,J),J=1,NE)
!Escribe la matriz de la tasa de falla
END DO

DO i=1,NP
if(i.eq.1)then
write(7,*)
write(7,*)'la matriz del tiempo de reparación es:'
end if
WRITE(7,*)(b(I,J),J=1,NE)
!Escribe la matriz del tiempo de reparación
END DO

DO i=1,NP
if(i.eq.1)then
write(7,*)
write(7,*)'la matriz de la indisponibilidad es:'
end if
WRITE(7,*)(C(I,J),J=1,NE)
!Escribe la matriz de indisponibilidad
END DO

END

SUBROUTINA LECMAT2
!*****
! Subrutina para calcular los parámetros (tasa de falla, tiempo de
reparación e indisponibilidad) del archivo ICOST.DAT. Para las redes
propuestas.
!*****
DIMENSION A(15,50),B(15,50),C(15,50)
dimension pcar(1000), dema(1000)

OPEN(UNIT=1,FILE='ICOST.DAT')      !ENTRADA DE LAS
MATRICES (TASA DE FALLA Y TIEMPO DE REPARACIÓN)

OPEN(UNIT=7,FILE='MATRIZ.SAL')      !SALIDA DE LAS
MATRICES

OPEN(UNIT=8,FILE='INDICES.SAL')     !SALIDA DE LOS
INDICES

OPEN(UNIT=9,FILE='INDICE_PRO.DAT')  !SALIDA PARA EL
CALCULO DE RANTABILIDAD

READ(1,*)NP
!número de nodos de carga en el sistema

READ(1,*)(PCAR(I),I=1,NP)

READ(1,*)(DEMA(I),I=1,NP)

READ(1,*)NE      !nodos totales
DO I=1,NP

READ(1,*)(a(I,J),J=1,NE)
END DO

DO I=1,NP
READ(1,*)(b(I,J),J=1,NE)
END DO

!Se calcula la matriz de indisponibilidad y se escriben los índices de cada
punto de carga que se utilizaran para calcular los índices de confiabilidad

DO I=1,NP

DO J=1,NE
C(I,J)=a(I,J)*b(I,J)
U1=U1+a(I,J)
U3=U3+C(I,J)

END DO

U2=U3/U1

!WRITE(8,*)'los indices son:'
WRITE(8,*)U1,U2,U3
WRITE(9,*)U1
WRITE(9,*)U3
U1=0
U2=0
U3=0
END DO

!Se escriben la matrices de tasa de falla, tiempo de reparación e
indisponibilidad
DO i=1,NP

if(i.eq.1)then
write(7,*)
write(7,*)'la matriz de la tasa de falla es:'
end if
WRITE(7,*)(a(I,J),J=1,NE)
!Escribe la matriz de la tasa de falla
END DO

DO i=1,NP

if(i.eq.1)then
write(7,*)
write(7,*)'la matriz del tiempo de reparación es:'
end if
WRITE(7,*)(b(I,J),J=1,NE)
!Escribe la matriz del tiempo de reparación
END DO

DO i=1,NP

if(i.eq.1)then
write(7,*)
write(7,*)'la matriz de la indisponibilidad es:'
end if
WRITE(7,*)(C(I,J),J=1,NE)
!Escribe la matriz de indisponibilidad
END DO

END

SUBROUTINA RENTA
!*****
! Subrutina para calcular los índices de confiabilidad ( IAC, DIC, SAIFI,
SAIDI, CAIDI, ASAI, ASUI, jENS, AENS) y la rentabilidad (VPN, RBC
y TIR), jde la red existente y de las redes propuestas.
!*****

!PARA ABRIR ARCHIVO DE SALIDA

REAL VPN1(100), VPN2(100)
INTEGER :: AL, D

OPEN(UNIT=1,FILE='RENTA.SAL')
!ARCHIVO DE SALIDA DEL ESTUDIO DE RENTABILIDAD

OPEN(UNIT=2,FILE='ENTRADA.DAT')      !ARCHIVO DE
ENTRADA
OPEN(UNIT=3,FILE='INDICE_BASE.DAT')
OPEN(UNIT=4,FILE='INDICE_PRO.DAT')

OPEN(UNIT=7,FILE='RBC.SAL')

! WRITE(6,*) 'PROG PARA CALCULAR LOS INDICES DE CONF Y
RENT'
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)'INGRESA LOS DATOS PARA j CALCULAR
LOS INDICES DE RENT'
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)'COSTO DE CUCHILLA j
DESCONECTADORA'
READ(2,*)CCD
! WRITE(6,*)'COSTO DE LINEA (KM) O MANO DE OBRA
IMPREVISTA'
READ(2,*)CLMOI

```





## Apéndice D – Descripción del programa digital



```

!WRITE(6,*)'COSTO POR KW INTERRUPIDO DEL SISTEMA'      ! SE CALCULA IAC Y SAIFI
  READ(2,*)CI
! WRITE(6,*)'COSTO POR KWH'                            SUM1=TF*UC+SUM1
  READ(2,*)CKWH                                       SAIFI=SUM1/NUS
! WRITE(6,*)'TASA DE INTERES'
  READ(2,*)TI

! WRITE(6,*)'NUMERO DE AÑOS'                            !SE CALCULA DIC Y SAIDI
  READ(2,*)AN
                                                    SUM2=DIC*UC+SUM2
                                                    SAIDI=SUM2/NUS

DO D=1,2
                                                    SUM2=DIC*UC+SUM2
                                                    SAIDI=SUM2/NUS

WRITE(1,*)
WRITE(1,*)
WRITE(1,*)
WRITE(1,*)'PARA EL SISTEMA',D
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)'NUMERO DE ALIMENTADORES'
  READ(2,*)AL
                                                    MUL1=NUS*8760
                                                    RES=MUL1-SUM2
                                                    ASAI=RES/MUL1

DO M=1,AL
                                                    !SE CALCULA ASUI
                                                    ASUI=SUM2/MUL1

  WRITE(1,*)
  WRITE(1,*)
  WRITE(1,*)'EN EL ALIMENTADOR',M
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)'KW DEL SISTEMA'
  READ(2,*)CS
!METER DATO CON AÑO.0!
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)'INGRESA LOS DATOS PARA CALCULAR LOS
INDICES DE CONF'
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)
! WRITE(6,*)'CUANTOS PUNTOS DE CARGA?'
  READ(2,*)N
                                                    !SE CALCULA ENS Y AENS
                                                    ENS=CP*DIC+ENS
                                                    AENS=ENS/NUS
!*****
END DO

! SE CALCULA VPN, TIR, RBC
!SE CALCULA LAS PERDIDAS POR INTERRUPCION
PISAIFI=(CI*CS*SAIFI)+PISAIFI
PISAIDI=(CKWH*CS*SAIDI)+PISAIDI

FE=(PISAIFI+PISAIDI)+FE
NUM=FE*(((1+TI)**AN)-1)+NUM
DEN=(TI*((1+TI)**AN))+DEN
VPN=(NUM/DEN)+VPN

IF(D.EQ.1)THEN
  VPN1(M)=VPN
ELSE
  P=(CCD+CLMOI)+P
  VPN2(M)=VPN
  NFE=(VPN1(M)-VPN2(M))+NFE
  NUM2=NFE*(((1+TI)**AN)-1)+NUM2
  NVPN=(NUM2/DEN)+NVPN
  NVPN1=(-P+NVPN)+NVPN1

!PARA CALCULAR RBC
  RBC=(NVPN/P)+RBC

! PARA CALCULAR LA TIR
  TI2=TI
  200 CONTINUE

  do t=1,10
    NUM3=NFE*(((1+TI2)**AN)-1)+NUM3
    DEN3=(TI2*((1+TI2)**AN))+DEN3
    DIV3=(NUM3/DEN3)+DIV3
    VPN3=(-P+DIV3)+VPN3
    VA1=NVPN1
    VA2=ABS(VPN3)
    TIR1=(TI+((VA1/(VA1+VA2))*(TI2-TI)))+TIR1
    PORC=(TIR1*100)+PORC
    NUM4=NFE*(((1+TIR1)**AN)-1)+NUM4
    DEN4=(TIR1*((1+TIR1)**AN))+DEN4
    DIV4=(NUM4/DEN4)+DIV4
    TIR2=(-P+DIV4)+TIR2

    if(TIR2.LE.0)then

```

NUS=UC+NUS

if(TIR2.LE.0)then



## Apéndice D – Descripción del programa digital



```

        goto 150
    else
        T12=T12+0.0000001
!INCREMENTO PARA EL CALCULO DE LA TIR
        NUM3=0
        DEN3=0
        DIV3=0
        VPN3=0
        VA2=0
        TIR1=0
        PORC=0
        NUM4=0
        DEN4=0
        DIV4=0
        TIR2=0
        goto 200
    end if
end do
150  continue
    END IF
! SALIDA
    WRITE(1,*)
    WRITE(1,*)
    WRITE(1,*)'EL IAC ES:'
    WRITE(1,400)SUM1
400  FORMAT(F50.4)
    WRITE(1,*)
    WRITE(1,*)'EL DIC ES:'
    WRITE(1,500)SUM2
500  FORMAT(F50.4)
    WRITE(1,*)
    WRITE(1,*)'EL SAIFI ES:'
    WRITE(1,600)SAIFI
600  FORMAT(F50.4)
    WRITE(1,*)
    WRITE(1,*)'EL SAIDI ES:'
    WRITE(1,700)SAIDI
700  FORMAT(F50.4)
    WRITE(1,*)
    WRITE(1,*)'EL CAIDI O TIU ES:'
    WRITE(1,800)CAIDI
800  FORMAT(F50.4)
    WRITE(1,*)
    WRITE(1,*)'EL ASAI ES:'
    WRITE(1,900)ASAI
900  FORMAT(F50.7)
    WRITE(1,*)
    WRITE(1,*)'EL ASUI ES:'
    WRITE(1,1000)ASUI
1000 FORMAT(F50.7)
    WRITE(1,*)
    WRITE(1,*)'EL ENS ES:'
    WRITE(1,1050)ENS
1050 FORMAT(F50.4)
    WRITE(1,*)
    WRITE(1,*)'EL AENS ES:'
    WRITE(1,1060)AENS
1060 FORMAT(F50.4)
    WRITE(1,*)
    WRITE(1,*)'EL VPN ES,VPN'
    WRITE(1,1200)
1200 FORMAT(F10.4)
    IF(D.EQ.2)THEN
        WRITE(1,*)
        WRITE(1,*)
        WRITE(1,*)
        WRITE(1,*)'DEL ESTUDIO DE RENTABILIDAD
OBTENEMOS:'
        WRITE(1,*)
        WRITE(1,*)
        WRITE(1,*)'EL VPN BENEFICIO ES:',NVPN
        WRITE(1,1210)
1210  FORMAT(F10.4)
        WRITE(1,*)
        WRITE(1,*)'EL VPN ES:',NVPN1
        WRITE(1,1300)
1300  FORMAT(F10.4)
        WRITE(1,*)
        WRITE(1,*)'CON UNA i DE',T12
        WRITE(1,1450)
        FORMAT(F10.4)
        WRITE(1,*)'LA TIR QUE HACE CERO A VPN ES',PORC
        WRITE(1,1451)
        FORMAT(F10.4)
        WRITE(1,*)'DANDO UN VALOR DE',TIR2
        WRITE(1,1452)
        FORMAT(F10.4)
        WRITE(1,*)
        WRITE(1,*)'EL RBC ES',RBC
        WRITE(7,*)RBC
        WRITE(1,1400)
1400  FORMAT(F10.4)
        IF(NVPN1>0)THEN
            WRITE(1,*)
            WRITE(1,*)'POR LO TANTO EL PROYECTO ES
RENTABLE AQUI'
            WRITE(1,1500)
            FORMAT(F10.4)
            ELSE
                WRITE(1,*)
                WRITE(1,*)
                WRITE(1,*)'POR LO TANTO EL PROYECTO AQUI
NO ES RENTABLE'
            WRITE(1,1600)
            FORMAT(F10.4)
            END IF
            END IF
!SE INICIALIZAN LOS VALORES PARA NUEVOS CALCULOS DE
VPN TIR RBC
        PISAIFI=0
        PISAIDI=0
        FE=0
        NUM=0
        DEN=0
        VPN=0
        NFE=0
        P=0
        NUM2=0
        NVPN=0
        NVPN1=0
        NUM3=0
        DEN3=0
        DIV3=0
        VPN3=0
        TIR1=0
        PORC=0
        NUM4=0
        DEN4=0
        DIV4=0
        TIR2=0
        RBC=0
!INICIALIZA LOS INDICES PARA NUEVOS CALCULOS LOS
INDICES DE CONFIABILIDAD
        NUS=0
        SUM1=0
        SUM2=0
        MUL1=0
        RES=0
        SAIFI=0
        SAIDI=0
        CAIDI=0
        ASAI=0
        ASUI=0
        ENS=0
        AENS=0
!*****
        END DO
        END DO
    END

```