

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Sección de Estudios de Posgrado e Investigación

**Restauración de Sistemas
Eléctricos de Potencia
Utilizando Algoritmos
Genéticos**

T E S I S

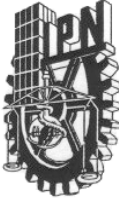
Para Obtener el Grado de:
**Maestro en Ciencias con especialidad
en Ingeniería Eléctrica
Opción Potencia**

P R E S E N T A :
Yamil Aldana Debernardi



México, D.F.

Noviembre 2003



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 13:30 horas del día 11 del mes de Septiembre del 2003 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E. S. I. M. E. para examinar la tesis de grado titulada:

“RESTAURACION DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA UTILIZANDO ALGORITMOS GENETICOS”

Presentada por el alumno:

ALDANA **DEBERNARDI** **YAMIL**
Apellido paterno materno nombre(s)

Con registro:

0	0	1	1	8	5
---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

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

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

DR. DAVID ROMERO ROMERO

DR. DANIEL OLGUIN SALINAS

DR. JOSE A. GOMEZ HERNANDEZ

DR. RAUL VELAZQUEZ SANCHEZ

DR. JAIME ROBLES GARCIA



EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. FLORENCIO SANCHEZ SILVA

SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION

Agradecimientos:

Al **Dr. David Romero Romero**, por su amistad, por los conocimientos transmitidos dentro y fuera del aula de clase, por el apoyo y confianza que siempre depositó en mi persona y mi trabajo, por los consejos recibidos cuando fué necesario, y por su siempre atinada asesoría que fué fundamental para la conclusión de esta Tesis. Con respeto, agradecimiento, y admiración, ¡Muchas Gracias Doctor David!.

Al **Dr. José Alberto Gómez Hernández**, por la amistad y apoyo incondicional, por depositar su confianza en mi persona, por los siempre atinados consejos dentro y fuera del ámbito profesional, y por los conocimientos transmitidos que contribuyeron sustancialmente en el desarrollo de este trabajo, y en Mí como profesionista. Con respeto, agradecimiento, y admiración, ¡Muchas Gracias Doctor José Alberto!.

Al H. Jurado revisor de esta Tesis, integrado por **Dr. Daniel Olguín Salinas**, **Dr. Jaime Robles García**, **Dr. David Romero Romero**, **Dr. José Alberto Gómez Hernández**, **Dr. Raúl Velásquez Sánchez**, y **M. en C. Jesús Reyes García**, por sus atinados consejos, comentarios, y aportaciones que enriquecen y mejoran el trabajo de investigación realizado para esta Tesis. Con respeto y admiración, ¡Muchas Gracias!

Al **Dr. Ricardo Octavio Mota Palomino**, y al **M. en C. Gilberto Enríquez Harper**, por los conocimientos recibidos en el aula de clase, y por la ayuda, disposición, y consejos recibidos fuera de ella. Con respeto y admiración, ¡Muchas Gracias!.

Al **Instituto Politécnico Nacional**, institución que me abrió las puertas para mejorar mi preparación académica y profesional, y por ser estandarte del desarrollo científico y tecnológico del país. ¡Muchas Gracias Politécnico!.

A la **Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del IPN**, por el apoyo recibido brindándome un lugar apropiado y con todas las condiciones posibles para el desarrollo de esta Tesis y de mis estudios para obtener el grado. Y por permitirme participar como ponente en el Tercer Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas. ¡Muchas Gracias ESIME!.

A la **Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME**, y a todo el personal administrativo, por la oportunidad recibida para continuar con mis estudios y preparación académica y profesional, y el apoyo obtenido en todo momento. ¡Muchas Gracias SEPI!.

A todo el personal académico y docente del **Departamento de Ingeniería Eléctrica de la SEPI - ESIME**, y al personal administrativo del mismo, por brindarme la ayuda y el apoyo necesario para la elaboración de esta Tesis, en todo momento que fue requerido. ¡Muchas Gracias a todos!.

Agradecimientos:

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología**, por el apoyo económico y la confianza recibida, que hizo posible la realización de este trabajo de investigación y la conclusión de mis estudios de Posgrado. ¡Muchas Gracias!.

A la **Comisión de Operación y Fomento de Actividades Académicas del IPN**, por el apoyo económico recibido para la realización y conclusión de este trabajo de investigación.

Al **Gobierno del Estado de Veracruz**, por la ayuda económica recibida, y por fomentar la educación en nuestro Estado.

Al **Institute of Electrical and Electronics Engineers sección México**, por las facilidades otorgadas para complementar mi investigación, y por permitirme participar como ponente en la 16ª Reunión de Verano de Potencia y Aplicaciones Industriales.

Muy, pero muy especialmente, a Ti **Alicia Vega**, alguien muy especial en mi vida. Por tu cariño, amor, confianza, y comprensión. Por ser mi mejor amiga y compañera, y porque cuento contigo cuando más te necesito. ¡Muchas Gracias Burrita!.

A quienes me brindaron su amistad, ayuda, y grata compañía, antes y durante el Posgrado. Muy especialmente a los oxxes, **Hugo Ruiz Rosas, Rubén Arcos Hernández, y Manlio Al Altamirano González**. ¡Muchas Gracias cabr...!.

A todos mis compañeros estudiantes, docentes, y maestros de la Sección de Graduados, sin omitir a ninguno. Especialmente por su ayuda y amistad a **Yazmín Villagrán V., Edgar Maya P., José Antonio Castillo J., Fabián García P., y Ernesto Meléndez M.** También quiero mencionar a compañeros de la sección de los que llevo buenos recuerdos y agradecimientos por su grata compañía y plática, como **Jorge Landa, Rogelio Díaz, Sergio Barusch, Gabriel Mendoza, Ismael González, Juan Carlos Ramírez, Joel Morantes, Armando Morales, Alfredo Reyes, Alberto Rosario, Norberto Posada, Alfonso, Dolores, Mungai, Cesar Romeo, Uriel, Pedro**, y demás compañeros. A todos, ¡Muchas Gracias!.

A la **Sra. Antonia Benavides y Familia**, y a **Georgina** y a **Su Mami**. A todos ellos por su amistad y calidez. ¡Muchas Gracias!

Dedicatorias:

A Dios:

A quien le debo la vida y lo que soy. Por todas las bendiciones concedidas, por la familia, por el conocimiento recibido, por lo aprendido hasta ahora, por las experiencias vividas desde siempre, porque nunca me he quedado solo, por la oportunidad de haber llegado hasta aquí y de poder terminar lo que comencé. Por todas las oportunidades recibidas, este humilde trabajo es dedicado a Dios.

A Mi Querida Madre, Peregrina:

Por ser la persona más importante en mi vida. Por el amor, cariño, ejemplo, esfuerzo, y apoyo incondicional que he recibido de Ti. No habría sido posible llegar hasta aquí sin tu apoyo. Y por eso te dedico este logro con todo mi cariño, respeto, admiración y agradecimiento. TQM.

A Mi Querida Familia, Debernardi Marini:

A mi Abuelita: Elena†.

A mis Tíos: Dochita, José Luis Venegas, Pablo†, Lino, Judith Corona, Carlos†, Francisco, Aloiza, Reyna, Rafa Domínguez, Pedro, y Siria. A todos ellos les dedico este trabajo por su cariño y amor.

A mis Primos: Lino, Talía, Helen, Tony, Billy, Luis Humberto, Daniela, Reinita, Rafita, Jaziel, Frank, Aloiza, y Carolina. Con todo mi cariño para cada uno de ustedes.

RESUMEN

En este trabajo se desarrolló una herramienta en la restauración de sistemas eléctricos de potencia en estado estacionario. La herramienta propuesta se basa en la técnica de optimización inteligente de los *Algoritmos Genéticos*, que son algoritmos de búsqueda estocástica basados en los mecanismos de selección y naturaleza genética.

En el estado operativo de restauración, se tienen restricciones y límites que no se presentan durante un estado normal de operación. El operador encargado del sistema de potencia requiere de herramientas computacionales útiles con las que pueda interactuar para simular el comportamiento del sistema en un estado restaurativo.

Como problema de optimización, el estado restaurativo se plantea como un problema del tipo no lineal, combinatorial, entero, multietapa, y con restricciones. Los algoritmos genéticos representan una técnica robusta que resuelve este tipo de problemas, y busca una solución óptima dentro de un complejo espacio de búsqueda.

Para simular el proceso restaurativo, se requieren tres tipos de estudios; un modelo en estado estacionario, un modelo para pequeños disturbios, y un modelo para grandes disturbios. Este trabajo se enfoca en el modelo en estado estacionario, que es un modelo con alta disponibilidad como herramienta interactiva de computación.

Para validar la herramienta propuesta, se realizaron pruebas sobre tres distintos sistemas, de 5, 14 y 28 nodos respectivamente. Se comparó con una técnica heurística convencional para obtener una secuencia de restauración y comparar los resultados obtenidos. De dichas pruebas se concluyó que con el algoritmo genético se decide una secuencia de restauración óptima, conservando las condiciones de operación y seguridad del sistema, con un tiempo de cómputo mucho menor que de la forma heurística.

ABSTRACT

In this work an auxiliary tool in the restoration of electrical systems of power in stationary state was developed. The propose tool is based on the intelligent optimization technique of *the Genetic Algorithms* which are algorithms of stochastic search based on selection mechanisms and natural genetic.

In the operative state of restoration, there are restrictions and limits that are not presented during a normal operation. The operator in charge of power system requires of powerful computer tools which he can interact to simulate the behavior of the power system in the restorative state.

Genetic Algorithms represent a technique that looks for an optimal solution within a complex space search. The restorative state is thought as a non-linear, combinatorial, multiobjective, and with restrictions optimization problem. Due to their robustness, the genetic algorithms adapt to the solution in this type of problems.

In order to simulate the restorative process, three types of studies are required; a model in steady state, a model for small disturbances, and a model for great disturbances. This work focuses in the model in steady state, that represent a model with high availability as an interactive tool of computation.

In order to validate the proposed tool, some tests were made on systems of 5, 14 and 28 nodes respectively. It was compared with a conventional heuristic technique to obtain a restoration sequence, and to compare the obtained results. As conclusion, the genetic algorithm aid to decide an optimal sequence of restoration for test systems, maintaining the limits of security and operation within their limits, without tedious calculations and with a much smaller computing time than that of conventional way.

INDICE GENERAL

Resumen.....	i
Índice General.....	iii
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Figuras.....	x
Nomenclatura y Siglas.....	xi

Capítulo 1

Introducción

1.1 Objetivo.....	1
1.2 Justificación.....	1
1.3 Estado del Arte.....	2
1.3.1. Introducción.....	2
1.3.2. Antecedentes.....	7
1.3.3. Ventajas que se presentan utilizando <i>Algoritmos Genéticos</i>	8
1.3.4. Implementación del <i>Algoritmo Genético</i> en la <i>Restauración de Sistemas Eléctricos de Potencia en estado estacionario</i>	9
1.4 Estructura de la tesis.....	10

Capítulo 2

Restauración de Sistemas Eléctricos de Potencia

2.1 Introducción.....	12
2.2 Secuencia de Restauración.....	17
2.2.1. Inicio de la Restauración.....	17
2.2.2. Preparación de las Fuentes Iniciales.....	17
2.2.3. Preparación de la Vía de Restauración.....	18
2.2.4. Reconstruyendo un Subsistema Estable.....	18
2.2.5. Aislamiento del Subsistema dentro del <i>Sistema Eléctrico de Potencia</i>	19
2.2.6. Enlazando la Isla con el Subsistema Adyacente.....	19
2.2.7. Restaurando la Carga Fuera de Servicio.....	19
2.2.8. Después de la Restauración.....	20
2.2.9. Secuencia Óptima de Reinicio de las Unidades de Generación.....	21
2.3 Planeación de la Restauración de <i>Sistemas Eléctricos de Potencia</i>	24
2.4 Objetivos en la Restauración de <i>Sistemas Eléctricos de Potencia</i>	31
2.5 Características en el Proceso de <i>Restauración de Sistemas Eléctricos de Potencia</i>	33
2.5.1. Balance de Potencia Reactiva.....	34
2.5.2. Balance entre Generación y Carga.....	36
2.5.3. Coordinación de Generación y Carga.....	36
2.5.4. Monitoreo y Control.....	37
2.5.5. Modelo en Estado Estacionario.....	37

2.5.6. Tiro de Carga.....	38
2.5.7. Voltajes Transitorios.....	38
2.6 Herramientas Analíticas de Restauración.....	39
2.7 Aplicación de Sistemas Expertos para <i>Restauración de Sistemas Eléctricos de Potencia</i>	43
2.8 Modelo Matemático de <i>Restauración de Sistemas Eléctricos de Potencia</i>	46

Capítulo 3

Implementación de un Algoritmo Genético en la Restauración de Sistemas Eléctricos de Potencia

3.1 Introducción.	48
3.2 Optimización del Proceso Restaurativo en el Estado Estacionario.....	49
3.2.1 Ecuaciones de Flujos de Potencia.....	51
3.2.2 Restricciones de Operación.....	52
3.2.3 Función Objetivo.....	52
3.3 Variables de Control para el <i>Algoritmo Genético</i>	53
3.4 Función de Habilidad.	55
3.5 Representación del <i>Algoritmo Genético</i>	56
3.5.1 Población inicial.....	56
3.5.2 Operadores Genéticos.....	57
3.5.2.1 Selección.....	57
3.5.2.2 Cruzamiento.....	57
3.5.2.3 Mutación.....	58
3.5.3 Parámetros del Algoritmo Genético.....	58
3.6 Algoritmo para <i>Restauración de Sistemas Eléctricos de Potencia</i> utilizando un <i>Algoritmo Genético</i>	59

Capítulo 4

Pruebas y Resultados

4.1 Introducción.	62
4.2 Análisis de Restauración de Manera Heurística.	65
4.2.1. Red de prueba de 5 nodos.	65
4.2.2. Red de prueba de 14 nodos.	76
4.2.3. Red de prueba de 28 nodos.	88
4.3 Descripción de Resultados Utilizando un Algoritmo Genético.	94
4.3.1. Red de prueba de 5 nodos.	95
4.3.2. Red de prueba de 14 nodos.	99
4.3.3. Red de prueba de 28 nodos.	107
4.4 Variación de los Parámetros del Algoritmo Genético.	112
4.4.1. Red de prueba de 5 nodos.	113
4.4.1.1. Variando el Porcentaje de Cruce.	113
4.4.1.2. Variando el Porcentaje de Mutación.	114
4.4.1.3. Variando la Constante de Sintonización.	114
4.4.2. Red de prueba de 14 nodos.	115
4.4.2.1. Variando el Porcentaje de Cruce.	115

4.4.2.2. Variando el Porcentaje de Mutación.	115
4.4.3. Red de prueba de 28 nodos.	116
4.4.3.1. Variando la Constante de Sintonización.	116
Capítulo 5	
Conclusiones, Recomendaciones y Aportaciones	
5.1 Conclusiones.	117
5.2 Recomendaciones.....	118
5.3 Aportaciones.....	119
5.4 Trabajos Futuros.....	119
Referencias.	121
Apéndice A	
Algoritmos Genéticos	
A.1 Introducción.	125
A.2 Ventaja de los Algoritmos Genéticos sobre los Métodos Convencionales.	126
A.3 Algoritmo Genético Simple.	127
Apéndice B	
Despacho de Potencia Activa	
B.1 Introducción.	138
B.2 Formulación del Problema en Potencia Activa.	139
B.3 Coeficientes de Sensitividad del Modelo de Potencia Activa.	141
Apéndice C	
Método de Newton – Raphson para Flujos de Potencia	
C.1 Introducción.	143
C.2 Modelo Matemático en Forma Polar.	144
Apéndice D	
Datos de las Redes de Prueba	
D.1 Introducción.	149
D.2 Red de prueba de 5 nodos.	149
D.3 Red de prueba de 14 nodos.	150
D.4 Red de prueba de 28 nodos.	152
Apéndice E	
Descripción del Programa Digital.	
E.1 Introducción.	155
E.2 Descripción del Programa Principal y las Subrutinas.	155
E.2.1. Programa Fuente.	158
E.3 Descripción del Archivo de Salida.	170

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Descripción	Pag.
2.1	Clasificación de generación y carga reactiva, positiva y negativa.	35
4.1	Magnitudes nodales para la primera etapa de restauración de la red de prueba de 5 nodos restaurando la línea L – 1.	67
4.2	Magnitudes nodales para la primera etapa de restauración de la red de prueba de 5 nodos restaurando la línea L - 2.	68
4.3	Flujos en las líneas de transmisión en la primera etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 5 nodos.	68
4.4	Magnitudes nodales en la segunda etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 5 nodos.	69
4.5	Flujos en las líneas de transmisión en la segunda etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 5 nodos.	70
4.6	Magnitudes nodales en la tercera etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 5 nodos.	70
4.7	Flujos en las líneas de transmisión en la tercera etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 5 nodos.	70
4.8	Magnitudes nodales en la cuarta etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 5 nodos.	72
4.9	Flujos en las líneas de transmisión en la cuarta etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 5 nodos.	72
4.10	Magnitudes nodales en la quinta etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 5 nodos.	73
4.11	Flujos en las líneas de transmisión en la quinta etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 5 nodos.	73
4.12	Magnitudes nodales en la sexta etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 5 nodos.	74
4.13	Flujos en las líneas de transmisión en la sexta etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 5 nodos.	75
4.14	Magnitudes nodales en la última etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 5 nodos.	75
4.15	Flujos en las líneas de transmisión en la última etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 5 nodos.	76
4.16	Magnitudes nodales en la etapa post-disturbio del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 14 nodos.	78
4.17	Flujos en las líneas de transmisión en la etapa post-disturbio del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 14 nodos.	79
4.18	Magnitudes nodales en la primera etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 14 nodos.	79
4.19	Flujos en las líneas de transmisión en la primera etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 14 nodos.	80

4.20	Magnitudes nodales en la segunda etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 14 nodos.	80
4.21	Flujos en las líneas de transmisión en la segunda etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 14 nodos.	81
4.22	Magnitudes nodales en la tercera etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 14 nodos.	81
4.23	Flujos en las líneas de transmisión en la tercera etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 14 nodos.	82
4.24	Magnitudes nodales en la cuarta etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 14 nodos.	82
4.25	Flujos en las líneas de transmisión en la cuarta etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 14 nodos.	83
4.26	Magnitudes nodales en la quinta etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 14 nodos.	83
4.27	Flujos en las líneas de transmisión en la quinta etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 14 nodos.	84
4.28	Magnitudes nodales en la sexta etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 14 nodos.	84
4.29	Flujos en las líneas de transmisión en la sexta etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 14 nodos.	85
4.30	Magnitudes nodales en la séptima etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 14 nodos.	86
4.31	Flujos en las líneas de transmisión en la séptima etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 14 nodos.	86
4.32	Magnitudes nodales en la última etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 14 nodos.	87
4.33	Flujos en las líneas de transmisión en la última etapa del análisis de restauración convencional para la red de prueba de 14 nodos.	87
4.34	Magnitudes nodales en la primera etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 28 nodos.	89
4.35	Magnitudes nodales en la segunda etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 28 nodos.	90
4.36	Magnitudes nodales en la tercera etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 28 nodos.	91
4.37	Magnitudes nodales en la cuarta etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 28 nodos.	92
4.38	Magnitudes nodales en la quinta etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 28 nodos.	92
4.39	Magnitudes nodales en la última etapa del análisis de restauración convencional en la red de prueba de 28 nodos.	93
4.40	Magnitudes nodales en la primera etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 5 nodos.	95
4.41	Flujos en las líneas de transmisión para la primera etapa utilizando AG. Red de 5 nodos	95
4.42	Magnitudes nodales en la segunda etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 5 nodos.	96

4.43	Flujos en las líneas de transmisión para la segunda etapa utilizando AG. Red de 5 nodos	96
4.44	Magnitudes nodales en la tercera etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 5 nodos.	96
4.45	Flujos en las líneas de transmisión para la tercera etapa utilizando AG. Red de 5 nodos	96
4.46	Magnitudes nodales en la cuarta etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 5 nodos.	97
4.47	Flujos en las líneas de transmisión para la cuarta etapa utilizando AG. Red de 5 nodos	97
4.48	Magnitudes nodales en la quinta etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 5 nodos.	97
4.49	Flujos en las líneas de transmisión para la quinta etapa utilizando AG. Red de 5 nodos	97
4.50	Magnitudes nodales en la sexta etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 5 nodos.	98
4.51	Flujos en las líneas de transmisión para la sexta etapa utilizando AG. Red de 5 nodos	98
4.52	Magnitudes nodales en la última etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 5 nodos.	98
4.53	Evaluación de la función objetivo comparando la forma de restauración convencional con el uso de un <i>AG</i> simple para la red de prueba de 5 nodos.	99
4.54	Magnitudes nodales en la primera etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 14 nodos.	100
4.55	Flujos en las líneas de transmisión para la primera etapa utilizando AG. Red de 14 nodos	100
4.56	Magnitudes nodales en la segunda etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 14 nodos.	100
4.57	Flujos en las líneas de transmisión para la segunda etapa utilizando AG. Red de 14 nodos	101
4.58	Magnitudes nodales en la tercera etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 14 nodos.	101
4.59	Flujos en las líneas de transmisión para la tercera etapa utilizando AG. Red de 14 nodos	101
4.60	Magnitudes nodales en la cuarta etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 14 nodos.	102
4.61	Flujos en las líneas de transmisión para la cuarta etapa utilizando AG. Red de 14 nodos	102
4.62	Magnitudes nodales en la quinta etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 14 nodos.	103
4.63	Flujos en las líneas de transmisión para la quinta etapa utilizando AG. Red de 14 nodos	103
4.64	Magnitudes nodales en la sexta etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 14 nodos.	104
4.65	Flujos en las líneas de transmisión para la sexta etapa utilizando AG. Red de 14 nodos	104

4.66	Magnitudes nodales en la séptima etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 14 nodos.	104
4.67	Flujos en las líneas de transmisión para la etapa siete utilizando AG. Red de 14 nodos	105
4.68	Magnitudes nodales en la última etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 14 nodos.	105
4.69	Flujos en las líneas de transmisión para la última etapa utilizando AG. Red de 14 nodos	106
4.70	Evaluación de la función objetivo comparando la forma de restauración convencional con el uso de un <i>AG</i> simple para la red de prueba de 14 nodos.	107
4.71	Magnitudes nodales en la primera etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 28 nodos.	107
4.72	Magnitudes nodales en la segunda etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 28 nodos.	108
4.73	Magnitudes nodales en la tercera etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 28 nodos.	109
4.74	Magnitudes nodales en la cuarta etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 28 nodos.	110
4.75	Magnitudes nodales en la quinta etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 28 nodos.	110
4.76	Magnitudes nodales en la última etapa del análisis de restauración utilizando un algoritmo genético simple en la red de prueba de 28 nodos.	111
4.77	Evaluación de la función objetivo comparando la forma de restauración convencional con el uso de un <i>AG</i> simple para la red de prueba de 28 nodos.	112
4.78	Tabla comparativa variando el porcentaje de cruce para la red de 5 nodos.	113
4.79	Tabla comparativa variando el porcentaje de mutación. Red de 5 nodos.	114
4.80	Tabla comparativa variando la constante de sintonización para la red de prueba de 5 nodos.	114
4.81	Tabla comparativa variando el porcentaje de cruce para la red de 14 nodos.	114
4.82	Tabla comparativa variando el porcentaje de mutación para la red 14 nodos.	114
4.83	Tabla comparativa variando la constante de sintonización para la red de prueba de 28 nodos.	116
A.1	Cadenas de bits para el ejemplo mostrado y sus valores de idoneidad.	133
A.2	Resultados para un problema resuelto a mano con un algoritmo genético.	134
A.3	Cadenas de solución para el ejemplo resuelto a mano con un <i>AG</i> simple.	135
A.4	Mejores cadenas de solución para una probabilidad de mutación de 0.1 para el ejemplo resuelto con un algoritmo genético simple.	136
D.1	Datos en nodos para la red de prueba de 5 nodos.	149
D.2	Datos de generación en la red de prueba de 5 nodos.	149
D.3	Datos en líneas de transmisión para la red de 5 nodos.	150
D.4	Datos en nodos para la red de prueba de 14 nodos.	150
D.5	Datos de generación para la red de prueba de 14 nodos.	151
D.6	Datos en líneas de transmisión para la red de prueba de 14 nodos.	151
D.7	Datos en nodos para la red de prueba de 28 nodos.	152
D.8	Datos de generación para la red de prueba de 28 nodos.	153
D.9	Datos en líneas de transmisión para la red de prueba de 28 nodos.	153

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Pag.
1.1	Esquema de restauración de <i>SEP's</i> con ayuda de procesadores digitales.	5
1.2	Esquema de restauración cooperativa de <i>SEP's</i> .	5
1.3	Esquema que muestra las tres funciones básicas de restauración	7
2.1	Estados de operación de un <i>Sistema Eléctrico de Potencia</i> .	13
2.2a	Diagrama de flujo que muestra una secuencia convencional de restauración de sistemas eléctricos de potencia (<i>primera parte</i>).	23
2.2b	Diagrama de flujo que muestra una secuencia convencional de restauración de sistemas eléctricos de potencia (<i>segunda parte</i>).	24
3.1	Representación de las variables de control del algoritmo genético simple mediante una cadena de bits.	56
3.2	Esquema que muestra la mutación en una cadena de bits.	58
3.3	Diagrama de flujo de un <i>AG</i> implementado al análisis de la restauración de <i>SEP's</i> en estado estacionario.	61
4.1	Diagrama unifilar de la red de prueba de 5 nodos.	66
4.2	Configuración de la red de 5 nodos después de la segunda etapa del análisis de restauración convencional.	69
4.3	Configuración de la red de 5 nodos después de la tercera etapa del análisis de restauración convencional.	71
4.4	Configuración de la red de 5 nodos después de la cuarta etapa del análisis de restauración convencional.	73
4.5	Configuración de la red de 5 nodos después de la quinta etapa del análisis de restauración convencional.	74
4.6	Configuración de la red de 5 nodos después de la sexta etapa del análisis de restauración convencional.	76
4.7	Diagrama unifilar de la red de prueba de 14 nodos.	77
4.8	Diagrama unifilar de la red de prueba de 14 nodos en la etapa post-disturbio	77
4.9	Diagrama unifilar de la red de prueba de 28 nodos.	88
4.10	Diagrama unifilar de la red de prueba de 28 nodos en la etapa post-disturbio	88
A.1	Diagrama de flujo de un algoritmo genético simple.	128
A.2	Asignación de selección mediante una rueda de ruleta con tamaños de aberturas de acuerdo al valor de la función objetivo en cada cadena.	130
A.3	Esquema para mostrar el cruce a dos puntos entre dos cadenas de bits.	130
A.4	Esquema para mostrar la mutación en una cadena de bits.	131
A.5	Ejemplo de optimización de la función $f(x)=x^2$ en el intervalo $[0, 31]$.	132
A.6	Asignación de reproducción mediante una rueda de ruleta con tamaños de aberturas de acuerdo a la idoneidad de cada cadena.	133

NOMENCLATURA Y SIGLAS

- A = Constante de sintonización (Ecuación 3.7)
- AEE = Análisis en Estado Estacionario
- AG = Algoritmo Genético
- $AG's$ = Algoritmos Genéticos
- ANG** = Magnitud del ángulo de fase
- B = Conjunto de ramas factibles (Ecuación 2.4)
- B** = Susceptancia de un elemento compensador en derivación en p.u.
(Apéndice D)
- DPA = Despacho de Potencia Activa
- DV_i = Factor ó índice de comportamiento en la etapa i de restauración (Ecuación 4.1)
- FH = Función de Habilidad
- F_i = Conjunto de líneas con origen en el nodo i (Ecuación 2.3)
- FO = Función Objetivo
- FP = Flujo de Potencia
- $FP's$ = Flujos de Potencia
- F_q = Conjunto de líneas con nodo de inicio q (Ecuación 2.2)
- Gen = Número de nodos de generación (Ecuación 3.6)
- G_q = Potencia de restauración del nodo energizado q en MW(Ecuación 2.2)
- HA = Herramientas Analíticas
- IEEE = Institute of Electrical and Electronics Engineers
- $IMSL$ = Internal Mathematical Statistical Libraries
- K = Número decimal entre 0 y 1 (Ecuación 3.8)
- L_i = Carga en el nodo i en MW(Ecuación 2.3)
- Lin** = Número de la línea de transmisión (Capítulo 4)
- Lim** = Límite máximo de flujo de potencia en las líneas de transmisión en MW
- L_k = Carga en el nodo k en MW(Ecuación 2.1)
- M = Número de etapas en la secuencia de restauración. (Ecuación 3.4)

- N = Conjunto de nodos en el sistema (Ecuación 2.3 y Ecuación 2.5)
 N_D = Número de nodos participantes (Ecuación 3.7 y ecuación 4.2)
ND = Número de nodo (Capítulo 4)
NE = Nodo de entrada de flujo de potencia (Capítulo 4)
 N_i = Número de nodos en la etapa i (Ecuación 3.4)
No. Lin = Número de Línea
No. Nodo = Número de nodo
NS = Nodo de salida de flujo de potencia (Capítulo 4)
P = Flujo de potencia real en la línea de transmisión en MW (Capítulo 4)
PC = Potencia real de demanda en MW (Capítulo 4)
 P_c = Probabilidad ó Porcentaje de cruce
 P_e = Flujo de potencia sobre la rama e en MW(Ecuación 2.2)
PG = Potencia real de generación en MW (Capítulo 4)
 P_k = Flujo de potencia sobre la rama k en MW(Ecuación 2.3 y Ecuación 2.4)
 P_m = Probabilidad ó Porcentaje de mutación
P_{max} = Límite de potencia real máxima de generación en MW
Q = Flujo de potencia reactiva en la línea de transmisión en MVAr (Capítulo 4)
QC = Potencia reactiva de demanda en MVAr (Capítulo 4)
QG = Potencia reactiva de generación en MVAr (Capítulo 4)
Q_{max} = Límite de potencia reactiva máxima de generación en MVAr
Q_{min} = Límite de potencia reactiva mínima de generación en MVAr
R = Resistencia en la línea de transmisión en p.u.
 R = Conjunto de cargas desenergizadas (Ecuación 2.1)
RSEP = Restauración de Sistemas Eléctricos de Potencia
 S = Conjunto de nodos que pueden ser seleccionados al área desenergizada (Ecuación 2.2)
SCADA = Supervisory Control and Data Acquisition
SCE = Sistemas de Control de la Energía
SEP = Sistema Eléctrico de Potencia
SEP's = Sistemas Eléctricos de Potencia

- SME** = Sistemas de Manejo de la Energía
- TAP** = Relación de transformación en p.u.
- T_i = Conjunto de líneas que inciden en el nodo i (Ecuación 2.3 y Ecuación 2.5)
- Tipo** = Tipo de nodo; 1 = de Generación; 2 = de Carga; 3 = Condensador síncrono
- U_k = Variables controlables en la etapa k (Ecuación 3.1 y ecuación 3.2)
- UL_k = Capacidad en la rama k en MW(Ecuación 2.4)
- V** = Magnitud de voltaje nodal en p.u. (Capítulo 4)
- V = Variable que contiene la información de magnitud de voltaje en p.u. (Ecuación 3.6)
- V_i = Magnitud de voltaje en el nodo participante i (Ecuación 3.7, 3.8, y 4.2)
- V_i^{min} = Límite mínimo de magnitud de voltaje en el nodo participante i (Ecuación 3.8)
- V_i^{max} = Límite máximo de magnitud de voltaje en el nodo participante i (Ecuación 3.8)
- V_{ij} = Magnitud de voltaje para el bus j en la etapa i (Ecuación 3.3)
- V_{kj} = Magnitud de voltaje para el bus j en la etapa $k = i + 1$. (Ecuación 3.3)
- V_{max}** = Magnitud de voltaje nodal máximo permisible en p.u.
- V_{min}** = Magnitud de voltaje nodal mínimo permisible en p.u.
- V_{REF} = Voltaje de referencia ó del perfil prescrito en p.u.(Ecuación 3.4 y ecuación 4.2)
- W_i = Factor de peso nodal en el nodo i (Ecuación 4.2)
- W_{ij} = Factor de peso para el bus j en la etapa i (Ecuación 3.5)
- X** = Reactancia de la línea de transmisión en p.u.
- x_e = Variable de decisión en la línea e si es que está en la vía de restauración (Ecuación 2.2)
- x_k = Número total de ramas que inciden en el nodo k (Ecuación 2.5)
- X_k = Variables dependientes en la etapa k (Ecuación 3.1 y ecuación 3.2)
- YD** = Admitancia de la línea de transmisión en p.u.
- y_i = Variable de decisión que expresa su estado (Ecuación 2.3)
- y_k = Variable de decisión que expresa su estado (Ecuación 2.1)

CAPITULO 1

Introducción

1.1 Objetivo

Analizar la factibilidad de los *Algoritmos Genéticos (AG's)* en la *Restauración de Sistemas Eléctricos de Potencia (RSEP)* en estado estacionario como alternativa eficaz para facilitar, agilizar y mejorar el análisis del proceso restaurativo al ingeniero encargado del *SEP*. Se busca alcanzar este objetivo mediante el desarrollo de una herramienta útil en el proceso restaurativo. Se propone optimizar la solución en estado estacionario con *AG's* que son técnicas de búsqueda estocástica basadas en los mecanismos de selección y naturaleza genética, capaces de aplicarse a problemas del tipo no lineal, combinatorial, multiobjetivo, y con restricciones.

1.2 Justificación

En el *SEP* se pueden presentar colapsos y paros totales del sistema debido a contingencias naturales que provocan que se violen las restricciones de seguridad en el mismo. Por lo tanto, se requiere de la inmediata transferencia de potencia a través del sistema para atender la demanda de energía a los centros de consumo, manteniendo los límites de seguridad dentro de los límites aceptables, evitando así, posibles contingencias mayores y daño de equipos, conservando la seguridad del sistema, todo esto, en el menor tiempo posible. Por lo tanto, el ingeniero de planeación y operación requiere una grán cantidad de cálculos para la toma de decisiones. Esto hace que la búsqueda de soluciones óptimas sea complicada para los algoritmos de programación matemática convencionales ya existentes, donde la aplicación de técnicas poderosas como los *AG's*, arrojan soluciones prometedoras y óptimas.

En un reporte acerca de los problemas de operación de *SEP's*, se ha observado que la aproximación convencional para la *RSEP* no es del todo confiable. Por esto, un método

alternativo debe ser desarrollado para asistir a los despachadores en el bosquejo de los planes de *RSEP*. Debido a que la restauración del servicio es un control de emergencia en los *SME* de los *SEP* con el fin de restaurar las áreas fuera de servicio tan pronto como sea posible, se requiere de cálculos rápidos y soluciones de alta calidad para la satisfacción plena de los consumidores [1].

1.3 Estado del arte

1.3.1 Introducción

Publicados por primera vez por John Holland en 1962, los *AG's* son algoritmos de búsqueda basados en la mecánica de la selección natural y naturaleza genética. La técnica de los *AG's* es una técnica de optimización inteligente y robusta que permite obtener una solución óptima global dentro de un espacio complejo de búsqueda, y constituye una herramienta poderosa para la solución de problemas de optimización del tipo no lineal, entero, combinatorial, multiobjetivo y con restricciones. Estos combinan la supervivencia de los individuos más aptos (basándose en una *Función de Habilidad*) entre cadenas de estructuras con un intercambio de información aleatorio para formar un algoritmo de búsqueda. A partir de una población de "*cromosomas*" (cadenas de 1 y 0, o bits) generadas aleatoriamente, se crea una nueva población usando un mecanismo de selección natural junto con los operadores genéticos de cruzamiento y mutación. Cada cromosoma consiste de "*genes*" (bits). Cada *gen* es una instancia de un particular "*alelo*" (0 ó 1) [2, 3, 4].

Por otra parte, en los *SEP*, el estado restaurativo forma parte de uno de los cinco estados de operación de los *SEP's* (mas detalles en la sección 2.1). El sistema cae dentro de un *Estado Restaurativo*, si algunas cargas han sido desconectadas, es decir, que hay una interrupción en el servicio de energía eléctrica y se deja de satisfacer la demanda de los consumidores. Dentro de esta etapa, se tiene un problema de restauración del servicio, el cual es visto como un problema de control y una decisión compleja para el operador del *SEP*. El problema puede ser visto conceptualmente como un problema de optimización del tipo no lineal, entero, combinatorial, multiobjetivo, y con restricciones. El objetivo del

control restaurativo es restaurar rápidamente el servicio a todos los consumidores, minimizando el tiempo de restauración y maximizando la restauración de la carga demandada. Puede formularse como un problema de optimización para dividir el área desenergizada, de tal manera que pueda ser suministrada de energía por cada una de las fuentes de energía ó centrales generadoras de energía eléctrica, de algún *SEP* en estudio [1, 5, 6, 7, 8, 9].

Visto como un problema de optimización, se tienen las siguientes restricciones [10, 11]:

1. Restricciones de *FP*. (Balance de potencia activa y reactiva, balance entre generación y carga, límite de flujo en las líneas y límites de voltaje)
2. Restricciones de Estabilidad. (Estabilidad a grandes y pequeños disturbios, estabilidad de la respuesta del sistema, consideraciones de sincronización y frecuencia)
3. Restricciones en el reinicio de los generadores. (Arranque en frío ó en caliente)
4. Restricciones en la capacidad de los generadores de cubrir determinada demanda de carga.
5. Restricciones en la secuencia de apertura de líneas e interruptores.

Las variables de control en el problema son el plan de generación y la secuencia de apertura de líneas. El operador del sistema debe decidir durante la restauración basándose en su experiencia y conocimiento de [1]:

- Estado general del sistema.
- Disponibilidad de alternativas viables.
- Consecuencias de cada alternativa.

Los *SME* son la interfase entre el operador del sistema y el *SEP*. La capacidad del *SME* está enfocada al uso del *AEE* de *SEP* mediante flujos de carga. La configuración de la red, y las restricciones de *FP* son representadas directamente en el modelo de flujo de carga. Las restricciones de estabilidad y las restricciones de reinicio del generador y

demanda de carga, están dentro de las restricciones de *FP*. El programa de *FP's* es usado para revisar la factibilidad de los pasos intermedios en el plan de restauración, y como enlace para otras *HA* (para mas detalles ver la sección 2.6) [1].

Por otra parte, debido al continuo crecimiento en el tamaño y complejidad de los *SEP's*, el aumento en el tiempo requerido para restaurar la energía eléctrica a los consumidores afectados después de haber pasado por una etapa de extrema emergencia es inaceptable debido a las costosas pérdidas económicas que como consecuencia esto arroja. Generalmente, la restauración se realiza paso a paso, y la mayor parte en forma manual por los operadores del *SEP*, y con base en las guías establecidas y procedimientos de operación predeterminados. Como se mencionará a continuación, se requiere de programación con técnicas poderosas de optimización, para mejorar el análisis de la restauración del *SEP* [9].

Debido a la necesidad de restaurar un sistema en el menor tiempo posible, los operadores de un *SCE* están sometidos a mucha presión durante el estado restaurativo, por lo que se requiere crear planes eficaces de restauración, esquemas de entrenamiento y simulaciones dentro y fuera de línea con el fin de obtener un conocimiento preciso del sistema, y tener una mejor respuesta en caso de que se requiera una secuencia de restauración [1, 11].

La coordinación y organización del proceso restaurativo están determinadas por la eficacia en el proceso de restauración y su velocidad de progreso. Básicamente lo que determina por principio esta organización es el papel relativo que juegan los operadores de los *SEP's* y los sistemas digitales ó computadoras. La sofisticación en los análisis y programas computacionales, incluyendo aquellos derivados de la inteligencia artificial, mejoran significativamente los resultados de los cálculos en comparación a aquellos obtenidos por el operador. Por lo tanto, generalmente se escoge una opción de tres diferentes criterios de organización básicos, y son los siguientes [9]:

1. *Restauración automatizada*. El operador juega un papel de observador ó supervisor.

Esta opción ha presentado una dudosa factibilidad hasta la fecha para ser aplicada,

debido al excesivo consumo de tiempo (aún con sistemas expertos) que le lleva a la computadora tomar las decisiones.

2. *Restauración con la ayuda de procesadores digitales.* Esto representa en varias formas el estado del arte. El operador toma la responsabilidad de restaurar paso a paso y toma el control hasta el final. Toma sus decisiones con la ayuda de programas de cómputo interactivos, los cuales él puede consultar. También toma sus decisiones con ayuda de las guías de restauración manual, las cuales habrá estudiado previamente como parte de su entrenamiento, y por lo tanto deberán serle familiares (Figura 1.1).

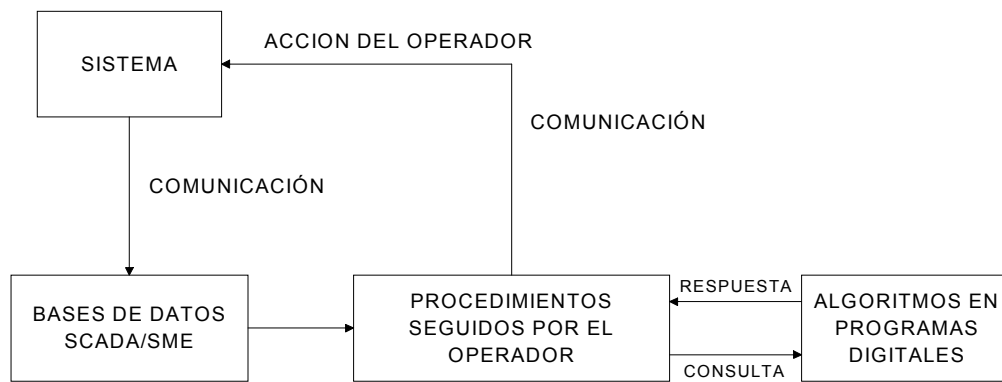


Figura 1.1. Esquema de restauración de SEP's con ayuda de procesadores digitales.

3. *Restauración cooperativa.* El operador y los procesadores digitales se alternan el control y el papel de líder dentro del proceso restaurativo, dependiendo esto de la capacidad individual de cada uno para ejecutar las tareas con eficiencia y eficacia. La restauración puede proceder con una perspectiva más amplia en la planeación de futuros pasos y su ejecución (Figura 1.2).

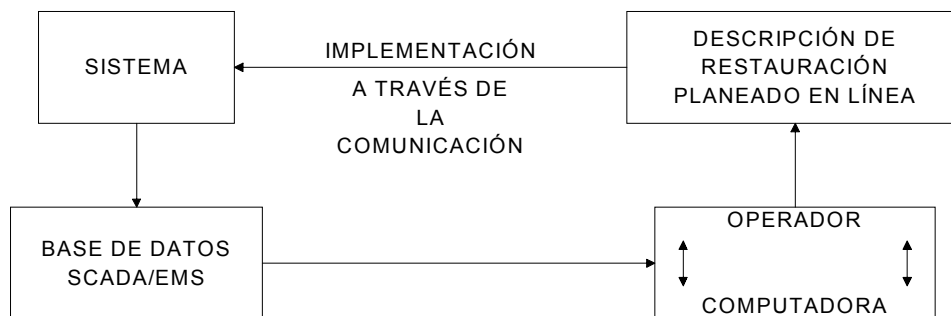


Figura 1.2. Esquema de restauración cooperativa de SEP's.

En la organización de la *RSEP* basada en cualquiera de estos tres esquemas, se deben considerar las fortalezas y debilidades relativas tanto del operador como de los sistemas digitales ó computadoras. El operador es el experto, y conoce su sistema. La habilidad que posee para cambiar el sistema de una condición de operación a otra es insuperable, pues él conoce mejor que nadie las condiciones generales y totales del sistema. Por otra parte, su habilidad para predecir los efectos de una selección está limitada en función del tiempo y en juzgar los efectos combinados de hacer mas de un cambio específico. Esto es, que el operador puede hacer solo una cosa a la vez. Por otra parte, los sistemas digitales pueden predecir eficiente y eficazmente los efectos combinados de hacer varios cambios sobre una sección de la red del *SEP*, por la propia base de datos existente y por las paqueterías computacionales a su disposición [9].

Para llevar a un sistema de una condición de operación determinada a una condición deseada, se requiere seleccionar alguna secuencia compleja de pasos intermedios para poder realizarla. Tal selección puede ser eficazmente tomada por el operador con ayuda de su experiencia propia y su conocimiento del *SEP*, mientras que los sistemas digitales pueden consumir mucho tiempo buscando la mejor opción entre múltiples alternativas (directamente ó mediante la organización de sistemas expertos) pues el número de decisiones en restauración es enorme. Así que tanto el operador como los sistemas de cómputo tienen fortaleza y debilidades que pueden ser compensadas trabajando estos mutuamente mediante la organización de algún esquema, incluyendo cualquiera de los mencionados anteriormente [9].

Cualquiera que sea la organización para la restauración que se siga, el procedimiento de restauración indiferentemente se divide en tres tareas como se visualizan en la figura 1.3. (Las figuras 1.1 y 1.2 caen dentro de este patrón). Estas son [9]:

1. Construcción de una base de datos
2. Selección del objetivo
3. Planeación de los pasos a seguir para conseguir el objetivo
4. Implementación

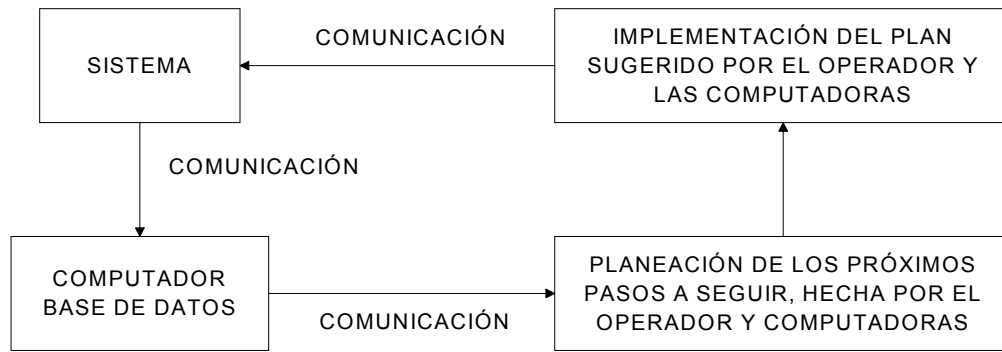


Figura 1.3. Esquema que muestra las tres funciones básicas de restauración.

Uno de los caminos explorados y con aplicaciones reales con el fin de reducir el tiempo de restauración de un *SEP* es la aplicación de sistemas expertos para ayudar a los operadores en la ejecución de las acciones de restauración que mejor reestablezcan un *SEP* a una condición ó estado normal. En la sección 2.7 se detallará lo relacionado a sistemas expertos y su contribución dentro de los periodos de restauración [12].

1.3.2 Antecedentes

Se han desarrollado diferentes técnicas para ser utilizadas en la planeación, simulación, pruebas de campo, y verificación de diferentes aspectos de la *RSEP*. Los modelos y procedimientos van dirigidos al análisis del comportamiento del sistema en estado estacionario, y comportamiento a grandes y pequeños disturbios del *SEP* y sus principales elementos. Existen modelos que son utilizados para evaluar la magnitud de los voltajes en estado estacionario y el comportamiento a grandes disturbios cuando se energizan líneas de transmisión de alto voltaje y extra alto voltaje. En investigaciones recientes, se han integrado herramientas de programación matemática dentro de sistemas expertos presentando buenos resultados [1, 5, 13, 14, 15, 16, 17].

Para resolver el problema de restauración, se han formulado investigaciones con el fin de validar y automatizar los esquemas de restauración. Los métodos propuestos hasta ahora para automatizar el proceso incluyen; métodos a través de la aplicación de lógicas de restauración plural, sistemas basados en el conocimiento ó sistemas expertos, y métodos de

programación matemática. Para conocer un poco mas acerca de estos métodos, ver la sección 3.1 de ésta misma Tesis [10, 11, 17].

Actualmente, en distintos centros de investigación y compañías de energía eléctrica en todo el mundo, se está buscando la implementación de técnicas de optimización inteligente y de búsqueda heurística, en la solución de diversos problemas de ingeniería eléctrica, debido a su robustez. Los resultados en distintas aplicaciones han sido exitosos, pues son de fácil implementación, aún para sistemas de grán escala con complejos modelos de representación [1].

La información y antecedentes del tema reflejan que en el área de restauraciones, este tipo de investigaciones anteriormente se desarrollaron para resolver el problema de restauración sobre sistemas de distribución. Investigaciones recientes han abarcado otras técnicas inteligentes de búsqueda heurística para sistemas de distribución como *Templado Simulado*, *Búsqueda por Tabú*, que es una técnica de sintonización más fina que el *AG*, y combinaciones de *AG's* con *Lógica Difusa*.

Por otra parte, la ventaja de los Algoritmos Genéticos se basa en su robustez y en la facilidad de su uso e implementación. Su perspectiva de búsqueda global lo hace capaz de encontrar una solución óptima global con una alta probabilidad. Esta técnica tiene la habilidad de resolver problemas de optimización no lineal, enteros, combinatoriales, multietapa, y multiobjetivo, y tiene una grán variedad de aplicaciones. Se mencionan las tesis registradas en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación (SEPI) de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (ESIME) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) relacionadas con el tema [3, 4, 18, 19, 20, 21]:

1.3.3 Ventajas que se presentan utilizando *AG's*

A diferencia de los sistemas expertos que requieren una extensa base de datos, los *AG's* requieren simplemente una función de habilidad que determinará su criterio de búsqueda para obtener una solución óptima.

Generalmente, como la necesidad de control del *SEP* está dada a sistemas de creciente complejidad, la utilización de herramientas de programación convencional redundan en tareas muy complejas y demandantes. Una solución diferente se da por medio de un algoritmo de programación heurística que busca una solución óptima de entre todas las posibles soluciones al problema. No requiere de experiencia ó deducciones previas para obtener una solución confiable. Su metodología de funcionamiento hace que pueda realizar una búsqueda óptima en medio de una ó muchas restricciones. Por sus características y naturaleza misma, los *AG's* se adaptan muy bien a la solución del problema de análisis y estudios de *RSEP*.

1.3.4 Implementación del *AG* en la *RSEP* en estado estacionario

Se aplicaron los *AG's* como método de optimización en la planeación de la *RSEP* y herramienta útil para los operadores de los *SCE* en el proceso restaurativo. El criterio de restauración seleccionado es por etapas, donde cada etapa comprende la energización de un elemento de la red. La *Función Objetivo* seleccionada consiste en minimizar las desviaciones en la magnitud de los voltajes nodales. Se incluyó una rutina de *Despacho de Potencia Activa* de programación lineal para incluir restricciones de operación y seguridad en el *SEP* de estudio. El modelo de la red de prueba se representó con el método *Newton – Raphson* para *FP's*. Se implementó un *AG* simple con los operadores genéticos de selección, cruzamiento y mutación. La *Función de Habilidad* se encarga de minimizar la cuadrática de las desviaciones del voltaje nodal del perfil prescrito en cada etapa.

Las variables de control utilizadas por el *AG* son las magnitudes de voltaje en los nodos de generación. Para decidir la energización de un elemento en una etapa, el *AG* determina que líneas son factibles de formar parte de la vía de restauración, y posteriormente, en cada una, definir la configuración más segura y confiable manipulando las variables de control. De todas las líneas factibles, propondrá energizar aquella línea que optimice la *FH* y así entregar energía a la carga desenergizada correspondiente al nodo sobre el cual incida.

1.4 Estructura de la Tesis

En el capítulo siguiente se presenta un panorama general referente a la *RSEP*. Primeramente como introducción, se expone el lugar que toma la restauración dentro de los estados de operación de los *SEP's*. Se detallan las principales características que presentan los *SEP's* dentro de un estado restaurativo. Se describen los periodos que comprende un escenario de restauración común. Se describen brevemente los pasos que componen una secuencia común de *RSEP*. Se expone brevemente las características principales tomadas en cuenta en la planeación de la *RSEP*, y se mencionan algunas estrategias de restauración probadas con éxito, además de los objetivos que se pretenden alcanzar en un escenario determinado de restauración. Se describen las principales consideraciones eléctricas que se deben tomar en cuenta en el *estado estacionario*, y a pequeños y grandes disturbios. Se detallan brevemente cada una de las *HA* utilizadas en la restauración, incluyendo las que no se utilizan en esta tesis. Por otra parte, se detalla la importancia de los sistemas expertos en la *RSEP*, la interacción que tienen dichos sistemas con las *HA* como *FP*, y su contribución dentro de los periodos de restauración. Después se describe el modelo matemático de *RSEP* cuyo objetivo es maximizar la capacidad del servicio a los consumidores, sujeto a restricciones.

En el capítulo 3 se presentó, como introducción, las diferentes técnicas y métodos computacionales usados anteriormente para resolver la problemática abordada en esta Tesis. Posteriormente se detalló la estrategia de *RSEP* seleccionada para este trabajo. En la siguiente sección, se profundizó en la adaptación del *AG* implementado a la *RSEP* en estado estacionario. Se detalla el criterio de optimización seleccionado en forma matemática, y se plantea la función objetivo. Se explica lo relacionado a las variables de control del *AG*, así como su representación en el mismo. Finalmente se muestra el diagrama de flujo que describe la herramienta propuesta en esta tesis para resolver la problemática de *RSEP*.

En el capítulo 4 se simulan tres escenarios de restauración, y se presentan los resultados obtenidos de dicha simulación, en tablas que reflejan resultados de un Análisis

en Estado Estacionario (*AEE*) de manera heurística. Posteriormente, el mismo análisis utilizando un *AG*. Se realiza una comparación entre ambos para analizar resultados y obtener conclusiones.

En el último capítulo se exponen las conclusiones obtenidas y las recomendaciones para trabajos futuros. Se mencionan las aportaciones conseguidas, y se explica como se puede utilizar esta herramienta como plataforma para trabajos futuros.

Se mencionan las referencias utilizadas en esta tesis, y los apéndices requeridos.

En el apéndice A se detallan los conceptos básicos de los *AG's*, así como un ejemplo simple para comprender el funcionamiento de los operadores genéticos básicos.

El apéndice B menciona con detalle los principios y ecuaciones para determinar un *Despacho de Potencia Activa (DPA)* que ayudan a que se cumplan algunas restricciones del criterio de optimización seleccionado.

El apéndice C menciona las ecuaciones de flujo de potencia basadas en el método de *Newton – Raphson*, utilizadas como herramienta auxiliar para determinar el modelo en estado estacionario de cada una de las redes de prueba.

En el apéndice D se proporcionan los datos para *flujos de potencia* de cada una de las redes de prueba utilizadas en ésta tesis.

Finalmente, en el apéndice E, se explica con detalle el programa principal y las subrutinas utilizadas que forman la herramienta propuesta, así como el listado de programas creados en lenguaje FORTRAN versión 77, utilizando subrutinas internas y comandos de las bibliotecas del *IMSL* de la versión FORTRAN Power Station 4.0.

CAPITULO 2

Restauración de *S.E.P.*

2.1 Introducción

Los *SEP's* son operados bajo dos tipos de restricciones, las cuales son: *Restricciones de Carga* y *Restricciones de Operación*. En las restricciones de carga se requiere que la demanda de los consumidores deba ser satisfecha, mientras que las restricciones de operación requieren que las variables del sistema, tales como los flujos en las líneas de transmisión y los voltajes nodales deben estar dentro de los límites aceptables [1, 8, 10].

Para propósitos del análisis de seguridad de los *SEP's* y el apropiado diseño de los sistemas de control, es de gran utilidad conocer la clasificación conceptual de las etapas de operación de los *SEP's*, las cuales son [1, 7, 10, 22]:

- Normal.
- Alerta.
- Emergencia.
- En el límite, ó extrema emergencia.
- Restauración.

En el estado normal, todas las variables y restricciones del sistema están dentro del rango normal de operación, y ninguno de los elementos del equipo están sobrecargados. El sistema opera en una manera segura, y es capaz de afrontar una contingencia sin violar ninguna de las restricciones del mismo.

El sistema entra a un estado de alerta si el nivel de seguridad tiende a un cierto límite, ó si se incrementa la posibilidad de un disturbio debido a condiciones climáticas adversas tales como la aproximación de una tormenta severa. En este estado, todas las variables del sistema están aún dentro de un rango aceptable, y todas las restricciones se mantienen dentro de sus límites. Sin embargo, el sistema se ha debilitado a un nivel en el que una contingencia puede causar una sobrecarga del equipo que lleve al sistema a un estado de

emergencia. Si el disturbio es muy severo, el sistema puede caer directamente a un estado en el límite, ó estado de extrema emergencia en forma directa.

El sistema entra a un estado de emergencia si un disturbio suficientemente severo ocurre cuando el sistema está dentro del estado de alerta. En este estado los voltajes en algunos nodos son bajos y/o el equipo tiene carga excedente. El sistema se encuentra todavía intacto y puede ser llevado al estado de alerta a través de las respectivas acciones de control de emergencia como pueden ser; liberación de la falla, control de excitación, generación rápida, retrogeneración, y tiro de carga.

Si las medidas anteriores no son aplicadas ó son inefectivas, el sistema está en un estado de extrema emergencia. El resultado es una caída ó salida en cascada, y una porción importante del sistema queda desenergizado. Las acciones de control tales como tiro de carga y separación controlada del sistema, se ejecutan pretendiendo salvar al sistema tanto como sea posible de una desconexión ó apagón total.

El estado restaurativo representa una condición en la cual las acciones de control están siendo tomadas para reconectar todas las líneas, y para restaurar la carga total del sistema. En la figura 2.1 se muestran los estados de operación de los SEP's, y la tendencia en la cual la transición puede tomar lugar de un estado a otro.

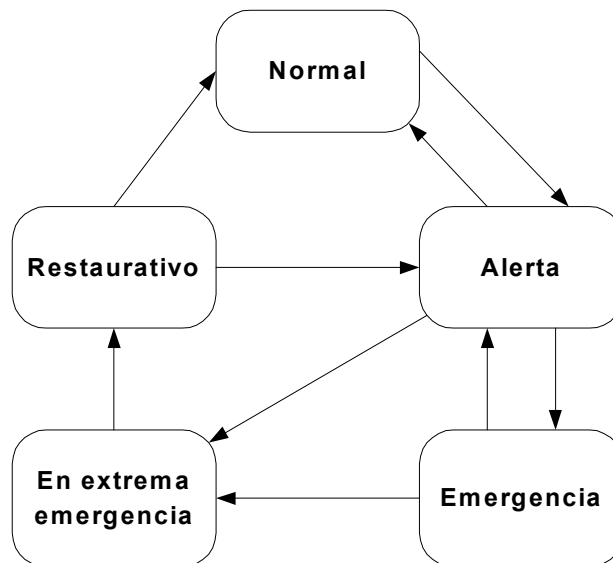


Figura 2.1.- Estados de operación de un sistema eléctrico de potencia.

La *RSEP* trata de suministrar tanta carga a tantos consumidores como sea posible en el menor tiempo posible, manteniendo los límites de seguridad y operación de todo el sistema. La restauración de un *SEP* después de que un área del mismo queda fuera de servicio, es una tarea muy difícil y complicada para un operador en un *SCE*. Hay factores donde se incluye la falta de experiencia del operador de planeación con las situaciones donde los sistemas quedan fuera de servicio. Además, se cuenta con la presión del tiempo [1].

Los mayores disturbios en el suministro de energía son primordialmente causados por las fallas transitorias, principalmente originados en los sistemas de transmisión. Un gran número de esas causas que provocan las interrupciones en el suministro es debido a fallas temporales, tal como a una descarga atmosférica, las cuales son inmediatamente disipadas por rápidos y selectivos relevadores de protección, dejando al sistema en una condición fuera de falla y en operación normal. En otros casos, esas fallas temporales pueden producir efectos subsecuentes los cuales son permanentes, incluyendo pérdidas de generación, pérdidas de carga, e interconexiones. Esos efectos subsecuentes resultan en un colapso parcial ó completo del *SEP* [14].

Investigando e identificando el estado del sistema colapsado y sus componentes, se puede mejorar sustancialmente la restauración. La carga seleccionada para ser resuministrada durante las fases iniciales, es primordial para mantener la estabilidad en los generadores. Se requieren además, niveles mínimos de generación y el mantenimiento de los voltajes en un punto satisfactorio [14].

Como los disturbios ó contingencias más frecuentes sobre una línea de transmisión ocurren por fallas en el generador ó una descarga atmosférica, los *SEP's* se planean y se operan, de tal manera que tengan la capacidad de resistir la mayoría de las contingencias factibles. Esto es llamado *Seguridad* del sistema [10].

Los principales aspectos en la operación de *SEP* en el estado restaurativo son los siguientes [1, 14, 23]:

- El estado del sistema es anormal, con carga desconectada, equipo desconectado, comunicaciones interrumpidas, y otros factores adversos.
- Los objetivos de la restauración son restaurar el sistema a un estado de operación normal en el menor tiempo posible, con plena conciencia de conservar la seguridad del mismo, y maximizando la cantidad de carga servida en kilowatts–hora al consumidor.
- Las tareas de restauración incluyen el aseguramiento en detalle del estado del sistema y sus componentes, para preparar el equipo y personal de operación para una restauración del servicio. Reintegrando al sistema y manteniendo el balance entre generación y carga tanto como se pueda, de manera controlada, con el fin de regresar al estado normal de operación.
- Las estrategias de restauración determinan la manera en la cual las diversas tareas se coordinan y las secuencias en las que son ejecutadas.

La mayoría de las compañías han mantenido los procesos de restauración, basados en las filosofías de operación segura, combinando la familiaridad y conocimiento de los expertos en el reinicio del suministro de energía y de las funciones generales en la planta de energía. Mientras esos procedimientos fueron hechos en el pasado, de manera exitosa, existe la inquietud de que la *RSEP* en general puede ser significativamente mejorada con el esfuerzo combinado de analistas de sistemas, personal de operación y el constante uso de computadoras que simulen la operación en línea y fuera de línea. Esta cooperación se facilita gracias a la capacidad del programa de *FP* que provee un modelo real en estado estacionario del sistema, y da un rápido sentido a los pasos de restauración alternativos sugeridos por los operadores. Un beneficio significativo es que el operador del *SEP* entienda los siguientes conceptos [1, 10, 11, 23]:

- Mantener el balance de potencia activa y reactiva sin aceptar que se tenga sobrevoltaje ó generadores subexcitados, y como consecuencia colapso de voltaje.

- Mantener el balance entre generación y carga, a través de la coordinación cuidadosa de cargas reconectadas en la red con las respuestas del generador, y evitar posibles riesgos de que decline la frecuencia del sistema.
- Consideración de los efectos probables de cada acción sobre el resto del sistema, y sobre las medidas subsecuentes.

El procedimiento de restauración posterior a un disturbio importante en el *SEP* se compone de tres periodos que se describen a continuación [12]:

1. Interconexión de fuentes iniciales de energía conectadas de manera independiente, simultánea e individual, que satisfagan los requisitos críticos de suministro de energía para formar islas ó subsistemas, todo en un lapso de tiempo de 30 a 60 minutos.
2. Integración de generación y transmisión para ejecutar la sincronización de los subsistemas en un lapso de 3 a 4 horas. Este periodo comienza con pequeñas unidades de generación con capacidad de arranque negro dentro de subsistemas energizados alcanzando un mínimo de generación y preparando a los equipos de restauración para las cargas mas alejadas. Termina con el arranque y sincronización de las unidades de generación más grandes tipo tambor y con turbinas tipo caldera. Al final del segundo periodo se espera tener la sincronización de todos los subsistemas, la interconexión de todas las plantas de generación en línea y fuera de línea con las estaciones y subestaciones energizadas, y la energización de todas las estaciones que requieren energía.
3. La minimización de las cargas sin servicio de energía eléctrica en un lapso de 8 a 12 horas. Este periodo comienza con la disponibilidad de suministro de las grandes unidades de generación térmicas.

En términos matemáticos, el problema de la *RSEP* se definió como un problema de optimización del tipo entero, no lineal, multi-objetivo, multi-etapa, combinatorial, y con restricciones. Desgraciadamente, la complejidad de este tipo de problemas evita el desarrollo de un método general, el cual determinaría una serie de acciones de control para

una amplia gama de circunstancias de operatividad. Se requieren de aproximaciones heurísticas que reflejen el comportamiento real y que auxilien a los operadores en la toma de decisiones. Tales aproximaciones pueden ser representadas mediante sistemas expertos y otras técnicas de inteligencia artificial las cuales puedan ser parte de una paquetería computacional, y ayudar así a los operadores de los *SEP's* a reconocer los cuellos de botella en la operación de los mismos. Minimizando la rápida degradación de sistemas, y desarrollando estrategias para suministrar un servicio confiable a los consumidores [9].

2.2 Secuencia de Restauración

Se tiene formulada de una manera general, una secuencia de restauración en sistemas de potencia que consiste de los siguientes pasos [15]:

2.2.1 Inicio de la Restauración

Operadores y directores, así como gente necesaria para el soporte adicional, son notificados de la falla y estado reciente del sistema. Siguiendo adelante con una valoración, y sin dilatarse en otras acciones, se analizan las opciones de restauración en diferentes departamentos. Todo esto con la finalidad de formular un plan de restauración. Aunque la valoración, el análisis, y la planeación pueden consumir un cierto tiempo crítico, su intento es fundamentalmente el de ayudar a realizar una secuencia eficaz. Lo ideal es llevar a cabo estos procedimientos paralelamente con otras acciones de restauración. Principalmente la restauración necesita ser coordinada. Progresivamente necesitará ser monitoreada y comparada con los objetivos iniciales. Los planes necesitan ajustarse finalmente.

2.2.2 Preparación de Fuentes Iniciales

Si ocurre un gran disturbio, se debe escoger una fuente inicial de energía. Para esto se utilizan unidades auxiliares generadoras de arranque en negro (*Black Start*), ó de preferencia unidades hidroeléctricas, si es que están disponibles. Aunque esto podría requerir mayor coordinación y prolongar el paro de energía para los consumidores, se provee una mayor fuente de estabilidad y fácilmente se llega a la resincronización y reinicio

de las unidades. Esos arranques en negro ó unidades separadas, darían cargas locales en incrementos flexibles hasta estabilizar el sistema.

2.2.3 Preparación de la Vía de Restauración

Estando todavía en el proceso anterior, es necesario establecer una vía de transmisión de restauración entre el resto del *SEP* y un generador en paro previamente seleccionado. También puede ser entre una unidad de arranque en negro ó un generador separado próximo al generador que se encuentra fuera de servicio, el cual necesita potencia externa de apoyo. Esta preparación podría incluir: (1) Solución de los problemas del sistema; (2) Suministro de energía a cargas críticas para la restauración; (3) seccionalización de porciones ó áreas del sistema; (4) determinación de cargas conectadas de acuerdo con la capacidad de generación; y (5) determinación de pasos para minimizar los sobrevoltajes durante la energización y puesta en marcha.

2.2.4 Reconstruyendo un Subsistema Estable

Si una unidad del *SEP* es reiniciada, deberá ser resincronizada y estabilizada con el resto del sistema.

- A. Los controles del gobernador automático tenderán a mantener la frecuencia del sistema constante. En las tomas de decisión de los generadores a ser restaurados por una fuente externa, tendrán prioridad las unidades generadoras a tener: (1) límites de tiempo de reinicio críticos; (2) Buenas respuestas de potencia real y reactiva; (3) aproximación de la fuente auxiliar; y (4) proximidad a las cargas críticas ó de otros generadores fuera de línea que requirieran potencia auxiliar.
- B. La restauración general de carga podría no proceder hasta que el sistema integrado haya sido reconstruido y estabilizado.

2.2.5 Aislamiento del Subsistema dentro del S.E.P.

Con el fin de que un gran sistema interconectado sea estable y flexible, y sea aún capaz de responder a cambios de carga, sobreponerse a disturbios, y energizar líneas, un generador arrancado en negro, ó un generador aislado ó separado, ó bien un sistema aislado, será interconectado con el resto del *SEP* tan pronto como sean ambos provistos de estabilidad, y que se encuentre totalmente disponible la vía de transmisión.

2.2.6 Enlazando la Isla con el Subsistema Adyacente

Si la ruta del lazo del *SEP* está indispuesta, ó el sistema es inestable, los subsistemas aislados individualmente podrían requerir de ser restaurados independientemente y juntar lazos para formar un sistema estable. Este gran subsistema entonces necesitará ser reincorporado al *SEP* tan pronto como sea posible.

2.2.7 Restaurando la Carga Fuera de Servicio

Cuando un gran sistema ha sido reconstruido, se encuentra estable, reintegrado, y con suficiente capacidad de generación, la restauración de la carga procederá tan rápidamente como sea posible, tomando las siguientes precauciones: (1) energización correcta de las rutas de transmisión a los centros de carga; (2) desactivando ó evitando los relevadores de baja frecuencia; (3) restaurando las cargas en incrementos para igualar los rangos rampa del generador y evitar una excesiva baja frecuencia; (4) restauración de líneas radiales con factores de potencia en atraso para controlar los sobrevoltajes; y (5) restauración de las cargas bloqueadas de la red con bajo voltaje después de que las unidades de generación tengan una adecuada respuesta de frecuencia y capacidad de potencia reactiva en línea.

En condiciones reales, la “culminación” del proceso en el contexto de restauración, no está aún bien definida. El 100% de la restauración total de un sistema, podría tomar algunos días, tal y como se ha presentado en algunos casos. La industria a nivel mundial, ha seleccionado el 90% de la carga restaurada, como un punto de culminación.

2.2.8 Después de la Restauración

Después de que las cargas son restauradas con el *SEP*, el sistema estará seguro por el reinicio adicional de generación como reserva, energizando y cerrando rutas de transmisión paralelas, y regresando a la operación normal. Finalmente, el proceso de la restauración será documentado para recordar los eventos posteriormente, además de las acciones tomadas, los problemas encontrados, los resultados obtenidos, y las recomendaciones para un mejoramiento futuro.

La planeación y preparación podría mejorar la eficacia y eficiencia de un proceso de restauración. Un área en particular necesita decidir cuanto y que tipo de preparación de la restauración es costeable y aplicable para sus características únicas. Esto puede incluir:

- A. El diseño de una serie de comandos de restauración.**
- B. Reunión del equipo de restauración.**
- C. Preparación de la base de datos de restauración.**
- D. Análisis con un programa de computadora del sistema de potencia.**
- E. Preparación del plan de restauración.** Esto implica el estudio y formulación de las fallas potenciales, la evaluación de las opciones de restauración, y finalmente, el desarrollo del plan de restauración.
- F. Sostenimiento de sesiones de entrenamiento en restauración.**
- G. Ejecución de las pruebas de restauración del sistema.**
- H. Conducción de prácticas de ejercitación en restauración.**
- I. Incorporación de recomendaciones para el mejoramiento.**
- J. Desarrollo e implementación de medidas preventivas.**

Los procedimientos descritos para reestablecer un sistema después de un colapso en un sistema determinado, por ejemplo un sistema regional nacional, inician con el arranque en negro de las unidades hidroeléctricas y turbogás. El objetivo primordial es alimentar los servicios propios de las centrales termoeléctricas, utilizando para ello a las centrales hidroeléctricas y turbogás, para lo cual solo se restablece la carga estrictamente necesaria para tener el balance operativo. Como primera opción para iniciar el restablecimiento de la red es verificar si las áreas vecinas están en condiciones de enviar energía al área en cuestión. Se forman las islas eléctricas con base en las plantas hidroeléctricas y turbogás. A medida que vayan entrando en operación las plantas de la zona afectada, la generación hidroeléctrica y turbogás disponible se encontrará en la posibilidad de cerrar todos los

enlaces de 230 kV entre zonas que queden operando como isla del sistema, hasta normalizar la red troncal. Se van alimentando los servicios propios para arrancar las plantas, y se restablece únicamente la carga necesaria, de preferencia la carga mínima, hasta que se sincronice alguna unidad. Se recomienda para la normalización de las cargas, tomar la carga en escalones no mayores de una determinada cantidad de potencia real (5 MW por ejemplo) para no tener bajones de frecuencia menores a 59 Hz. En ciertas secciones, la carga se normaliza poco a poco. La normalización de la carga en ciertas zonas se hace paulatinamente con base en la disponibilidad de energía que se tenga para alimentar a la zona [15].

2.2.9 Secuencia óptima de reinicio de las unidades de generación

En la restauración de *SEP*, los operadores frecuentemente necesitan conocer la cantidad de generación real y reactiva que estará disponible en un tiempo proyectado. Esta información podría ser usada para optimizar la secuencia de varias operaciones de restauración, y permitir un incremento significativo en el servicio de restauración. La necesidad es para identificar oportunamente los tiempos críticos de los primomotores y la coordinación eficiente entre las plantas de energía y las operaciones del *SEP*. Por ejemplo, puede ser observado en una suposición, que aunque ambos escenarios tomen 1600 MW de nivel de carga en un lapso de 10 horas después del inicio de la restauración. El supuesto escenario 2 sirve 17.4 GWh ó 42% mas que la cantidad de 12.3 GWh para el escenario supuesto 1 [13, 15].

En una problemática típica, generalmente empieza con una serie de caídas en cascada y eventos de interrupción, los cuales eventualmente dejan una porción del sistema sin energía. Una secuencia típica de operaciones de restauración incluye los siguientes pasos:

- Un estudio crítico a partir de la información disponible en tiempo real con el fin de fijar la extensión y severidad del paro de energía en la zona.
- Se abren los interruptores del circuito del área del sistema que está fuera de servicio, preparándose así para la implementación del procedimiento de restauración.

- El arranque negro de una unidad hidroeléctrica ó turbo gas en el área fuera de servicio.
- Se energiza una vía de transmisión desde la unidad de arranque negro a una unidad vecina, (posiblemente una unidad que utilice carbón) se reinicia y se sincroniza mediante el abastecimiento de la potencia de arranque de la unidad de arranque negro.
- Gradualmente se incrementa la generación y se proporciona carga a los consumidores poco a poco manteniendo la frecuencia de operación, asegurándose que los límites de flujos y voltajes permanezcan dentro de los límites aceptables y no causen caídas innecesarias en los relevadores.
- De manera gradual se energizan las vías de transmisión adicionales, suministrando a mas cargas, y reincorporando más unidades en línea.
- Continuamente, se deben monitorear voltajes, frecuencia, balance de potencia activa y reactiva, y flujos en las líneas, para asegurar que estos permanezcan dentro de los límites aceptables.
- Cuando sea apropiado, resincronizar el área con el resto de los sistemas, con el fin de que se interconecte con el resto del sistema.
- Se repiten los pasos anteriores hasta que todas las cargas de los consumidores hayan sido restauradas. Todas las unidades de generación deben funcionar correctamente, y todas las condiciones y restricciones del sistema de potencia deben permanecer en un estado normal de operación.

El objetivo primordial en la restauración es restaurar el servicio a los consumidores y normalizar el *SEP* tan rápido y seguro como sea posible.

Para resumir lo descrito aquí, se presenta en las figuras 2.2a y 2.2b, un diagrama de flujo que esquematiza un escenario común de restauración.

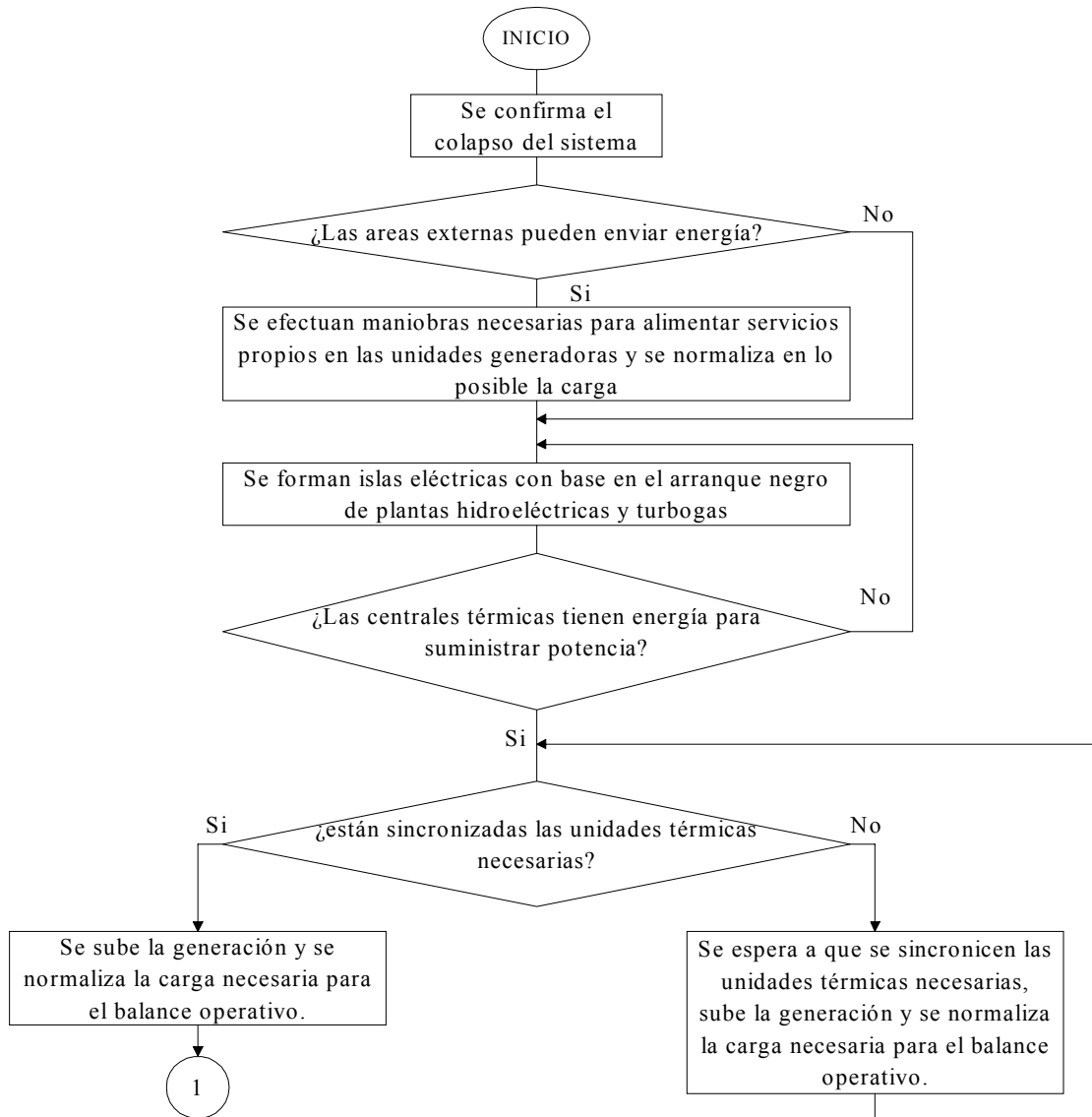


Figura 2.2a.- Diagrama de flujo de una secuencia convencional de restauración de SEP.(continúa)

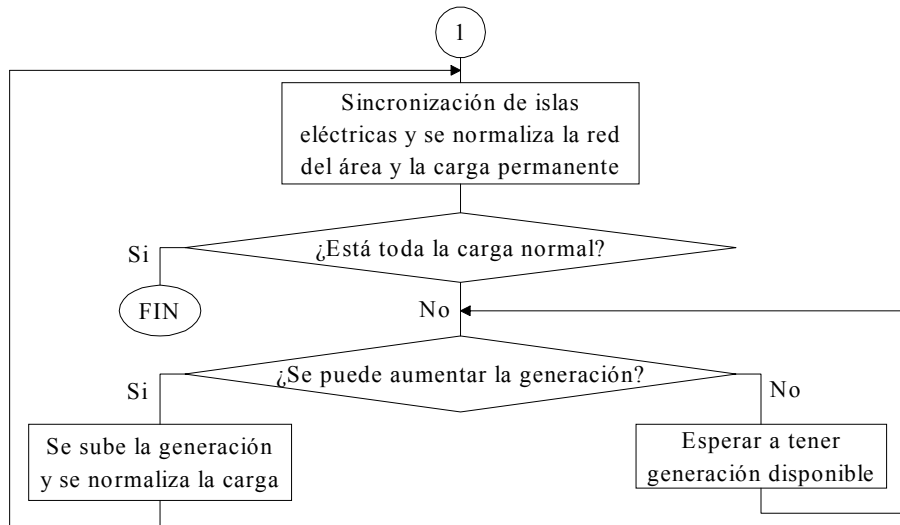


Figura 2.2b.- Diagrama de flujo de una secuencia de restauración de SEP convencional.

2.3 Planeación de la Restauración de S.E.P.

La planeación del servicio de restauración de un *SEP* es una tarea crítica para los despachadores en un *SCE*. La restauración trata de suministrar una amplia cantidad de energía a las áreas que se encuentran fuera de servicio, a tantos consumidores como sea posible mientras se satisfacen las condiciones de seguridad y operación. Muchas aproximaciones han sido propuestas para tratar los problemas de restauración desde diferentes perspectivas. Por consecuencia, los investigadores incorporan la experiencia de los despachadores y las reglas de operación dentro de sistemas expertos para asistir al operador del *SEP* [1, 5, 6].

La restauración es una tarea difícil y complicada por muchos factores. Las dificultades se deben a las grandes y lentas unidades de generación que se encuentran lejos de los principales centros de carga. También se debe a la instalación de excesivas líneas de transmisión de alto voltaje entre las plantas de generación y los centros de carga. La restauración del sistema envuelve una amplia diversidad de tareas, las cuales dependen del sistema en cuestión y de las circunstancias, lo cual implicará que no siempre se utilizará

una misma secuencia. Algunos de los intereses y problemas asociados con las principales tareas son los siguientes [1, 5, 24]:

- *Determinación del estado del sistema.* Los requerimientos recientes de la determinación del estado del sistema, dependerán en gran parte de las circunstancias y de la extensión del paro. En general, esta tarea tiene que ver con la identificación de los límites en las áreas energizadas, y la información acerca de la frecuencia y los voltajes dentro de las mismas. Información acerca del estado de las plantas de generación, equipo sobrecargado y sus problemas, y cargas interrumpidas por tiro de carga en baja frecuencia. El conocimiento del estado en el que se encuentra la energía de emergencia (compresores de aire, baterías) requerida para la energización remota, puede ser crítico. En muchos casos, el desconocimiento del estado en las principales vías de transmisión puede afectar el proceso de restauración.
- *Preparación de la planta.* Para restaurar las plantas térmicas, se tiene que considerar el conocimiento de las características de tiempo crítico de reinicio debido al sistema turbina – caldera de la planta. Esto incluye un intervalo de tiempo máximo mas allá del cual una unidad con caldera tipo tambor no puede ser reiniciada en caliente (*hot restart*) de manera segura, así como el intervalo mínimo de tiempo en el cual una unidad puede ser arrancada en forma segura.
- *Preparación de la red.* Al tiempo de que la planta es preparada, la red también se debe preparar para ser energizada. Durante las primeras etapas de restauración, cuando el sistema es por lo general controlado manualmente, las variaciones de voltaje y frecuencia son más amplias y deben ser toleradas. Bajo esas condiciones, los capacitores y los relevadores de baja frecuencia responden automáticamente a pequeñas perturbaciones, y esto puede demorar el proceso de restauración. Una secuencia factible de restauración para unidades de generación requiere de apoyo y provisión de energía por parte de apoyo remoto, considerando los efectos en la energización de líneas en particular.
- *Energización de la red.* La reintegración del armazón principal de la red envuelve operaciones de interruptores en el que se consume algo de tiempo. Muchos

fenómenos resultan extraños que aparezcan durante una operación normal del sistema, sin embargo, aparecen durante un proceso restaurativo. La energización de líneas de alta tensión pueden producir sobrevoltaje, transitorios, y resonancias armónicas. Un sobrevoltaje ocurre cuando hay generación de potencia reactiva en líneas descargadas, puede sobreexcitar los transformadores, generando distorsiones armónicas y sobrecalentamiento, y podría causar la subexcitación del generador, ó incluso, auto-excitación, y por consecuencia, inestabilidad.

- *Reconstrucción del sistema.* Si el sistema es restaurado a partir de una reconstrucción en paralelo de subsistemas formados aisladamente, la interconexión entre estaciones de generación dentro de cada subsistema es efectuada después de que las unidades de generación alcanzan el mínimo especificado, pero antes de la restauración de la carga total de cada subsistema. Las cargas industriales y municipales tales como las luces del tráfico son prioritarias. En cada subsistema, una planta debe ser responsable de mantener la frecuencia cercana a los 60 Hz. La restauración de la carga debe estar coordinada con la capacidad del generador considerando la respuesta en frecuencia de primomotores para imposición imprevista de carga y características de carga en frío. En operación normal, los operadores son capaces de sincronizar un generador sin coordinarse con los operadores del *SEP*. Durante la restauración, la coordinación entre la planta de energía, el *SEP*, y los operadores en campo, se vuelve muy importante. La cantidad de potencia activa y reactiva de demanda de carga varía con el paso del tiempo después de una interrupción del servicio. Un interés implicado en el cierre de las protecciones en una red parcialmente reestablecida, es el de una excesiva diferencia de ángulo de fase a través de las protecciones. Si no se tiene cuidado se podría provocar inestabilidad en el sistema, ó daño al equipo. La magnitud de que tales diferencias en el ángulo de fase puedan ser soportadas, depende del voltaje del sistema. Los ángulos pueden ser grandes y soportables a la vez, si los voltajes son pequeños, esto es donde las impedancias eléctricas sean más grandes.
- *Regreso al estado normal.* El proceso de restauración es considerado completo cuando se ha alcanzado la configuración total del *SEP*. El despacho económico de

potencia puede ser reinstituído y el próximo incremento de carga será basado en condiciones distintas a los requisitos técnicos de restauración de un *SEP*.

Considerando el alcance, diversidad, y naturaleza inusual que implica una restauración, y que el margen de error es alto, el desarrollo de un buen plan es una empresa considerable. Aunque las características de los *SEP's* sometidos a diferentes niveles de carga y condiciones de operación requieran diferentes planes de restauración, es importante desarrollar un plan maestro ó varios planes similares. Los principales elementos en el procedimiento se mencionan a continuación [1, 5, 6, 24].

- *Formación de un equipo de planeación.* El primer paso para desarrollar un plan efectivo de restauración es la formación de un equipo para proveer experiencia del personal familiarizado con la producción, protección, operaciones, instrumentación, análisis del sistema, y comunicaciones. Debido a las condiciones inusuales del sistema y a los fenómenos que podrían encontrarse durante el proceso de restauración, se deben proponer acciones restaurativas que tendrán que ser simuladas con el fin de asegurar que el sistema no regresará inadvertidamente a un estado de extrema emergencia.
- *Revisión de las características del sistema.* Las características relevantes de los *SEP's* enfocadas con la restauración son aquellas que tienen que ver con la estructura del *SEP* y aquellas que tienen que ver con las dinámicas del control del sistema. Las características estructurales pueden diferir de acuerdo al tamaño del sistema (generación y carga), el tipo de territorio donde se da el servicio (metropolitano ó rural, compacto ó extenso, ó combinaciones), mezcla de generación, niveles de voltaje de transmisión, tipos de redes de distribución, tipos y tamaños de las cargas, prácticas de regulación de voltaje, y disponibilidad en la asistencia para la interconexión. Las características a pequeños disturbios afectan el balance de potencia activa y reactiva, y los sistemas de control y protección. Las características que tienen que ver con el balance de potencia reactiva tienen que ver directamente con la capacidad reactiva de los generadores y condensadores síncronos (sobre-excitación y subexcitación) en diferentes configuraciones del

sistema y distintas condiciones de operación. Las ubicaciones y los tamaños de los reactores y capacitores en derivación, así como los niveles de voltaje y los modos de control, las reactancias de los transformadores, las posiciones de los taps de los transformadores y los modos de control, entre otras características, son parte también de lo que se considera como balance de potencia reactiva. Las características relacionadas con el balance de potencia activa incluyen la máxima y la mínima potencia permisible en terminales en condiciones normales y de emergencia, restricciones de tiempo en los primomotores, la respuesta de frecuencia en incrementos imprevistos de carga, número y tamaños de cargas en redes de baja tensión, tipos de primomotores, capacidad de arranque negro, entre otras. Las características relacionadas con los sistemas de control y protección incluyen número y tamaño de los alimentadores con baja frecuencia, número y posiciones de los esquemas de aislamiento en baja frecuencia, así como lo referente a relevadores, entre otras características específicas.

- *Formulación de suposiciones.* Los planes de restauración frecuentemente se desarrollan considerando un escenario en el peor de los casos para un disturbio grande en un *SEP* y las condiciones de generación y carga más probables que podrían ocurrir bajo tal disturbio. Es importante que tanto en condiciones de entrenamiento como de implementación, los planes de restauración mantengan un criterio definido para diferentes condiciones de carga en el sistema. Hay casos en los que las restricciones podrían afectar enormemente la restauración, no solo entre condiciones de carga ligera y carga máxima, sino también bajo otras circunstancias que dependen de cada sistema en particular, y todas requieren algunas variaciones en los planes de restauración, ó más aún, requieren de planes separados.
- *Establecimiento de las metas y objetivos.* Estratégicamente, las metas de la restauración de un *SEP* son prioritarias para ejecutar una restauración que sea óptima con respecto a la máxima energía restaurada y al mínimo de tiempo requerido. Estas metas se basan en los objetivos que se esperan cumplir, dependiendo de las características del sistema y sus condiciones de operación.
- *Desarrollo de estrategias y tácticas.* El desarrollo de un plan coherente de restauración requiere la postulación de uno ó más escenarios de colapso para ser

considerados. Posteriormente se sugiere escoger una estrategia de restauración básica que refleje las características y restricciones del sistema local. Se debe considerar la ubicación de las fuentes y la coordinación de actividades para asegurar una secuencia ordenada de acciones para tener altas posibilidades de completar exitosamente una restauración en un mínimo de tiempo.

- *Estrategias de restauración.* La estrategia de restauración llamada *De Formación*, se basa en la reenergización de la red principal como primer paso. Posteriormente un balance efectuándose paso a paso, entre generación y carga. Una dificultad importante en esta estrategia es la potencia activa producida por la planta de transmisión de alta tensión sin carga, lo cual frecuentemente excede la capacidad de absorción de reactivos en los generadores que están siendo energizados en la red, lo cual al mismo tiempo resulta en sobrevoltajes inaceptables en lugares remotos. Esta estrategia es apropiada para pequeños sistemas sin largas líneas de alto voltaje. También es adecuada predominantemente para sistemas hidroeléctricos con gran capacidad de absorción reactiva, ó para sistemas grandes con territorio de servicio muy compactos. La estrategia *De Reconstrucción* es otra estrategia de restauración, y en su caso más común se selecciona en conjunción con un escenario implicado en un colapso completo del sistema y carente de asistencia en la interconexión.
- *Validación.* Con el fin de desarrollar un plan de restauración, es necesario modelar el comportamiento a pequeños disturbios y en estado estacionario del *SEP* mediante la representación en datos físicos y operacionales en uno ó más sistemas de cómputo interactivos. Durante el proceso de restauración, podrían encontrarse oscilaciones en frecuencia y voltaje, y otros fenómenos transitorios que no son familiares durante la operación normal. Será necesario el uso de una amplia variedad de herramientas de simulación y análisis de sistemas, incluyendo el uso frecuente de *FP* como modelo en estado estacionario, y programas para estabilidad a pequeños y grandes disturbios, y de transitorios electromagnéticos, para asegurar la factibilidad y seguridad de las acciones propuestas. Los programas de *FP* pueden evaluar la carga en las líneas de transmisión, el balance de potencia activa y reactiva, las condiciones de sobretensión y bajo voltaje, el suministro de los generadores, las posiciones de los taps de los transformadores, el estado de los

capacitores y reactores en derivación, y las diferencias de ángulos de fase entre los centros de carga y los generadores. La reducción de los ángulos de fase antes del cierre de un interruptor para conectar vías de transmisión ó completar la reintegración de una isla, es una tarea muy importante y crítica que podría requerir de análisis de flujos óptimos de potencia. Los voltajes transitorios causados por la energización de grandes segmentos de línea de transmisión, y los disturbios armónicos producidos por la carga en la línea y las corrientes magnetizantes del transformador las cuales podrían causar daño por resonancia, pueden ser evaluadas por simulaciones en programas de transitorios electromagnéticos. Las simulaciones a pequeños disturbios son útiles para evaluar los rangos en los cuales los generadores pueden operar con carga, la respuesta del generador con carga, los cambios en la frecuencia del sistema, y los efectos de los alimentadores con relevadores de baja frecuencia. Las simulaciones requieren de los datos completos y precisos de la carga, datos de los centros de generación, y otras características de los sistemas. En ciertos casos, los datos necesarios para cuantificar todos los fenómenos inusuales implicados, y los modelos no lineales necesarios para el análisis pueden ser muy difíciles de obtener.

La planeación de la restauración envuelve dos procesos iterativos, uno entre el modelo del *SEP* y la validación del modelo, y el otro entre las tácticas y estrategias. Los modelos tienen que ser validados contra los datos de operación medidos, obtenidos del sistema de cómputo que supervisa el control de sistema. Este proceso iterativo es continuo hasta conseguir un grado aceptable de semejanza entre los modelos y los datos reales obtenidos del *SEP*.

Después de que se formula una estrategia de restauración y se desarrolla un plan de restauración (tácticas) a implementarse, se compara dicho plan de restauración contra la estrategia inicial para comprobar su conformidad y factibilidad. En caso de que haya divergencia, la estrategia ó el plan, ó ambos, tendrían que ser modificados. Los procesos iterativos anteriores consideran los efectos probables de cada paso de la restauración con el resto del sistema, y considera también las medidas subsecuentes.

La mayoría de las compañías mantienen sus planes de restauración basados en sus objetivos de restauración, filosofías, y prácticas de operación y familiaridad con las características de las capacidades de reinicio de sus plantas de energía y de sus peculiaridades de reintegración al *SEP*. Mientras esos procedimientos han restaurado exitosamente *SEP's* en el pasado, pueden ser significativamente mejorados mediante simulaciones en estado estacionario y de comportamiento a grandes y pequeños disturbios de los *SEP's* bajo ciertas condiciones de operación restaurativa.

La mayoría de los *SEP's* tienen características en común y comportamientos similares durante el proceso de restauración. Por lo tanto es posible establecer un procedimiento general y una serie de instrucciones para aumentar la rapidez de la restauración. Por otra parte, se elabora un plan detallado para encontrar los requisitos específicos de un *SEP* en particular.

Una guía de restauración en línea, capaz de conducir al operador en la toma de decisiones de tal manera que indique qué pasos tomar, y cuando tomarlos, podría minimizar sustancialmente la duración de un paro de energía, y en consecuencia, reducir el impacto de un estado de extrema emergencia. Como la naturaleza del problema presenta información incompleta y muchas alternativas ambiguas, se sugiere la necesidad de herramientas integrales que consistan de sistemas expertos y de *Herramientas Analíticas (HA)* apropiadas [1, 5, 6, 24].

2.4 Objetivos en la Restauración de S. E. P.

Como ya se detalló, las principales metas en la restauración serían primeramente, reconstruir un sistema eléctrico estable, esto es reconstruir la estabilidad del sistema, y entonces posteriormente, restaurar toda la carga que quedó fuera de servicio [25].

En el proceso de alcanzar esas metas, los siguientes objetivos necesitan cumplirse:

- **Restaurando con seguridad.**

1. Manteniendo segura a la gente.
 2. Evitando sobrecargas térmicas.
 3. Evitando sobrevoltajes.
- **Restaurando “suavemente”.**
 1. Balance de potencia real de carga con generación.
 2. Balance de potencia reactiva de generación y carga.
 3. Evitando interrupciones repetitivas.
 - **Minimizando el tiempo de Restauración.**
 1. Observando los límites de tiempo de reinicio del generador.
 2. Observando los límites de tiempo en la energía de apoyo.
 3. Evitando el apresuramiento de la restauración.
 - **Minimizando el impacto adverso al consumidor.**
 1. Manteniendo bien informado al cliente.
 2. Restaurando las cargas críticas tan pronto como sea posible.
 3. Restaurando las cargas grandes tan pronto como sea posible.
 - **Manteniendo flexibilidad para responder a los problemas.**

En la práctica, debido a las acciones correctivas, la mayoría de los disturbios en los sistemas son detenidos previo al colapso completo, y se encuentra en disponibilidad algún nivel de asistencia en la interconexión. En el evento de un disturbio parcial, sería necesario determinar el estado del sistema y entrar en el proceso de restauración en el nivel apropiado [25].

La mayoría de los disturbios en los *SEP* son causados por fallas las cuales son temporales y van dejando al sistema en una condición sin falla. Sin embargo existe una alta probabilidad de tener posteriormente efectos secundarios que pueden causar un colapso parcial ó total. La estrategia para la restauración de un colapso completo y sin asistencia en la interconexión puede ser determinada como un conjunto de lineamientos utilizados como guía, y en estos se incluye [1]:

1. Seccionalización de los sistemas dentro de subsistemas, tal que cada subsistema contenga en su mínimo; una caldera tipo tambor con capacidad de arranque en caliente (*Hot Start*), y una unidad con capacidad de arranque negro con el fin de restaurar paralelamente varios subsistemas y no sólo un sistema.
2. La interconexión de las estaciones de generación dentro de cada subsistema debe ocurrir tan pronto como sea posible, de tal manera que una interconexión sea llevada a cabo después de que las unidades de generación consigan suministrar el mínimo de generación especificado.
3. Se sugiere la interconexión de las cargas en pequeños incrementos para evitar la excesiva desviación en baja frecuencia. La guía general sugiere dar carga cuando la frecuencia del sistema es alta, y elevar la generación cuando la frecuencia del sistema es baja.
4. Mantener la estabilidad en estado estacionario haciendo que cada estación suministre a las cargas cercanas.
5. La restauración de las cargas radiales y más pequeñas antes que las más grandes, y de redes con bajo voltaje mientras se mantiene una razón de potencia real a reactiva razonablemente constante.
6. Manteniendo los voltajes del sistema mas o menos dentro del 5%, manteniendo los voltajes de generación en un rango debajo de lo normal durante las primeras etapas de la restauración. Ajustando además los transformadores taps a sus posiciones apropiadas.
7. Manteniendo el balance de potencia activa y reactiva mediante la energización únicamente de un circuito de doble hilo de líneas de transmisión a tierra, y la operación de generadores subexcitados para extender la admisión de consideraciones de estabilidad.

2.5 Características en el Proceso de *R. S. E. P.*

En un estado restaurativo, los principales elementos, entre ellos plantas de energía, podrían presentar temperaturas anormales y presiones fuera del rango de control efectivo de los lazos del control de la planta. O bien, que tengan incompatibilidad con un rápido regreso

del servicio de suministro de energía. En estos casos, los operadores deben trabajar con información limitada. Mucha de la información que podría ser de utilidad en el proceso de restauración, no estaría disponible para los operadores. Entre otras cosas, las comunicaciones son dañadas debido a la situación de emergencia. Generalmente, los sistemas *SCADA* y los programas de aplicaciones de los *SCE* que quedan a disposición del operador, no están diseñados para este tipo de casos, y no se adaptan bien al estado del sistema que atañe a la restauración. Una gran cantidad de complicaciones que hacen a la restauración de un *SEP* una tarea difícil, además de la presión y el estrés que implica completar la tarea en un mínimo de tiempo, es la falta de disponibilidad de fuentes de energía, y la falta de familiaridad del personal de operación con las condiciones inusuales que predominan en ese momento. A pesar de esos obstáculos, las cargas prioritarias deben ser restauradas rápidamente. Sin embargo, en condiciones climatológicas adversas, casi toda la carga podría ser de alta prioridad [23].

Por todo esto, para efectos de análisis, el problema de la restauración de *SEP's* es visto conceptualmente como un problema de optimización con restricciones, no lineal, multiobjetivo, y combinatorial. El objetivo del control restaurativo es agilizar y hacer más veloz la restauración del servicio a los consumidores, los cuales envuelven la minimización del tiempo de restauración y la maximización de la restauración de carga a los consumidores en cada etapa. Los siguientes puntos son las principales consideraciones que deberán tomarse en cuenta durante el proceso restaurativo [1, 23].

2.5.1 Balance de Potencia Reactiva

Durante las etapas iniciales del proceso de restauración, es necesario mantener las magnitudes de voltaje del sistema dentro de un rango aceptable. Esto es hecho por varios caminos: Energizando lo menos posible las líneas de alto voltaje; la operación de los generadores debe estar de preferencia en niveles del voltaje debajo de sus valores normales de operación; conectando reactores en derivación; desactivando capacitores estáticos, ajustando taps de transformadores a su posición apropiada, y dando cargas preferentemente con factores de potencia en atraso. La incapacidad para ejecutar estas tareas debido a la ausencia de las condiciones apropiadas, podría causar un desbalance de potencia reactiva

que resultaría, por ejemplo, en el aumento de la excitación propia del generador y aumento en la fuga de voltaje [14, 23].

En general, la expresión *Balance de potencia reactiva* implica que la generación reactiva y la carga reactiva debe ser iguales ó balanceadas. Es de importancia tener un claro entendimiento de lo que es considerado como *generación reactiva* y de lo que es considerado como *carga reactiva*. También es posible controlar el balance para obtener las condiciones de voltaje que nosotros deseamos. En general, los operadores de los *SEP's* dividen la potencia real dentro de carga y generación, definiendo lo que deja de utilidad la red para el consumidor como carga positiva, y a lo que es suministrado a la red como generación positiva. La potencia reactiva es también dividida dentro de carga reactiva y generación reactiva. Debido a que la mayoría de los consumidores tienen factores de potencia en atraso, la carga reactiva en atraso es considerada como carga reactiva positiva y la generación reactiva en atraso como una generación reactiva positiva [13, 26].

A continuación se menciona en la tabla 2.1 una clasificación de generación y carga, positiva y negativa. En la primera columna se especifica el tipo de generación ó carga, si es positiva ó negativa con un signo \pm , + ó -, dependiendo del que se trate [23, 26].

Tabla 2.1.- Clasificación de generación y carga positiva y negativa.

\pm	<i>Generadores</i>
\pm	<i>Co-generadores</i>
+	<i>Todos los circuitos (carga en línea)</i>
+	<i>Todos los capacitores en derivación</i>
-	<i>Todas las reactancias en derivación</i>
\pm	<i>Condensadores síncronos</i>
\pm	<i>Generadores estáticos VARS</i>
\pm	<i>Demanda del consumidor</i>
+	<i>Todos los circuitos (I^2x) – Reactancias en serie y capacitores en serie son tratados como cambios en la impedancia del circuito.</i>
+	<i>Todos los transformadores (I^2x)</i>
+	<i>Todos los transformadores (excitación)</i>
+	<i>Equipamiento auxiliar del generador</i>
\pm	<i>Intercambio</i>

2.5.2 Balance entre Generación y Carga

En la fase inicial de la restauración, es necesario mantener la frecuencia del sistema dentro de los límites permisibles mediante la restauración en pequeños incrementos de carga. Se disponen de alimentadores equipados con relevadores de baja frecuencia en las fases subsecuentes de la restauración cuando la frecuencia del sistema se ha estabilizado. Energizar carga en pequeños incrementos tiende a prolongar el tiempo de restauración. El tamaño de la carga energizada depende del rango de respuesta de los primomotores, los cuales generalmente están bajo control manual en ese punto. Cabe hacer notar que la carga energizada en grandes incrementos aumenta el riesgo de una falla que decline la frecuencia del sistema y que envíe al mismo de regreso a un colapso. Se recomienda la restauración de las cargas radiales y más pequeñas antes que las más grandes con el fin de mantener un buen control de la frecuencia [13, 14, 23].

2.5.3 Coordinación de Generación y Carga

Generalmente, las estrategias para la restauración de *SEP's* consisten del reinicio, reintegración y restauración de la carga. En la fase de reinicio, algunas islas son formadas. En cada isla, el objetivo es suministrar simultánea e inmediatamente servicio de la estación a las grandes plantas térmicas por las turbinas de combustión de arranque negro, ó, si están disponibles, unidades hidroeléctricas. El comportamiento de las turbinas de combustión es completamente diferente durante la operación normal cuando son activados con un sistema grande, y durante la restauración cuando se comporta como primomotor, ó solamente como fuente de energía. Cuando se forman algunas islas de generación y carga, y simultáneamente se reinicia cada isla, podría apreciablemente reducirse el tiempo de restauración.

El número de las islas está limitado por la disponibilidad de recursos, incluyendo el número de equipos de operación, el número de generadores de arranque negro dentro de cada isla, y la disponibilidad y la coordinación efectiva entre los diversos centros de control. En el inicio de las unidades de vapor, es importante coordinar los intervalos de tiempo críticos determinados, así como el intervalo de tiempo máximo mas allá del cual las determinadas unidades térmicas no pueden asegurarse de ser restauradas. Ó el intervalo de

tiempo mínimo requerido antes de que una unidad térmica pueda ser reiniciada. La cantidad de generación real y reactiva disponible algún tiempo después de un disturbio, está basada en la mezcla de los primomotores, sus características de reinicio, y sus condiciones de operación antes del disturbio [13, 14, 23].

2.5.4 Monitoreo y Control

La mayoría de los grandes disturbios en los *SEP's* son atacados antes de completarse el colapso, y al mismo tiempo hay disponibilidad de asistencia en la interconexión. En el evento del disturbio parcial sería necesario determinar el estado del sistema y entrar al procedimiento de restauración en el propio nivel. La falta de comunicación entre los centros de control, las plantas de energía, y las subestaciones, así como un inadecuado despliegue de monitoreo y alarmas excesivas, pueden alargar la duración del proceso de restauración [13, 14, 23].

2.5.5 Modelo en Estado Estacionario

Se requieren tres tipos de modelos para simular el proceso de *RSEP* y su reintegración; un modelo en estado estacionario para representar el sistema eléctrico en estudio en pasos discretos, un modelo para pequeños disturbios para describir el comportamiento del sistema en transición entre pasos, y un modelo de las acciones del operador y cambios resultantes en el sistema que se requieren para hacer la transición entre pasos. De los tres modelos requeridos, solo el de *FP* (*modelo en estado estacionario*) es un modelo con alta disponibilidad como herramienta interactiva de computación. El programa de *FP* facilita la evaluación de las líneas de transmisión, balance de potencia activa y reactiva, carga en los generadores, posiciones de los taps en los transformadores, estado de los elementos en derivación y ángulos de fase entre las estaciones de generación y carga (*parámetros para el AEE*). Las acciones del operador pueden dictaminar la topología de la red y representar el modelo de flujos de carga, y así, determinar una secuencia de pasos en el proceso de restauración. Un programa interactivo de *FP* puede ser utilizado como una herramienta de estudio y entrenamiento. Para conocer detalles del método de *FP* seleccionado, ver el apéndice C [1].

La herramienta más importante y útil para *RSEP* es el *Programa de FP* el cual es usado para determinar las cargas en las líneas de transmisión, balance de potencia activa y reactiva, condiciones de bajo voltaje y sobrevoltaje, selección de las posiciones en los taps de los transformadores (voltaje y ángulo de fase), situación de los capacitores y reactores en derivación, y la diferencia en ángulos de fase entre los generadores y los centros de carga (*estabilidad en estado estacionario*). El programa de *FP* es la herramienta analítica base para otras *HA* como los son; *estabilidad a pequeños y grandes disturbios, voltajes transitorios, y análisis de corto circuito* [1, 10, 16, 27].

Durante las primeras etapas del proceso de restauración, tanto en líneas aéreas como subterráneas, el interés radica en tres problemas de voltaje que son: *sobrevoltaje que declina la frecuencia del sistema, interrupciones transitorias, y resonancias armónicas*. El sobrevoltaje puede ser controlado con la ayuda del programa de *FP*. Las interrupciones transitorias y las resonancias armónicas necesitan ser determinadas utilizando un programa de voltaje transitorio y un programa de transitorios electromagnéticos [16].

2.5.6 Tiro de Carga

El tiro de carga toma lugar como una medida de emergencia en casos donde se tienen condiciones de caída en la frecuencia ó de pérdidas de generación de potencia. Particularmente se efectúa en sistemas aislados debido a la baja inercia y a las reservas limitadas. El rango de frecuencia cae debido a la pérdida de generación que puede ser mas pronunciada. Sin embargo, un diseño más cuidadoso del esquema de tiro de carga es frecuentemente requerido en un sistema aislado que en un sistema interconectado de gran tamaño. Para restaurar la frecuencia de operación del sistema después de serios disturbios, una de las principales estrategias de protección es el esquema de tiro de carga de baja frecuencia [13].

2.5.7 Voltajes Transitorios

Durante la fase de reintegración se desea energizar tanta sección de línea de transmisión de alta tensión como los voltajes en el estado transitorio lo permitan. Energizando pequeñas secciones se tiende a prolongar el proceso de restauración. En la energización de una gran

sección se tiene el riesgo de dañar el aislamiento del equipo. El problema es determinar como energizar una línea de más de una sección, sin exceder el nivel de impulso del equipo. Por ejemplo, en una línea de 230 kV de doble circuito, se puede tener como respuesta a la energización de dos secciones del circuito sencillo, un voltaje en estado transitorio de 492 kV, que excede los 470 kV que tienen como nivel de impulso base del transformador. Energizando solo una sección del circuito sencillo resulta en un voltaje en estado transitorio de 460 kV, el cual es menor que el nivel de impulso base [16].

Algo útil es energizar las líneas sección por sección. Primeramente, un circuito de línea de circuito doble manteniendo el voltaje de generador en el mínimo nivel de excitación permisible. Esto ayuda a reducir las corrientes al mismo tiempo que ayuda a reducir las magnitudes de voltaje en el estado transitorio. Por otra parte el procedimiento extiende la restauración. Se necesita una metodología simple para facilitar el establecimiento de guías y procedimientos escritos para energizar líneas de transmisión [13, 16].

2.6 Herramientas Analíticas de Restauración

Las *Herramientas Analíticas (HA)* para *RSEP* consisten en un conjunto de programas en línea y fuera de línea los cuales describen el comportamiento en estado estacionario, comportamiento a pequeños disturbios, y comportamiento a grandes disturbios de un *SEP* durante la restauración. En esta tesis se utilizan únicamente el programa de *FP* y un programa de flujos óptimos lineales para determinar un *DPA*. Sin embargo, por su importancia, se describen brevemente cada una de las *HA* que, de manera fundamental, son requeridas como herramientas auxiliares por el operador del *SEP* en una etapa restaurativa. A continuación se mencionan las principales *HA* para *RSEP* y sus aplicaciones [10].

- **Programa para FP.** Como ya se mencionó en la sección 2.5.5, el programa de *FP* representa el modelo del *SEP* desde la reconstrucción de la configuración inicial generación-carga, hasta la eventual reconexión del sistema. Es útil para determinar un

control de sobrevoltaje, balance de potencia reactiva, y límites térmicos en líneas de transmisión y transformadores.

- ***Programa para simular grandes disturbios.*** Este programa puede describir el comportamiento del *SEP* a grandes disturbios para un periodo de 1 a 5 segundos posteriores a la perturbación. Útil para determinar la estabilidad en el subsistema, un esquema de aislamiento en baja frecuencia, el tiro de carga en baja frecuencia, y el aislamiento intencional.
- ***Programa para simular pequeños disturbios.*** Este programa es auxiliar en el mantenimiento del balance entre generación y carga, y para evitar desviaciones excesivas en la frecuencia. Útil para determinar la respuesta de la frecuencia en generadores, y control de la frecuencia en la carga.
- ***Programa para flujos óptimos de potencia.*** Este programa es auxiliar en el *AEE* pues ajusta los parámetros y las variables de control del sistema con el fin de mantener la estabilidad en estado estacionario durante todo el proceso.
- ***Programa para voltajes transitorios.*** Los voltajes transitorios son causados por la energización de un gran segmento de línea de transmisión, ó por conectar algún elemento capacitivo inoportunamente durante el proceso. Este programa es útil para ayudar a cuidar que la energía almacenada en largas líneas de transmisión de alta tensión no cause sobre-voltajes ni resonancias armónicas. Generalmente, si el voltaje en estado estacionario es menor de 1.2 por unidad de su valor nominal, los transitorios no dañan la red, a excepción del caso en que las líneas terminen en un transformador, donde se pueden causar resonancias armónicas y daño por sobre-voltaje.
- ***Programa para cortocircuito.*** El propósito del programa es, asegurar que se mantenga el mínimo en corriente de cortocircuito por falla en los relevadores, evitar que no se rebasen los rangos máximos en los interruptores del circuito, y mantener una adecuada coordinación de relevadores.
- ***Programa para transitorios electromagnéticos.*** Este programa, indispensable en planeación de la *RSEP*, pues resuelve ecuaciones diferenciales algebraicas, ordinarias y parciales que representan líneas de transmisión. La utilidad de este programa es ayudar en el análisis del control de sobre-voltajes por resonancias armónicas.

- ***Programa para la reducción del ángulo de fase.*** En la reintegración de un *SEP* después de un disturbio importante, los operadores encuentran una excesiva diferencia del ángulo de fase después del cierre de un circuito que conecta a dos estaciones adyacentes. Esos ángulos pueden darse a través del cierre de la línea que se encuentra entre dos sistemas interconectados, ó entre dos subsistemas dentro de un sistema. El rango en la diferencia del ángulo de fase que un sistema puede resistir depende del nivel de voltaje nominal, condición de operación, y localización del interruptor del circuito dentro de la red. Este rango puede determinarse mediante el programa para la reducción del ángulo de fase.
- ***Programa para aproximación heurística y modelo físico de la demanda de carga.*** Se deben considerar dos aproximaciones en la representación de la carga durante la *RSEP*; el modelo heurístico y el modelo físico. Este programa considera estas dos aproximaciones, y se puede desarrollar utilizando los parámetros para los alimentadores específicos de un *SEP* determinado, en un día de la semana en particular. También puede considerar datos extensivos de la carga y métodos para determinar un pronóstico de la demanda de carga basados en el clima.
- ***Programa para coordinación de restauración.*** Este programa puede ayudar a coordinar actividades dentro de la seccionalización del sistema en subsistemas para su simultánea restauración, evaluando la disponibilidad de fuentes de energía, el número de equipos, así como la disponibilidad en comunicaciones para permitir una eficiente y eficaz coordinación de sus esfuerzos.

Se tienen tres tipos de usuarios de estas *HA* que son; el equipo de planeación de restauración que utiliza un modo interactivo fuera de línea. El equipo de instrucción de entrenamiento que requiere del modo en línea y fuera de línea. Y finalmente los operadores que requieren de un modo de operación en línea en tiempo real. Las herramientas mencionadas son capaces de asistir a los tres tipos de usuarios en condiciones de pre-disturbio y de post-disturbio [10].

Condiciones de pre-disturbio. La operación del *SEP* y las condiciones del equipo varían con el tiempo. El equipo de planeación podría ser capaz de proponer un número real

de operaciones y condiciones del sistema basados en su experiencia y familiaridad con el equipo específico. Dicho equipo de planeación podría validar tales condiciones de operación utilizando sus *HA*. Los instructores pueden ser capaces de seleccionar una ó más de las condiciones de operación propuestas por el equipo de planeación, así como escenarios para sus sesiones de entrenamiento. Las condiciones actuales del sistema de potencia y del equipo, se encuentran disponibles para el operador del sistema, y actualizada conforme a los cambios surgidos durante la operación normal del sistema [10].

Condiciones post-disturbio. El estado del *SEP* y las condiciones del equipo posteriores al disturbio no pueden determinarse con exactitud. Como los operadores experimentados (en el equipo de planeación) conocen en términos generales las condiciones de *pre-disturbio*, ellos pueden predecir la consecuencia de un disturbio en el sistema y los efectos subsecuentes durante la condición de *post-disturbio*. El equipo de planeación, utilizando su experiencia, podría ser capaz de utilizar las *HA* y simular un número de escenarios *pre-disturbio*, y su correspondiente escenario *post-disturbio*. Así mismo, los instructores podrían seleccionar un número de escenarios *post-disturbio* propuestos y desarrollados por el equipo de planeación, para sus sesiones de entrenamiento. Cuando las *HA* son integradas a sistemas *SCADA/EMS*, el operador es capaz de determinar el estado mas reciente del sistema [10].

Procedimiento de restauración. Siguiendo a la valoración de la condición de *pre-disturbio* y el reconocimiento del estado de *post-disturbio*, las *HA* pueden ser utilizadas en la preparación de las plantas de energía, líneas de transmisión, restauración del suministro de energía al sistema compuesto, minimización de las cargas sin servicio, e interconexión con los sistemas adyacentes. Entonces, el desarrollo de un plan de restauración se ejecuta en un ambiente fuera de línea, y por lo tanto las *HA* podrían ser utilizadas plenamente en todas las etapas de la restauración. En operación, la necesidad de información podría evitar la simulación en línea. Los resultados obtenidos por las *HA* pueden ser de gran utilidad para el operador. Los datos y parámetros necesarios para cuantificar todos los fenómenos inusuales envueltos, y los modelos no lineales necesarios para el análisis, pueden ser difíciles de obtener. En la ausencia de algunos datos y parámetros, particularmente aquellos

relacionados con la termodinámica de las máquinas, los datos de proporcionados por las *HA* pueden ser de grán utilidad [10].

2.7 Aplicación de Sistemas Expertos para *R. S. E. P.*

El acelerado y continuo avance en materia de computación hacen posible que los sistemas expertos sean capaces de analizar cada vez mas posibilidades en cada vez menor tiempo, y con mayor atención a detalles que aún el operador mas experimentado tardaría en detectar. Por otra parte, los sistemas expertos tienen la capacidad de identificar en línea la mejor estrategia de restauración en una situación determinada, con la posibilidad de desarrollar planes que muestren como puede implementarse esta estrategia, y de esta manera, minimizar el tiempo requerido para la restauración del sistema [9].

Los sistemas expertos se desarrollan sobre la base de los sistemas de cómputo ó procesadores digitales. Los cálculos numéricos podrían también ser usados para verificar que esas recomendaciones no causen alguna violación en las restricciones de operación. Una integración de los sistemas expertos con *HA* aseguraría que solo las recomendaciones factibles sean presentadas al operador. Por ejemplo, el sistema experto responsable de sugerir las vías de reconexión, podría llamar a un programa de *FP* para checar que una vía en particular no causará una condición de sobrevoltaje. Si los resultados obtenidos indican un aumento excesivo de voltaje, el sistema experto modificaría la vía previamente recomendada para incluir un inductor ó suficiente carga para llevar el voltaje dentro de sus límites aceptables [9].

Mientras que muchos sistemas expertos fueron diseñados para una implementación en un ambiente en línea, es posible adaptarlos para aplicaciones de planeación operacional. Esto provee un vehículo conveniente para simular y evaluar rápidamente las estrategias de restauración, y para verificar que una restauración puede llevarse a cabo en una cantidad de tiempo razonable dentro de un escenario dado [9].

Las características de los sistemas expertos aplicados a la *RSEP* son las siguientes [9]:

- Estos sistemas funcionan como asistentes del operador, dejando al mismo como responsable de tomar otras decisiones importantes.
- Proveen un procedimiento sistemático para tomar rápidas decisiones en situaciones de presión y con una amplia gama de circunstancias relacionadas con el sistema.
- Razonamiento lógico con asistencia de algoritmos que pueden ser usados para identificar y darle prioridad a las acciones de control.
- Los sistemas expertos integrados dentro de *SME* tienen el potencial de reducir la cantidad de tiempo requerido para restaurar el servicio a todos los consumidores.
- Los sistemas expertos podrían también ser usados para planear y probar los procedimientos y estrategias de restauración.

Dentro de los periodos de restauración, los sistemas expertos pueden contribuir de la siguientes manera [12]:

1. En el primer periodo de restauración, los sistemas expertos juegan un papel significativo en la selección de la fuente inicial de suministro de energía. Los sistemas expertos tienen la capacidad de coordinar el suministro de energía eléctrica de acuerdo a los requisitos críticos en el siguiente orden de prioridad: (1) unidades tipo tambor y cierto tipo de cables (tipo pipa) especiales, (2) estaciones de transmisión y distribución, y (3) cargas industriales. Los sistemas expertos son capaces de utilizar *HA* de restauración para determinar las restricciones físicas en los subsistemas, por ejemplo, las fuentes iniciales de energía y los requerimientos de potencia. También son capaces de utilizar *HA* para restricciones en caso de eventos imprevistos. En la planeación de la *RSEP*, las *HA* evalúan las restricciones antes de cerrar circuitos, cambiando y ajustando las posiciones de los taps de los transformadores. Dentro de las *HA*, los programas de *FP* son usados para checar que no se violen los límites de voltaje y la capacidad de absorción de reactivos, así como los límites de flujo en las líneas y balance de potencia activa y reactiva entre generación y carga. Finalmente, en este periodo los sistemas expertos son capaces,

con base a las condiciones de *pre-disturbio* y *post-disturbio*, formar un conjunto de subsistemas. Además, facilitan el uso de ciertas acciones de restauración genéricas y obtener resultados por medio de las *HA* para desarrollar subsistemas imprevistos [12].

2. La función principal de los sistemas expertos en el segundo periodo es establecer vías entre todas las posibles vías que están en línea y todas las estaciones necesarias que se encuentran fuera de línea. Para ejecutar estas acciones, los sistemas expertos son capaces de sugerir vías seguras a las estaciones desenergizadas mediante líneas energizadas, determinando secuencias de cierre de líneas, checando restricciones, y si es posible, evaluando las vías alternativas. Los sistemas expertos son capaces de maximizar los subsistemas energizados para realizar la interconexión con el resto de los subsistemas, utilizando nuevamente *HA* para el análisis en línea en tiempo real. Además, interactuando con las herramientas analíticas serían capaces de considerar cuidadosamente los probables efectos de cada acción sobre el resto del sistema y sobre las subsecuentes medidas de restauración. *HA* como *FP* y programas de análisis de corto circuito pueden evaluar la carga en las líneas de transmisión, balance de potencia reactiva, condiciones de bajo-voltaje y sobre-voltaje, la carga en los generadores, selección de la posición de los taps en los transformadores, conexión de reactores y capacitores en derivación, determinación del ángulo de fase entre los generadores y los centros de carga, y ajustes en los relevadores y protecciones del sistema. Un importante requisito para los sistemas expertos en el segundo periodo es la restauración simultánea de varios subsistemas [12].
3. Los principales objetivos de los sistemas expertos en este periodo son: (1) Identificar las grandes unidades de generación térmicas incluyendo unidades tipo caldera, plantas nucleares y las unidades tipo tambor. (2) La energización de líneas de alto voltaje y extra alto voltaje manteniendo estabilidad en el sistema de transmisión. Finalmente, (3) activando interconexiones con los sistemas de potencia adyacentes. El sistema experto debe ser capaz de usar la capacidad de generación activa y reactiva para identificar su tipo de reinicio y operación óptima. La capacidad de generación activa y reactiva se basa en el tipo de turbinas, combustible usado en la generación, modos de operación, condiciones post-disturbio, y tiempos

de reinicio de los generadores. Los sistemas expertos deben ser capaces de utilizar la información de los generadores para: (1) programar el reinicio y sincronización de varios generadores para maximizar la cantidad de generación ó absorción activa y reactiva. (2) Coordinación de generación y carga entre la sincronización de las unidades y su remisión al operador del sistema de potencia. (3) Y mantener una adecuada reserva en la respuesta para evitar las pérdidas excesivas en generación. También deben los sistemas expertos junto con las herramientas analíticas ser capaces de estimar la respuesta de frecuencia de los generadores con respecto al incremento repentino de la carga, y determinar la estabilidad en estado estacionario y a pequeños y grandes disturbios [12].

2.8 Modelo Matemático de Restauración de S.E.P.

En esta sección se detallan las ecuaciones que describen el comportamiento de los *SEP*'s en la etapa restaurativa. Dicho modelo que a continuación se muestra, es básico para considerarse en el desarrollo de algunas de las *HA* antes mencionadas. Se tiene que el objetivo en el modelo matemático de *RSEP* es maximizar la capacidad del servicio a los consumidores. Esto es:

$$\max \sum_{k \in R} L_k y_k \quad (2.1)$$

Donde L_k es la carga en el nodo k , y_k es la variable de decisión que expresa su estado ($y_k = 1$): restaurado; $y_k = 0$: no restaurado) y R denota un conjunto de cargas desenergizadas [28].

Las restricciones típicas asociadas con el modelo de restauración son incluidas en este modelo. Estas principalmente son:

- 1) *Límite en la capacidad en las fuentes de potencia disponibles para la restauración.*

$$\sum_{e \in F_q} P_e x_e \leq G_q \quad (q \in S) \quad (2.2)$$

Donde P_e es el flujo de potencia sobre la rama e (en ella se asume que $P_e \geq 0$), x_e es la variable de decisión de la línea e ($x_e = 1$: e está incluida en la vía de restauración; $x_e = 0$: lo contrario), F_q es el conjunto de líneas con nodo de inicio q , G_q es la potencia de restauración del nodo energizado q , y S es el conjunto de nodos que pueden ser conectados al área des-energizada [11, 28].

2) *Balance de energía entre el suministro y la demanda.*

$$\sum_{k \in T_i} P_k - \sum_{k \in F_i} P_k - L_i y_i = 0 \quad (i \in N) \quad (2.3)$$

Donde T_i es el conjunto de líneas que inciden en el nodo i , F_i es el conjunto de líneas con origen en el nodo i , L_i es la carga en el nodo i , y_i es la variable de decisión que expresa su estado ($y_i = 1$): restaurada; $y_i = 0$: no restaurada), P_k denota el flujo de potencia sobre la rama k , y N es el conjunto de nodos del sistema.

3) *Límites de flujo de potencia en las líneas.*

$$|P_k| - UL_k \leq 0 \quad (k \in B) \quad (2.4)$$

Donde P_k denota el flujo de potencia sobre la rama k , UL_k la capacidad de la rama k , y B el conjunto de ramas factibles [11, 28].

4) *Restricción en la configuración radial.*

Cuando se trata de una configuración radial de la red, esta restricción se refiere al aseguramiento de que la red se mantendrá siempre radial, y esto se logra obligando a que el número total de ramas incidentes en el nodo i debe ser igual ó menor a la unidad [11, 28].

$$\sum_{k \in T_i} x_k \leq 1 \quad (i \in N) \quad (2.5)$$

Donde T_i es el conjunto de líneas que inciden en el nodo i , N es el conjunto de nodos del sistema, y x_k es el número total de ramas que inciden en el nodo k .

CAPITULO 3

Implementación de un *AG* en la *R.S.E.P.*

3.1 Introducción

Como ya se definió, el problema de la *RSEP* se describe como un problema de optimización del tipo multiobjetivo, multietapa, combinatorial, no lineal, entero, y con restricciones. Tal complejidad impide el desarrollo de un método genérico para determinar los controles restaurativos pertinentes. Para resolver este problema, se han formulado investigaciones con el fin de validar y automatizar los esquemas de restauración. Los métodos propuestos hasta ahora para automatizar el proceso incluyen; métodos a través de la aplicación de lógicas de restauración plural, sistemas basados en el conocimiento ó sistemas expertos, y métodos de programación matemática [10, 11, 17].

Las aplicaciones de lógicas de restauración combinadas, pertenecen a una clase de algoritmos de procedimiento-orientado, en los cuales los conocimientos y la experiencia de los expertos son orientados a procedimientos puros. Sin embargo, se tiene la desventaja en el complejo mantenimiento de la paquetería computacional debido a su escala y complejidad [29].

Los métodos basados en sistemas expertos se componen básicamente de una base de conocimiento y un instrumento de deducción. La separación de la base de datos del conocimiento con el procedimiento, ofrece un mantenimiento menos complejo del software comparado con los programas convencionales. Actualmente se utiliza en la operación de varios centros de control. En cierto grado, estas aproximaciones se consideran como exitosas en la solución de la problemática de restauración, sin embargo, este método no garantiza encontrar una secuencia óptima de restauración. Además, un sistema experto de gran escala, requiere un alto costo de mantenimiento [30].

Se ha sido estudiado el uso de la programación matemática en el problema de *RSEP* como una alternativa. Generalmente, el problema se formula como un problema de programación entera. Aunque este método ofrece una solución óptima bajo restricciones operacionales específicas, el tiempo de solución se excede del tiempo de cómputo razonable para un problema de gran escala, debido a la explosión combinatorial [31].

Como alternativa, se estudia la implementación de métodos de programación matemática en sistemas expertos, obteniéndose como resultado un reducido tiempo de cómputo, en comparación a los métodos de programación matemática convencionales. Sin embargo, se requiere del estudio de nuevas alternativas en la problemática de restauración [11].

Actualmente, en distintos centros de investigación y compañías de energía eléctrica en todo el mundo, se está buscando la implementación de técnicas de optimización inteligente y de búsqueda heurística, en la solución de diversos problemas de ingeniería eléctrica, debido a su robustez. Los resultados en distintas aplicaciones han sido exitosos, pues son de fácil implementación, aún para sistemas de gran escala con complejos modelos de representación [1].

La ventaja de los Algoritmos Genéticos se basa en su robustez y en la facilidad de su uso e implementación. Su perspectiva de búsqueda global lo hace capaz de encontrar una solución óptima global con una alta probabilidad [2].

3.2 Optimización del Proceso Restaurativo en el Estado Estacionario

La estrategia de optimización seleccionada consiste en energizar una red en etapas, y cada etapa corresponde al cierre de un interruptor y como consecuencia, la energización de un componente de la red tal sea el caso de un transformador, una sección de la línea, un reactor

en derivación ó una carga. Una secuencia completa de operaciones de interruptores se conoce como *escenario de restauración*. Cada cierre de interruptores crea una nueva topología de la red, un nuevo conjunto de voltajes, y un nuevo balance de potencia activa y reactiva. En cada etapa, es esencial que las magnitudes de voltaje nodal, y otros límites sean respetados. Por otra parte, durante las primeras etapas del proceso de restauración, mantener las magnitudes de voltaje dentro de los límites aceptables resulta ser difícil, porque tanto para condiciones de estado estacionario, como para grandes y pequeños disturbios, la red se encuentra con carga ligera ó muy ligera, por lo que la misma genera una excesiva cantidad de potencia reactiva, la cual crea altos voltajes. Para satisfacer los límites de voltaje, el operador puede ajustar las magnitudes de voltaje del generador, los taps de los transformadores, los reactores en derivación, y la cantidad de carga a restaurar. Esas cantidades, consideradas como variables de control, pueden ser estimadas por el operador [6, 32].

Como en cada etapa de restauración, el operador está sometido a un ambiente de presión, es preferible reducir el número de ajustes de las variables de control en cada etapa, tan bajo como sea posible. En esencia, una solución ideal, es una donde el conjunto de las variables de control en cada etapa se mantienen sin cambio durante las etapas subsecuentes. En este camino, el operador tiene, en la mayoría de los casos, solo una variable de control por ajustar en cada etapa. Se tiene que muchos ajustes no son aceptables en tiempo real, pues extienden innecesariamente el tiempo de restauración, y se incrementan los costos [6, 32].

Encontrar un control del voltaje del generador en la etapa cero, por ejemplo, que se mantuviera fijo durante las etapas subsecuentes, garantizando que todas las restricciones serán satisfechas para todas las etapas subsecuentes, no es una tarea trivial. El método de *restauración óptima multietapa* fué diseñado para simplificar la tarea de utilizar una aproximación a prueba y error del programa de *FP*, y maximizar la eficiencia operacional. Generalmente se usan subsistemas radiales para ilustrar el concepto, aunque puede usarse para cualquier tipo de sistema, pues su derivación no está basada en alguna suposición específica [6, 32].

El método de optimización que se describe a continuación, puede ser integrado en alguna paquetería computacional que sea utilizada como herramienta para estudios en estado estacionario de *RSEP*. Se ha probado que este algoritmo elimina la incertidumbre que ofrecen métodos convencionales de restauración [6, 32].

3.2.1 Ecuaciones de Flujo de Potencia

Las condiciones de operación de un *SEP* pueden ser descritas por dos tipos de ecuaciones como se mencionó en la sección 2.1; Las *restricciones de igualdad ó de Carga* (ó de flujo de carga), y las *restricciones de desigualdad ó de Operación* (ó límites del sistema). Las restricciones de flujo de carga determinan que la demanda de carga del consumidor debe ser satisfecha. Mientras que las restricciones de límites del sistema reflejan que las variables del sistema deben estar siempre dentro de los rangos que las limitaciones físicas del equipo permitan [1, 12, 26].

En cada k -ésima etapa, las ecuaciones de equilibrio de la red (ecuaciones de *FP*) pueden ser escritas cómo:

$$F_k(X_k, U_k) = 0 \quad (3.1)$$

Donde X_k representa las magnitudes del voltaje nodal y los ángulos de fase en la etapa k , mientras que U_k representa las variables controlables en la etapa k . (por ejemplo, voltajes del generador, cargas, e inductancias en derivación)

La dimensión de los valores de X_k y U_k varían con la etapa. Para cada nueva sección de la línea reenergizada, X_k se incrementa dos elementos correspondientes a las nuevas magnitudes de voltaje y ángulo de fase, y el valor de todos los demás elementos cambian debido a que ahora se tiene una nueva topología de la red y un nuevo conjunto de ecuaciones de *FP*. Si la nueva etapa resulta de la energización de una carga ó de un reactor en derivación, la dimensión de U_k cambia con la adición de la nueva variable de control. En éste caso, X_k , cambia en valor pero no en dimensión, así como también, el número de ecuaciones de *FP* permanece igual. La representación matemática de la m -ésima etapa del proceso de restauración es sin embargo gobernado por m ecuaciones de *FP*.

3.2.2 Restricciones de Operación

Para garantizar que en cada etapa, todos los límites de potencia y magnitudes de voltaje sean respetados, se implementa un número de restricciones de desigualdad. Estas toman la forma de:

$$G_k (X_k, U_k) \geq 0 \quad \forall \quad k \quad (3.2)$$

Donde X_k representa las magnitudes del voltaje nodal y ángulos de fase en la etapa k , mientras que U_k representa las variables controlables en la etapa k , como se describió en la ecuación (3.1). Esta ecuación representa el hecho de que se debe satisfacer los límites en voltajes nodales, potencias real y reactiva de los generadores, las cargas, la inductancia de los reactores en derivación, todo esto en la etapa k .

3.2.3 Función Objetivo

El criterio de optimización seleccionado para medir la ejecución del proceso de restauración durante varias etapas esencialmente expresa las desviaciones de voltaje nodal del perfil prescrito. Como se detalló en esta sección, durante cada etapa del proceso de restauración, lo ideal es mantener constantes las magnitudes de las variables de control y las magnitudes de los voltajes nodales de una etapa a otra [6, 32]. Esto es:

$$V_{ij} = V_{kj} \quad (3.3)$$

Donde:

V_{ij} = Magnitud de voltaje para el bus j en la etapa i .

V_{kj} = Magnitud de voltaje para el bus j en la etapa $k = i + 1$.

Sin embargo, esto resulta prácticamente imposible pues la topología de la red cambia de una etapa i a una etapa k . En tal caso, lo deseable es minimizar las desviaciones de voltaje nodal de un perfil de referencia determinado. Esto es:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{Ni} (V_{ij} - V_{REF}) \quad (3.4)$$

Donde:

- N_i = Número de nodos en la etapa i .
- M = Número de etapas en la secuencia de restauración.
- V_{REF} = Voltaje de referencia ó del perfil prescrito

Como las desviaciones de voltaje no son de igual importancia para todos los nodos en diferentes etapas, se introducen factores de peso para fortalecer donde más se requiere, por ejemplo, en los buses de carga.

Se ha encontrado en las referencias, que una función cuadrática de las desviaciones de voltaje del perfil de voltaje deseado, ofrece resultados satisfactorios para mantener estabilidad en el proceso [6, 32]. Por consiguiente, la *función objetivo (FO)* es:

$$FO = \text{Min} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} W_{ij} (V_{ij} - V_{REF})^2 \quad (3.5)$$

Donde:

- W_{ij} = Factor de peso para el bus j en la etapa i .

3.3 Variables de Control para el Algoritmo Genético

El *AG* toma como variable de control, la magnitud del voltaje de generación. En este caso, se escogen como candidatos, aquellos nodos que mantengan la estabilidad del sistema de tal manera que minimicen las desviaciones de la magnitud de voltaje en los nodos. Se desea que el voltaje de generación se mantenga dentro de sus límites, y que se mantengan las restricciones del sistema en sus respectivos rangos. Se tiene que:

$$\text{Variables del sistema} = [V_1, V_2, \dots, V_{gen}] \quad (3.6)$$

Donde:

- gen = Número de nodos de generación.

V = Variable que contiene la información de magnitud de voltaje en p.u. (variable de control).

Características de V :

- Variable aleatoria.
- Rango: $V_i \in [V_{\min} \dots V_{\max}]$ en p.u.

En la ecuación (3.6) se requiere analizar una gran cantidad de combinaciones posibles, donde no todas ellas convergen, por lo que la búsqueda del óptimo global es tediosa. Sin embargo, el *AG* solo escoge las combinaciones posibles de nodos participantes con su respectivo valor aleatorio entre $[V_{\min} \dots V_{\max}]$, y posteriormente, asigna los valores máximos y/o mínimos adecuados a V en los nodos en caso de ser necesario (Solo si se vencen restricciones. Sección 2.7).

Para la carga a ser restaurada, se escogerán como candidatas aquellas líneas que estén conectadas con algún nodo energizado en alguno de sus extremos, y que participen con la menor desviación del voltaje nodal. Con esto, se espera que se restauren las cargas más pequeñas en las primeras etapas de la restauración mientras se alcanza la potencia de generación, y posteriormente, en cuanto se tenga mayor potencia de generación, se restaure el resto del sistema minimizando así el tiempo de restauración.

Se asignarán los parámetros del *AG* como son: tamaño de la población, número máximo de generaciones, cruzamiento con dos descendientes por apareamiento, y mutación.

3.4 Función de Habilidad

La *Función de Habilidad (FH)* actúa como interfase entre los *AG's* y el problema de optimización. Los *AG's* son generalmente diseñados para maximizar una *FH* la cual es una medida de la calidad de cada candidato a solución. En este caso, el objetivo es minimizar las desviaciones de voltajes nodales en cada etapa del proceso de restauración. Por lo tanto, la *FH* es la siguiente [2]:

$$FH = \max \left(\frac{A}{\sum_{i=1}^{N_D} W_i (V_i - V_{REF})^2} \right)^2 \quad (3.7)$$

Donde N_D es el número de nodos participantes, V_i es la magnitud de voltaje en el nodo participante i , V_{REF} es el voltaje de referencia, W_i es el factor de peso para el bus en la etapa i , definido en la ecuación (3.5). Y la constante A , es una constante de sintonización. Esta constante de sintonización es importante pues ayuda a aumentar la velocidad y eficacia con la que el *AG* obtiene la solución óptima, principalmente cuando se trata de redes de gran escala. Esta constante se determina dependiendo de los parámetros del *AG*. No puede ser pequeña pues retardaría el proceso para obtener el óptimo global, pero tampoco puede ser grande pues se tiene el riesgo de oscilar alrededor de una solución y caer en un óptimo local. Para determinar esta constante se requiere de un análisis previo, que depende exclusivamente de los parámetros del sistema en estudio, la cantidad de variables de control que se manejen, y de los parámetros mismos del *AG* como el tamaño de la población.

De la ecuación (3.7), se tiene que el denominador toma la forma de la *FO* (3.5). La diferencia es que la *FH* trata de minimizar la desviación de los voltajes nodales del perfil prescrito en cada etapa. En general, el *AG* propuesto *busca minimizar las desviaciones de voltaje nodal en cada una de las etapas del análisis del proceso de restauración*, por lo que al completar una secuencia, se satisface la *FO*.

3.5 Representación del Algoritmo Genético

Para representar los valores de la variable de control V_{gen} en la representación computacional, se utiliza un vector binario (llamado *cromosoma*) para cada nodo de generación. La longitud de la cadena binaria para cada individuo se expresa en la figura 3.1.

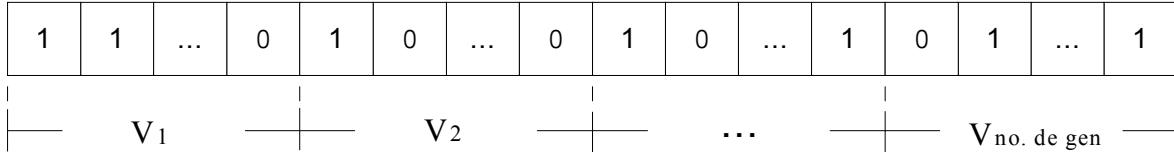


Figura 3.1.- Representación de las variables de control mediante una cadena de bits.

El mapeo de una cadena binaria dentro de un número real V de rango $[V_i^{min} \dots V_i^{max}]$ se expresa de acuerdo a la ecuación (3.8).

$$V_i = V_i^{min} + (V_i^{max} - V_i^{min}) * K \tag{3.8}$$

Donde K es el número decimal entre 0 y 1, para el cual el número binario en un cromosoma es decodificado, V_i es la magnitud de voltaje en el nodo participante i , V_i^{min} es el límite de magnitud de voltaje mínimo en el nodo participante i , y V_i^{max} es el límite máximo de magnitud de voltaje en el nodo participante i , [33].

3.5.1 Población Inicial

La población inicial de soluciones se crea aleatoriamente dentro del rango definido para cada nodo de generación, con un número dado de posibles soluciones y su capacidad de minimizar la desviación en los voltajes nodales del perfil preescrito.

Un gran tamaño de la población significa la manipulación simultanea de muchas soluciones, lo cual incrementa el tiempo de cómputo por iteración. Sin embargo, como hay muchas muestras en el espacio de búsqueda, la probabilidad de que el algoritmo converja en una solución óptima global es mayor que usando un tamaño de población pequeño. El

tamaño de la población se mantiene constante de generación a generación hasta finalizar el proceso.

El tiempo de cómputo para determinar la solución óptima va en proporción con el número de posibles soluciones. En el apéndice A (Ecuación A.1), se describe el criterio más común para determinar el tamaño de población. Para las redes de prueba, se utilizó una población inicial de 100 individuos [2, 4].

3.5.2 Operadores Genéticos

El *AG* simple empleado en esta tesis presenta tres operadores genéticos que son: *selección*, *cruzamiento* y *mutación*.

3.5.2.1 Selección

El procedimiento de selección se realiza con el método de *la rueda de la ruleta* cuyos detalles se profundizan en el apéndice A. Este método garantiza que solo los individuos con mayor habilidad sean seleccionados para aparearse y formar la próxima generación.

3.5.2.2 Cruzamiento

El cruzamiento se realiza a dos puntos escogidos aleatoriamente dentro del cromosoma para obtener dos descendientes por apareamiento. El cruzamiento se describe con detalle en el apéndice A.

Se considera a este operador como la diferencia entre los *AG's* y la programación dinámica. Aleatoriamente se escoge una cantidad de bits que serán cambiados por otra cantidad de bits de otro cromosoma, y así sucesivamente hasta completar el número de individuos de la población. De acuerdo a las referencias, se recomienda que el cruzamiento se realice con una probabilidad de 0.6. [2, 34].

3.5.2.3 Mutación

La mutación es la operación que obliga al algoritmo a realizar búsquedas en nuevas áreas, y al igual que el cruzamiento, se realiza de manera aleatoria. Esto es que algún bit del cromosoma, escogido aleatoriamente, cambia su valor. Para mas detalles acerca de la mutación, ver el apéndice A.

Este proceso se realiza, sí y solo si, la mutación mejora la habilidad del individuo. En caso contrario, no se realiza la mutación. Este paso se repite para cada uno de los cromosomas hasta completar el número de individuos en una generación determinada. La probabilidad de que ocurra una mutación es del inverso del tamaño de la población, que de acuerdo a las referencias proporciona buenos resultados. Este proceso tiene la finalidad de evitar convergencias prematuras [2, 3, 4].

El procedimiento de la mutación se muestra en la figura 3.2.

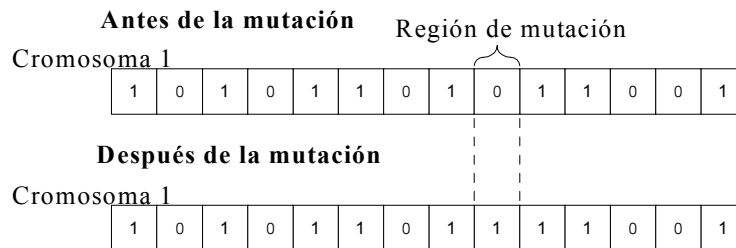


Figura 3.2.- Esquema que muestra el procedimiento de mutación.

La región de mutación se escoge aleatoriamente.

3.5.3 Parámetros del Algoritmo Genético

Los parámetros de control más importantes del *AG* simple son, el tamaño de la población (número de individuos de la población), el número máximo de generaciones, la probabilidad de cruzamiento, y la probabilidad de mutación [34].

El tamaño de la población se mencionó en la sección 3.5.1. Para asegurar obtener una solución óptima es necesario fijar un tamaño de la población que vaya en proporción a la cantidad de variables de control que maneje el algoritmo genético como se mencionó en la sección anterior. Con un reducido tamaño de población, el método de selección fracasa

debido a que en las primeras generaciones se copian varias veces los individuos más hábiles, y podría dominar rápidamente la población y como consecuencia limitar la solución a un óptimo local. Esto no es ningún problema si se cuenta con un procesador digital de los más recientes en el mercado. Esto asegura obtener una solución óptima. Se sugiere utilizar una población lo suficientemente grande de acuerdo a la longitud de la cadena de bits como para crear una diversidad de posibles soluciones.

El número máximo de generaciones se refiere al número máximo de iteraciones efectuadas para detener el procedimiento de búsqueda y determinar la solución óptima. Si el número máximo de generaciones es alto, igualmente se incrementa el tiempo de cómputo por generación, pero hay precisión en la obtención de la solución óptima. Pocas generaciones, se traduce en la localización de una solución óptima local.

La probabilidad de cruzamiento determina la frecuencia con la que ocurre la operación de cruzamiento. La probabilidad ó porcentaje de cruzamiento es de utilidad en la búsqueda del óptimo para descubrir una región de solución prometedora. Una baja probabilidad de cruzamiento disminuye la velocidad de convergencia en una determinada área de búsqueda. Si la probabilidad es muy alta, se producirá una saturación alrededor de la solución y oscilará alrededor de ella.

La probabilidad ó porcentaje de mutación controla la frecuencia con la que ocurre la operación de mutación. La probabilidad ó porcentaje de mutación controla la operación de mutación. Una alta probabilidad de mutación establece una alta diversidad en la población y generalmente causa inestabilidad. Por otra parte, es muy complicado para el *AG* encontrar una solución óptima global, con un porcentaje de mutación muy bajo [34].

3.6 Algoritmo para *R.S.E.P.* utilizando un *AG*

El diagrama de flujo que representa la implementación de un *AG* en la *RSEP* en estado estacionario se ilustra en la figura 3.3 Para más detalles acerca de la descripción del programa utilizado para la simulación, ver el apéndice E.

En general, se verifica primeramente la condición post-disturbio del sistema. Se determina la disponibilidad de generación, los elementos desenergizados, las cargas que se requieren restaurar, y las vías de transmisión viables a participar en cada etapa de la secuencia. Se crea una población inicial de posibles soluciones, y se obtienen los datos del modelo en estado estacionario. De aquí, por cada individuo de la población, se obtienen los datos de voltajes en nodos de carga y generación de reactivos en las fuentes, para posteriormente evaluar la habilidad de cada uno. Se evalúa despacho de potencia activa para incluir restricciones en las líneas de transmisión. Después de evaluar la habilidad de cada uno de los individuos de la población inicial, pasan los operadores genéticos de selección, cruzamiento, y mutación.

Se realiza la codificación de valores reales a cadenas binarias para ser manipuladas las variables de control en los operadores de cruzamiento y mutación. Se repite este ciclo hasta satisfacer un número máximo de generaciones como se ilustra en la figura 3.3. Con esto se tendrá un individuo, que contiene la información de las variables de control, que optimizan la función de habilidad. Finalmente se evalúa nuevamente la habilidad de este individuo y se almacena el resultado. Lo mismo se hace con el resto de las líneas que se encuentran en la vía de restauración y que satisfacen el modelo matemático de restauración.

Cuando se completa el total de las líneas factibles, se compara la habilidad de todas y se elige a aquella que tenga mayor habilidad. Se energiza la línea elegida, y en caso de que en algunos de sus extremos tenga un nodo desenergizado, se energiza dicho nodo con su respectiva carga. Todo esto equivale a una etapa del proceso de restauración. Finalmente se actualizan el sistema con la línea y la carga recién energizada, y se analizan las nuevas vías posibles de restauración para repetir nuevamente el proceso.

El diagrama de flujo que representa a un *AG* simple se ilustra en la figura A.1, dentro del apéndice A. En la figura 3.3 se muestra el diagrama de flujo que representa al algoritmo propuesto en ésta Tesis como herramienta para la *SEP* en estado estacionario.

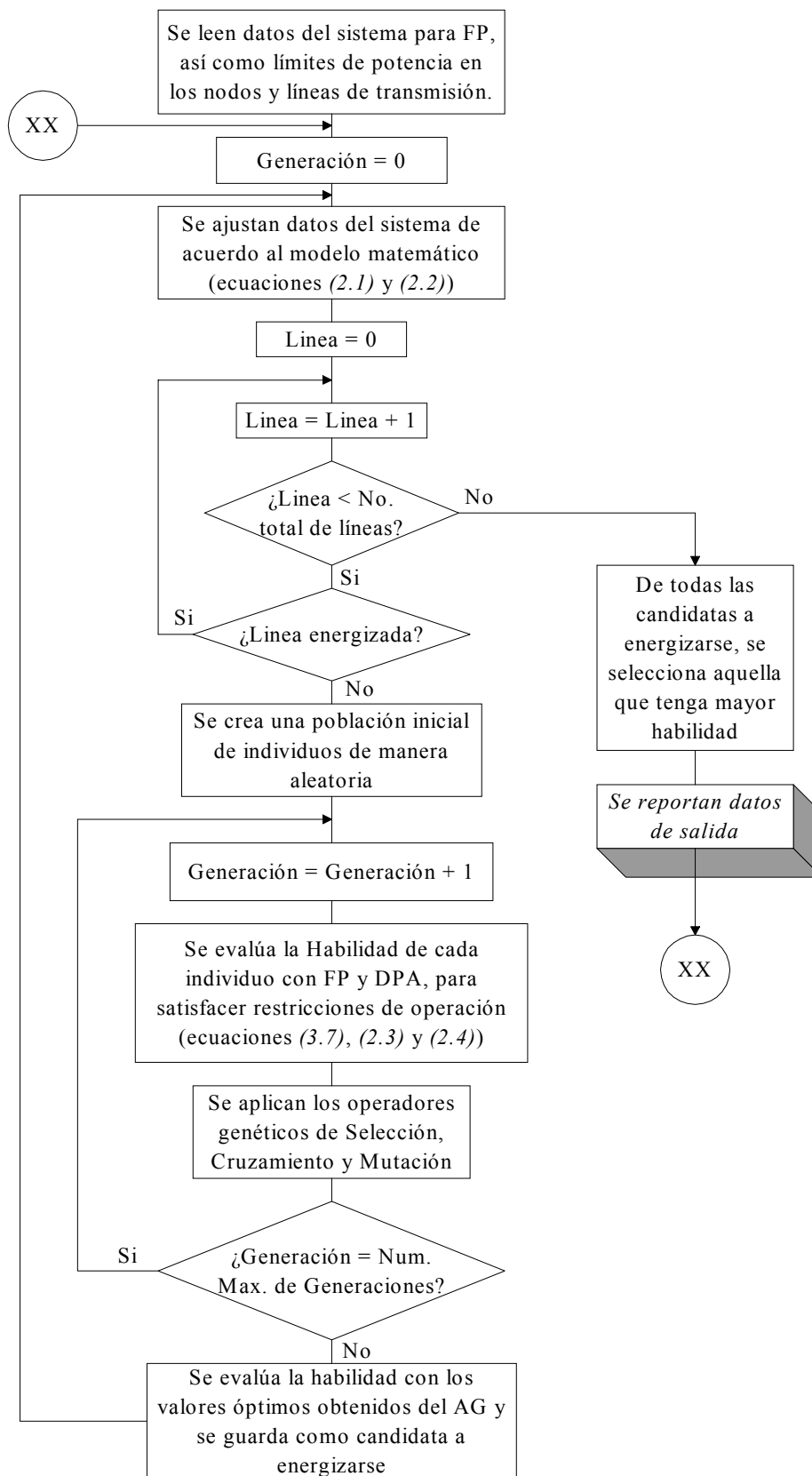


Figura 3.3.- Diagrama de flujo de un AG implementado al análisis de la RSEP en estado estacionario.

CAPITULO 4

Pruebas y Resultados

4.1 Introducción

El escenario común posterior a un disturbio, durante un estado de extrema emergencia, es una caída de una parte, área, ó porción importante del sistema. Cómo ya se describió en el capítulo 2, se requiere de un *AEE* como parte de un plan de *RSEP*, con el fin de determinar una secuencia segura.

Por lo tanto, para validar la herramienta propuesta en esta tesis, se llevaron a cabo unas simulaciones sobre tres distintas redes de prueba, considerando primeramente un análisis convencional con la ayuda del programa de *FP* y una rutina de *DPA*, buscando obtener una secuencia de restauración segura en un estado estacionario.

En la sección 4.3, se describen los resultados obtenidos de un análisis implementando un *AG* simple, tal y como se describió en el Capítulo 3, dentro de una herramienta computacional que ayuda a determinar un análisis aplicando la estrategia de restauración descrita en la sección 3.2. La estrategia de restauración seleccionada es restaurar por etapas, donde cada etapa comprende la energización de un elemento de la red (ecuaciones (3.1) y (3.2)). Tal y como se describió en el capítulo 3, se busca optimizar una *FH* que garantice la estabilidad del sistema durante toda la secuencia restaurativa (ecuación (3.7)). La rutina de *FP* y la rutina de *DPA*, además de ayudar a determinar un balance de potencia activa y reactiva, control de voltaje nodal, y límites térmicos en líneas de transmisión, ayuda a evaluar la *FO* establecida en la sección 3.2 (ecuación (3.5)). Por lo tanto, dichas rutinas se implementaron como parte de la herramienta propuesta. Se espera que la implementación del *AG* ayude a establecer de manera confiable un análisis del proceso restaurativo en estado estacionario, optimizando una *FH* determinada previamente, en un tiempo de

cómputo muy breve en comparación al método heurístico de validación. Se realizarán algunas pruebas variando los parámetros del *AG*.

En la sección 4.4 se realizaron diferentes pruebas variando algunos de los parámetros del *AG* que se implementó en este trabajo, y se compararon los resultados obtenidos.

Por otra parte, en la siguiente sección, se realizó un *AEE* de forma heurística, a prueba y error, utilizando como herramienta principal el programa de *FP*, y como herramienta auxiliar la rutina de programación lineal para *DPA*. Los criterios utilizados en esta tesis para determinar de manera heurística una secuencia se basan en las estrategias y características que se mencionaron en el capítulo 2, como lo es balance de potencia activa y reactiva, control de voltaje nodal, límites térmicos en líneas de transmisión, y restauración de las cargas más pequeñas en las primeras etapas mientras se alcanza la potencia máxima de generación. La estrategia de restauración seleccionada es la que se describió en la sección 3.2 (ecuaciones (3.1) y (3.2)). Esto se obtiene variando las magnitudes de voltaje de generación y potencia real suministrada por los generadores con base en el conocimiento previo del sistema, mientras que la posición de los taps en transformadores y las reactancias en derivación varían solo si es necesario. Sin embargo, de preferencia, se busca que se mantengan constantes en su posición durante todo el análisis hasta obtener la estabilidad del sistema en cada etapa.

Para efectos de simulación, se consideró como una etapa, específicamente la energización de una línea de transmisión. En cada etapa, todas las líneas factibles tienen posibilidades de restaurarse. La línea que se eligió como mejor opción para restaurar, energiza a su vez al nodo para el cual incide potencia. Por otra parte, se busca satisfacer la *FO* (ecuación (3.5)) con el fin de obtener control de voltaje y estabilidad en el sistema. Este procedimiento se ejemplifica mejor en la siguiente sección.

Para comparar los resultados de dichas pruebas se obtiene la *FO* (ver ecuación (3.5)) en cada secuencia de restauración. Sea la *FO*:

$$FO = \text{Min} \sum_{i=1}^M DV_M \quad (4.1)$$

Donde M es el número de etapas en la secuencia, y DV es el índice de comportamiento, ó sea, la función cuadrática de las desviaciones de voltaje del perfil de voltaje deseado, ó lo que es lo mismo, el denominador de FH (ecuación (3.7)). Esto es:

$$DV = \sum_{i=1}^{N_D} W_i (V_i - V_{REF})^2 \quad (4.2)$$

Donde N_D es el número de nodos participantes, V_i es la magnitud de voltaje en el nodo participante i , V_{REF} es el voltaje de referencia, y W_i es el factor de peso para el nodo i , (definido en la ecuación (3.5)). En cada etapa M , se desplegó una tabla con los valores obtenidos para la mejor opción, determinada por su respectivo análisis. Además, se desplegó el valor del índice de comportamiento DV_M , con el fin de comparar los resultados del AEE convencional seleccionado, con el AEE con AG implementado para optimizar la solución.

De acuerdo a las referencias, el criterio de optimización seleccionado ha dado buenos resultados en diversas aplicaciones, pues la prioridad en esta estrategia es mantener la estabilidad del sistema durante toda la secuencia, guardando los límites de seguridad y operación, maximizando la carga a energizar.

La primera red de prueba, es una pequeña red mallada, cuyos datos de red se muestran en la referencia [41], y en la sección D.2 de esta tesis, sirve para ilustrar el análisis paso a paso en la forma convencional. Para este caso se realizó un análisis teniendo solo un nodo energizado disponible.

La segunda red es una red de prueba de 14 nodos cuyos datos eléctricos se encuentran en la referencia [45]. Los datos completos para FP de esta red simplificada se encuentran en la sección D.3 de esta tesis. En esta red, se consideró restaurar una parte de dicho sistema, el cual incluye transformadores y reactancias en derivación.

La tercera red de prueba es una red de 28 nodos simplificada, que forma parte del Sistema nacional eléctrico mexicano. Los datos de esta red para *FP* se muestran en la sección D.4 de esta tesis, y en la referencia [46].

4.2 Análisis de Restauración de Manera Heurística

A continuación se presentan las pruebas y los resultados obtenidos de un análisis heurístico, que se puede definir para esta Tesis como una manera convencional, utilizando *FP* y una rutina interna de programación lineal para simular *DPA*. De forma analítica, a prueba y error, y con base en un conocimiento previo del sistema de prueba, se definirá la mejor secuencia de restauración.

Con las consideraciones descritas en la sección anterior, se realizó un análisis para cada una de las tres redes de prueba seleccionadas en esta tesis. Primeramente. El primer análisis se realizó sobre la red de cinco nodos de *Stagg* [41], caso en el que, además se aprovechó mostrar de forma didáctica el análisis realizado, y la justificación de la secuencia de restauración determinada. Los análisis subsecuentes fueron sobre las redes de 14 y 28 nodos respectivamente [45, 46].

4.2.1 Red de prueba de 5 nodos

Para ilustrar el procedimiento convencional utilizado, se utilizó como primera prueba, la red de 5 nodos cuyos datos completos del sistema se encuentran en el apéndice D de esta tesis (sección D.2) y en la referencia del libro de *G. Stagg y El-Abiad* [41]. Esta red se compone de 5 nodos y 7 líneas de transmisión, con dos nodos de generación. Se simplifica a un sistema sin elementos en derivación y ni transformadores. El diagrama de la red se ilustra en la figura 4.1 [41].

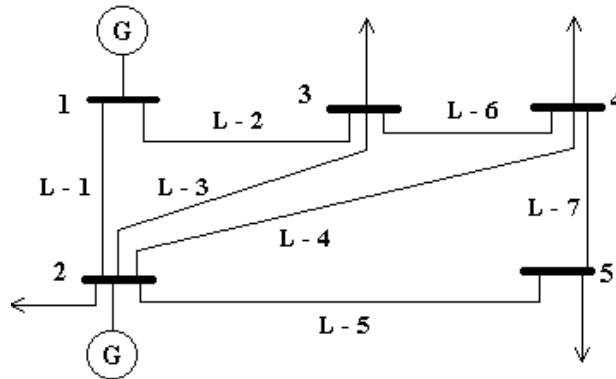


Figura 4.1.- Diagrama unifilar de la red de prueba de 5 nodos.

Para ejemplificar mejor una secuencia de restauración convencional, se determina cual es el estado del sistema post-disturbio. Para este caso, por ser una red pequeña, y para fines didácticos, para esta tesis se inició una secuencia con solo un nodo de la red energizado, y todas las líneas de transmisión sin energía.

De acuerdo a la figura 4.1, las líneas a restaurar son las líneas; L - 1 (nodo 1 a nodo 2), L - 2 (nodo 1 a nodo 3), L - 3 (nodo 2 a nodo 3), L - 4 (nodo 2 a nodo 4), L - 5 (nodo 2 a nodo 5), L - 6 (nodo 3 a nodo 4) y L - 7 (nodo 4 a nodo 5). Al requerirse disponibilidad de generación, se consideró como energizado solo el nodo de generación 1.

Para obtener el índice de comportamiento DV , se utilizó un factor de peso W_i de 0.3 para nodo de generación y 1.0 para nodo de carga. El voltaje de referencia V_{REF} es de 1.0.

Se tienen dos posibilidades de restauración, que son la línea L - 1 y la línea L - 2. Se realizó en primer análisis sobre las dos líneas factibles con posibilidad de restaurarse, y se tienen las siguientes observaciones como resultado de dicho análisis.

- Primeramente, al pensar en restaurar la línea L - 1, se tiene que el nodo de carga al cual suministra energía es un nodo de 20 MW, mientras que la línea L - 2 suministra a un nodo de 45 MW. En términos de $RSEP$, es conveniente restaurar la carga menor en lo que se alcanza el nivel máximo de generación deseado.

- Por otro lado, al analizar el sistema con la línea L – 2, se observa que la magnitud de voltaje en el nodo de carga decae considerablemente en comparación con el caso de la línea L – 1. Para este caso, se requiere elevar el voltaje de generación, lo cual, no es conveniente en las primeras etapas del proceso.
- Después de probar con distintas magnitudes de voltaje de generación para ambos casos, se tiene que con la L – 1 se satisface la primera etapa de la FO.

Después de un AEE para la primera etapa de restauración, se concluyó que la mejor opción es la de energizar la línea 1 y restaurar la carga del nodo de carga 2 con un voltaje de generación de 1.006 p.u., pues es la magnitud que mejor satisface la FO. En la tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos del programa de FP.

Tabla 4.1. Magnitudes nodales para la primera etapa de restauración de la red de 5 nodos restaurando la línea L – 1

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0060	0.000	20.024	4.167	0.0	0.0
2	0.9978	-0.6036			20.0	10.0
$DV_1 = 0.01753 \times 10^{-3}$						

Donde, de acuerdo a la nomenclatura:

- ND = Número de nodo.
- V = Magnitud de voltaje en p.u.
- ANG = Magnitud del ángulo de fase.
- PG = Potencia real de generación en MW.
- QG = Potencia reactiva de generación en MVA.
- PC = Potencia real de demanda en MW.
- QC = Potencia reactiva de demanda en MVA.

A continuación en la siguiente tabla, similar a la tabla 4.1, se muestra los resultados obtenidos con la línea L – 2, con un voltaje de generación idéntico al de la tabla 4.1.

Después de un análisis similar al de la línea L – 1, se tiene que además de que se requiere mayor potencia de generación para el segundo caso, también se tienen mayores pérdidas, mayor desfaseamiento del ángulo de fase, y por consecuencia, un valor mayor del índice de comportamiento DV_1 , lo que se traduce en una mayor desviación de voltaje del perfil prescrito.

Tabla 4.2. Magnitudes nodales para la primera etapa de restauración de la red de 5 nodos restaurando la línea L - 2

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0060	0.000	46.981	16.35	0.0	0.0
3	0.9287	-5.9994			20.0	10.0
$DV_1 = 5.1014 \times 10^{-3}$						

Por otra parte, en las líneas de transmisión se mantienen los límites de flujos de potencia en el sistema gracias a la rutina de *DPA*. Los flujos de potencia obtenidos con la línea L - 1, se ilustran en la tabla 4.3. En caso de sobrepasarse el flujo de potencia en alguna línea, la rutina de *DPA* manda tirar la cantidad de carga necesaria en algún nodo de carga que satisfaga los límites de potencia en la red. Pero para este caso, se satisfacen las restricciones en líneas de transmisión.

Tabla 4.3. Flujos de potencia en líneas de transmisión para la primera etapa de restauración de la red de 5 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	20.0236	4.1666
L - 1	2	1	-19.9341	-9.9209

Donde, de acuerdo a la nomenclatura:

Lin = Número de línea.

NS = Nodo de salida de flujo de potencia.

NE = Nodo de entrada de flujo de potencia.

P = Flujo de potencia real en la línea de transmisión en MW.

Q = Flujo de potencia reactiva en la línea de transmisión en MVAR.

Al integrarse el nodo 2, la generación en ese nodo entra en sincronía con el resto del sistema, y se consideró a partir de la segunda etapa como un nodo de generación.

A continuación, para la segunda etapa, las posibilidades son energizar las líneas L - 2, L - 3, L - 4, y L - 5. Se realizó un análisis nuevamente para cada una de las posibles líneas a restaurar antes mencionadas, con diferentes magnitudes de voltaje en nodos de generación, para cada caso.

De este análisis se concluyó que la mejor opción es energizar la línea L - 4 pues absorbe menos energía de todas las posibilidades factibles, y por consecuencia, representa la menor de las cargas a energizar mientras se alcanza la máxima potencia de generación.

Las magnitudes de voltaje para los nodos de generación 1 y 2 se concluye que sean de 1.015 y 1.013 en p.u., respectivamente, pues representan el mejor índice de comportamiento. La segunda etapa del proceso se representa en magnitudes nodales en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. Magnitudes nodales para la segunda etapa de restauración de la red de 5 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0150	0.000	41.793	-12.911	0.0	0.0
2	1.0130	-1.4923	20.002	21.829	20.0	10.0
4	0.9803	-5.5428			40.0	5.0
$DV_2 = 0.52415 \times 10^{-3}$						

Nuevamente, cabe destacar que esta conclusión se obtuvo después de haber analizado cada línea factible a restaurarse, y con distintas magnitudes en sus variables de control.

Después de dos etapas en la secuencia analizada, se tienen los dos generadores integrados al sistema y se satisface el 37% de la demanda total, manteniendo al sistema en condiciones de seguridad y operación. El sistema en su estado estacionario se encuentra estable, y se satisface la demanda en los nodos de carga 2 y 4. Se restaura la menor cantidad de carga, mientras se espera que se suministre la cantidad de potencia necesaria en los generadores disponibles del sistema.

La configuración de la red y el flujo de potencia en las líneas de transmisión del sistema después de dos etapas de restauración, en la que se encuentran energizados 3 nodos y 2 líneas, se ilustran en la figura 4.2 y la tabla 4.5.

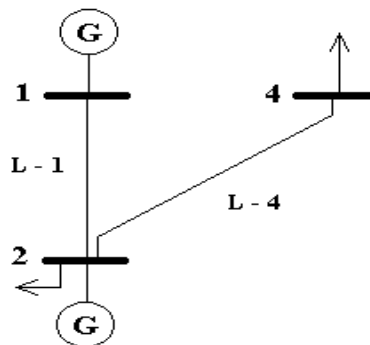


Figura 4.2. Configuración de la red de 5 nodos después de la segunda etapa de restauración.

Tabla 4.5. Flujos de potencia en líneas de transmisión después de la segunda etapa de restauración de la red de 5 nodos.

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	41.3534	-12.9108
L - 1	2	1	-41.0028	7.7937
L - 4	2	4	41.0009	4.0354
L - 4	4	2	-39.9963	-4.9962

Ahora en la tercera etapa las posibilidades en la segunda etapa son energizar las líneas L - 2, L - 3, L - 5, L - 6, y L - 7. Para este caso se puede suponer energizar la línea L - 2 debido a que es la que menos carga representa de todas las alternativas que quedan. Sin embargo, dentro del análisis realizado, esta acción se traduciría en tener que elevar demasiado el voltaje de generación, ó bien, en alimentar la carga del nodo 3 con un voltaje muy cercano a su límite inferior. Por lo tanto, la siguiente opción, y la mejor, fué energizar la línea L - 5, y suministrar energía al nodo 5. A continuación se describen los resultados para la tercera etapa del AEE. La etapa 3 se ilustra en las tablas 4.6 y 4.7. Para la tercera etapa se energizó la línea 5 con magnitudes de voltaje de 1.032 y 1.008 en los nodos de generación 1 y 2 respectivamente, pues estos valores obtienen una buena respuesta en el índice de comportamiento DV_3 , maximizando así la carga a restaurar, y manteniendo los voltajes en nodos de carga cercanos al V_{REF} .

Tabla 4.6. Magnitudes nodales para la tercera etapa de restauración de la red de 5 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0320	0.000	63.408	17.866	0.0	0.0
2	1.0080	-1.8638	60.000	4.252	20.0	10.0
4	0.9751	-5.9556			40.0	5.0
5	0.9702	-5.8838			60.0	10.0
$DV_3 = 1.88997 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.7. Flujos de potencia en líneas de transmisión después de la tercera etapa de restauración de la red de 5 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	63.408	17.8662
L - 1	2	1	-62.5696	-21.5942
L - 4	2	4	41.0106	4.1079
L - 4	4	2	-39.9952	-4.9954
L - 5	2	5	61.5521	11.7386
L - 5	5	2	-59.9913	-9.9923

Después de la tercera etapa, se satisface el 73% del total de la demanda en el sistema, operando este en forma segura. En caso de que no se cumpliera alguna condición, se tiraría carga en algún nodo de la red hasta que el sistema cumpla con todas las restricciones. Esto sería determinado por la rutina de *DPA*. En la figura 4.3 se muestra el diagrama unifilar del sistema energizado después de tres etapas.

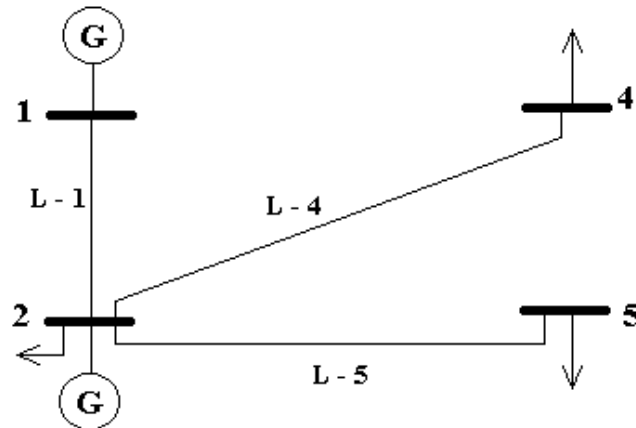


Figura 4.3. Configuración de la red de 5 nodos después de la tercera etapa de restauración

Para la cuarta etapa, se requiere como prioridad, integrar la carga del nodo 3, por lo que se toman tres opciones. Y sería energizar la línea $L - 2$, $L - 3$, ó la línea $L - 6$. De acuerdo a un análisis, la mejor opción es la línea $L - 2$. Con la línea $L - 3$, se requiere aumentar el voltaje de generación para evitar tener bajo voltaje en el nodo de carga 3. Además, se tiene un aumento en los ángulos de fase. Si se energizara la línea $L - 6$, se tendría el mismo caso, peor aún. Al energizar la línea $L - 2$, el ajuste en las variables de control es nulo, lo cual es favorable, y además se reduce el ángulo de fase, y se obtiene un buen valor de índice de comportamiento DV_4 . En las tablas 4.8 y 4.9 respectivamente, se ilustra las magnitudes nodales y en líneas de transmisión para la cuarta etapa del proceso restaurativo. Se decide energizar la línea $L - 2$ con voltajes de generación de 1.032 y 1.008 respectivamente. O sea, las mismas magnitudes que la etapa 3, por lo que se mantienen constantes las variables de control de una etapa a otra, lo cual es ideal dentro del análisis. En la figura 4.4 se ilustra la configuración de la red con los elementos ya energizados.

Tabla 4.8. Magnitudes nodales para la cuarta etapa de restauración de la red de 5 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0320	0.000	102.554	31.949	0.0	0.0
2	1.0080	-1.8638	59.993	4.252	20.0	10.0
3	0.9659	-4.6353			37.792	15.0
4	0.9751	-5.9556			40.0	5.0
5	0.9702	-5.8838			60.0	10.0
$DV_4 = 3.0548 \times 10^{-3}$						

Para este caso se energiza el nodo 3, sin embargo, al suministrar el 100% de la carga total, se viola una restricción en el sistema que provoca un desbalance entre generación y carga. Por lo tanto se suministra el 84% de la demanda en el nodo 3 únicamente con el fin de mantener las restricciones del sistema en sus rangos.

Tabla 4.9. Flujos de potencia en líneas de transmisión después de la cuarta etapa de restauración de la red de 5 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	63.408	17.8662
L - 1	2	1	-62.5696	-21.5942
L - 2	1	3	39.1457	14.0830
L - 2	3	1	-37.784	-14.9927
L - 4	2	4	41.0106	4.1079
L - 4	4	2	-39.9952	-4.9954
L - 5	2	5	61.5521	11.7386
L - 5	5	2	-59.9913	-9.9923

Después de cuatro etapas del proceso, se satisface el 95% de la demanda total de carga. Manteniendo además, los límites de seguridad y operación del sistema.

La configuración de la red después de cuatro etapas se muestra en el diagrama unifilar de la figura 4.4, en el que se muestran cuatro líneas restauradas y cuatro nodos energizados.

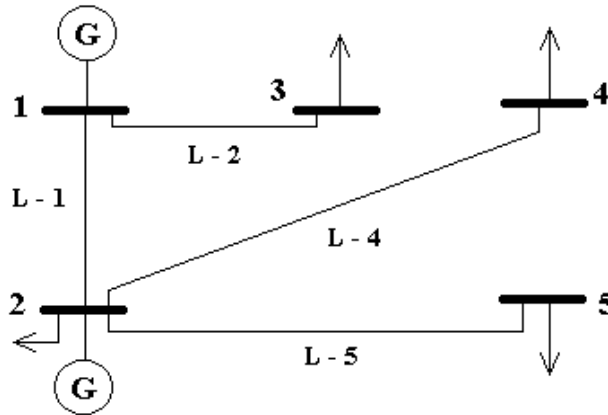


Figura 4.4. Configuración de la red de 5 nodos después de la cuarta etapa de restauración

A continuación se requiere suministrar energía nuevamente al nodo 3 para completar la demanda faltante. Así que se tienen como opciones, energizar la línea L – 3 y la línea L – 6. Se decidió energizar la línea L – 3 en la quinta etapa pues presenta mejor índice de comportamiento DV_5 sin necesidad de modificar las variables de control de la etapa anterior a ésta. En las tablas 4.10 y 4.11 respectivamente se muestran los resultados del AEE para la quinta etapa de restauración.

Tabla 4.10. Magnitudes nodales para la quinta etapa de restauración de la red de 5 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0320	0.000	125.683	14.722	0.0	0.0
2	1.0080	-2.9266	44.505	18.650	20.0	10.0
3	0.9905	-4.0802			45.0	15.0
4	0.9751	-6.5847			40.0	5.0
5	0.9702	-6.8466			60.0	10.0
$DV_5 = 1.98058 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.11. Flujos de potencia en líneas de transmisión después de la quinta etapa de restauración de la red de 5 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	92.7299	9.4362
L - 1	2	1	-91.0851	-10.7450
L - 2	1	3	32.9535	5.2855
L - 2	3	1	-32.0904	-7.8112
L - 3	2	3	13.0240	3.5485
L - 3	3	2	-12.9084	-7.1869
L - 4	2	4	41.0106	4.1079
L - 4	4	2	-39.9952	-4.9954
L - 5	2	5	61.5521	11.7386
L - 5	5	2	-59.9913	-9.9923

A partir de la quinta etapa se suministra a la red el 100% de la demanda total de energía sin variar los ajustes en las variables de control, y manteniendo al sistema en condiciones de operación y seguridad. Aunque el flujo de potencia en algunas líneas está cerca de su límite, el sistema se mantiene dentro de sus restricciones. En la figura 4.5 se muestran los elementos energizados después de cinco etapas.

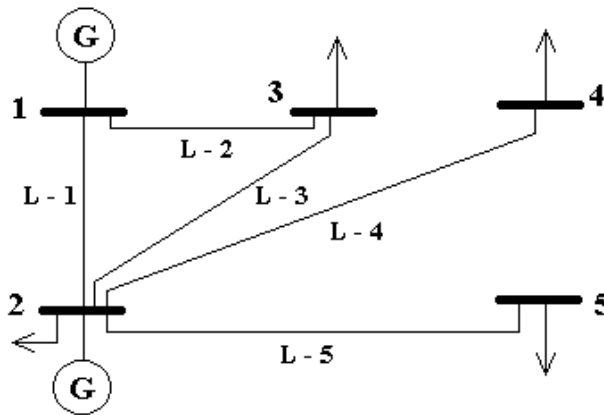


Figura 4.5. Configuración de la red de 5 nodos después de la quinta etapa de restauración

De acuerdo al programa de *FP*, el suministro de potencia real del nodo de generación 2 baja hasta 45 MW de generación para mantener un balance de energía en el sistema. El sistema para esta altura del análisis, ya no requiere ajustes en las variables de control, pues se han energizado suficientes elementos para mantener una razón de potencia reactiva normal. En las tablas 4.12 y 4.13 se ilustran los resultados para la sexta etapa de restauración donde se decide restaurar la línea 6.

Tabla 4.12. Magnitudes nodales para la sexta etapa de restauración de la red de 5 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0320	0.000	121.881	17.547	0.0	0.0
2	1.0080	-2.5934	47.921	12.713	20.0	10.0
3	0.9867	-4.8172			45.0	15.0
4	0.9856	-5.0874			40.0	5.0
5	0.9702	-6.6134			60.0	10.0
$DV_6 = 1.65522 \times 10^{-3}$						

Después de seis etapas, el sistema se encuentra restaurado en casi todos sus elementos. Los elementos energizados se ilustran en el diagrama unifilar de la figura 4.6.

Tabla 4.13. Flujos de potencia en líneas de transmisión después de la sexta etapa de restauración de la red de 5 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	83.5217	12.0202
L - 1	2	1	-82.1681	-14.2028
L - 2	1	3	38.3598	5.5265
L - 2	3	1	-37.2041	-7.1560
L - 3	2	3	22.9990	2.6431
L - 3	3	2	-22.6737	-5.6466
L - 4	2	4	25.5385	2.5339
L - 4	4	2	-25.1411	-5.3164
L - 5	2	5	61.5521	11.7386
L - 5	5	2	-59.9913	-9.9923
L - 6	3	4	14.8792	-2.1930
L - 6	4	3	-14.8562	0.3167

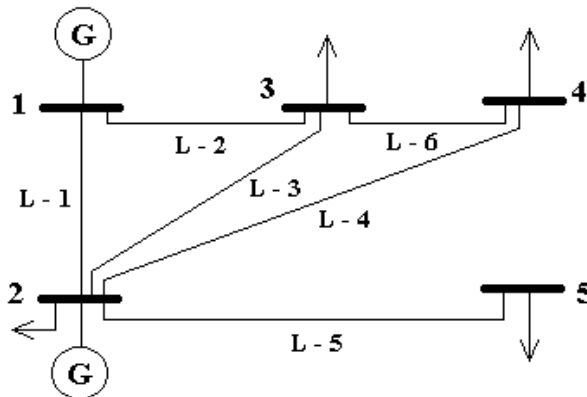


Figura 4.6. Configuración de la red de 5 nodos después de la sexta etapa de restauración

Para completar la secuencia de restauración se energiza la línea 7 en la última etapa de restauración. Las tablas 4.14 y 4.15 ilustran los resultados del análisis de flujos de potencia para la última etapa.

Tabla 4.14. Magnitudes nodales para la última etapa de restauración de la red de 5 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0320	0.000	120.281	18.326	0.0	0.0
2	1.0080	-2.4947	49.376	6.668	20.0	10.0
3	0.9861	-4.9731			45.0	15.0
4	0.9848	-5.3068			40.0	5.0
5	0.9775	-6.1353			60.0	10.0
$DV_7 = 1.31439 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.15. Flujos de potencia en líneas de transmisión después de la última etapa de restauración de la red de 5 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	80.7947	12.7965
L - 1	2	1	-79.5207	-15.2179
L - 2	1	3	39.4867	5.5297
L - 2	3	1	-38.2651	-6.9581
L - 3	2	3	25.3333	2.3318
L - 3	3	2	-24.9431	-5.1379
L - 4	2	4	28.4471	2.1381
L - 4	4	2	-27.9589	-4.6455
L - 5	2	5	55.1167	7.4162
L - 5	5	2	-53.8893	-6.6911
L - 6	3	4	18.2095	-2.8985
L - 6	4	3	-18.1750	1.0599
L - 7	4	5	6.1369	-1.4129
L - 7	5	4	-6.1050	-3.3045

Este análisis en general representa un *AEE* de un proceso restaurativo de manera convencional. Normalmente se requiere de una gran cantidad de cálculos para determinar una secuencia en redes a gran escala. Un conocimiento previo de la red ofrece un estudio menos tedioso, pero en general, el tiempo para determinar una secuencia es una tarea que consume una gran cantidad de tiempo, pues se deben considerar una gran cantidad de elementos y componentes de la red.

4.2.2 Red de prueba de 14 nodos

La siguiente red es una red de prueba de 14 nodos. Consta de 20 líneas de transmisión, dos generadores, tres compensadores síncronos, tres transformadores y un reactor en derivación. El diagrama unifilar de la red se muestra en la figura 4.7. Los datos completos del sistema se muestran en el Apéndice D, y en la referencia [45].

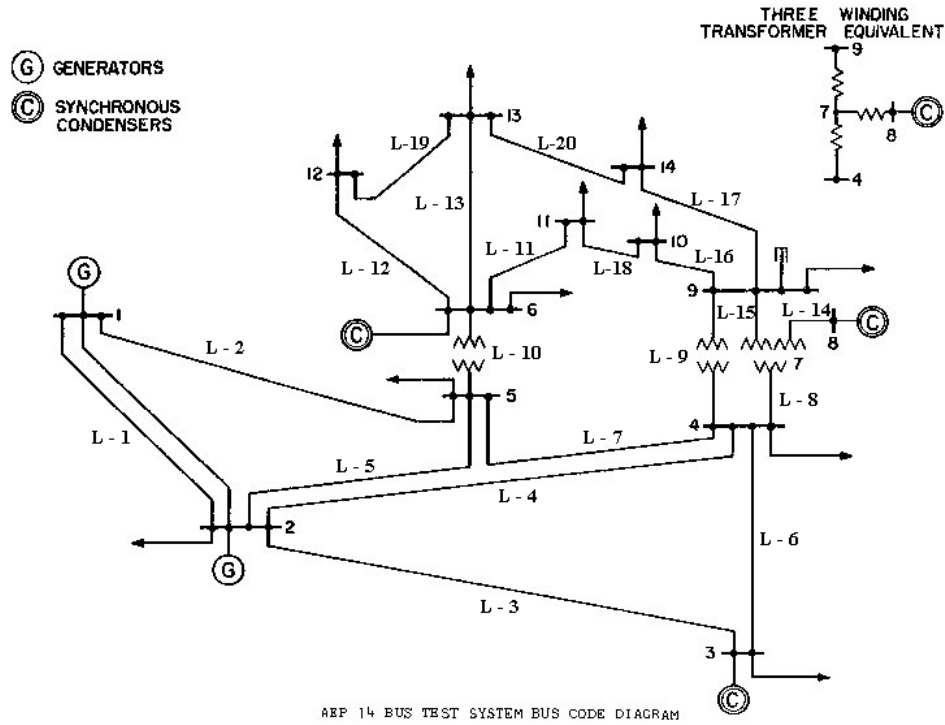


Figura 4.7. Diagrama unifilar de la red de prueba de 14 nodos

Para este caso se tiene un escenario posterior a un disturbio en que algunos elementos del sistema han quedado sin suministro de energía. Se realizará un análisis de manera convencional utilizando los mismos criterios usados en la sección anterior, para restaurar ocho líneas y tres cargas desenergizadas. El sistema se encuentra en la etapa post-disturbio como se ilustra en el diagrama unifilar de la figura 4.8.

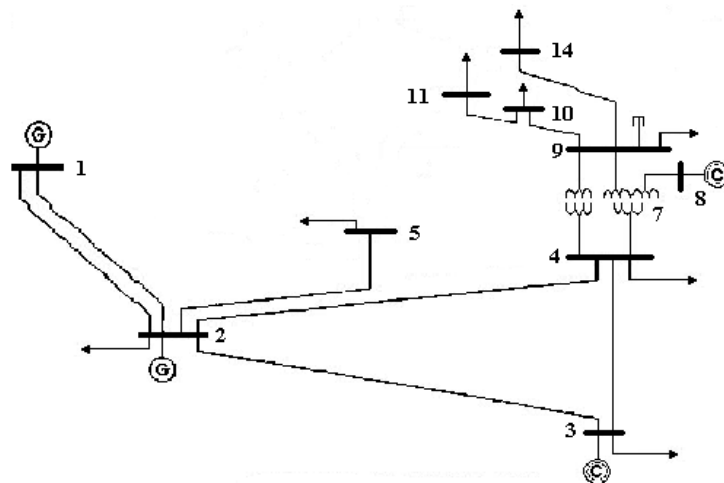


Figura 4.8. Configuración de la red de 14 nodos en la etapa de post-disturbio

Los elementos desenergizados son los nodos 6, 12, 13, las líneas L - 2 (nodo 1 – nodo 5), L - 7 (nodo 4 – nodo 5), L - 10 (nodo 5 – nodo 6), L - 11 (nodo 6 – nodo 11), L - 12 (nodo 6 – nodo 12), L - 13 (nodo 6 – nodo 13), L - 19 (nodo 12 – nodo 13), y L - 20 (nodo 13 – nodo 14). Como se ilustra en la figura, un compensador síncrono ha quedado desenergizado (nodo 6).

Para obtener el índice de comportamiento DV , se utilizó un factor de peso W_i de 0.3 para nodo de generación y 1.0 para nodo de carga. El voltaje de referencia V_{REF} es de 1.0.

En la etapa post-disturbio se simulan en su posición los taps de los transformadores y el reactor en derivación que se encuentra ahí. Se encuentran desenergizados dos nodos de carga y un nodo de generación ó compensador síncrono. Para energizar el nodo de generación, tal y como se hizo en el caso anterior, primero se considera como un nodo de carga antes de que se sincronice la generación, y posteriormente, en la siguiente etapa, se considera ya como un nodo de generación. Al igual que en el caso anterior se buscará energizar las cargas más pequeñas antes que las más grandes, en lo que se alcanza la máxima cantidad de potencia de generación. La tabla 4.16 muestra las magnitudes de voltaje nodal, ángulos de fase, y potencias de generación y carga para la etapa post-disturbio.

Tabla 4.16. Magnitudes nodales para la etapa de post-disturbio en la red de 14 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0550	0.0	183.271	18.22	0.0	0.0
2	1.0143	-5.5956	122.929	57.11	81.7	82.7
3	1.0000	-17.1687	0.0	49.554	94.2	19.0
4	0.9804	-16.9944			47.8	-3.9
5	1.0098	-6.3328			7.6	1.8
7	1.0020	-21.4756			0.0	0.0
8	1.0500	-21.4756	0.0	28.6	0.0	0.0
9	0.9858	-23.8182			29.5	16.6
10	0.9911	-24.6441			9.0	5.8
11	0.9847	-24.9520			3.5	1.8
14	0.9511	-25.8921			14.9	5.0

Por el momento se satisface el 90% de la demanda total de carga por lo que una parte del sistema requiere de transferencia inmediata de energía. La tabla 4.17 muestra la potencia en las líneas de transmisión antes de iniciar la secuencia de restauración.

Tabla 4.17. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la etapa de post-disturbio de la red de 14 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	183.2710	18.2203
L - 3	2	3	101.2915	-5.7809
L - 4	2	4	109.6495	-7.4187
L - 5	2	5	7.6323	-1.5840
L - 6	3	4	2.3871	8.8148
L - 8	4	7	36.7031	-8.7133
L - 9	4	9	20.6472	0.2661
L - 14	7	8	0.0	-27.2934
L - 15	7	9	36.7031	15.4837
L - 16	9	10	12.6032	-10.7945
L - 17	9	14	15.2471	5.7383
L - 18	10	11	3.5131	1.8307

Con estos datos, se inicia un análisis para determinar una buena secuencia de restauración con la ayuda del modelo en estado estacionario como herramienta principal. Después del análisis para la primera etapa con todas las posibles soluciones, y con distintas magnitudes en las variables de control, se determina energizar la línea L - 10, pues con esta decisión se obtiene el mejor índice de comportamiento satisfaciendo la mayor cantidad de demanda posible, y se logra mantener equilibrio en el sistema. Con esto se suministra energía a la carga del nodo 6. Los resultados después de esta primera etapa se muestran en las tablas 4.18 y 4.19.

Tabla 4.18. Magnitudes nodales para la primera etapa de restauración en la red de 14 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0550	0.0	129.38	31.122	0.0	0.0
2	1.0143	-3.7482	185.41	58.262	81.7	82.7
3	0.9900	-15.3189	0.0	48.128	94.2	19.0
4	0.9641	-15.0150			47.8	-3.9
5	0.9888	-5.3522			7.6	1.8
6	0.9916	-6.9655			11.2	7.5
7	1.0265	-19.1998			0.0	0.0
8	1.0500	-19.1998	0.0	14.028	0.0	0.0
9	1.0098	-21.4536			29.5	16.6
10	0.9993	-21.9162			9.0	5.8
11	0.9929	-22.2190			3.5	1.8
14	0.9759	-23.4267			14.9	5.0
$DV_1 = 4.949 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.19. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la primera etapa de restauración de la red de 14 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	129.3801	31.1219
L - 3	2	3	101.4253	-5.8224
L - 4	2	4	109.5030	1.5449
L - 5	2	5	19.0441	7.0998
L - 6	3	4	2.5259	12.306
L - 8	4	7	37.0537	-29.4895
L - 9	4	9	20.2573	-7.0326
L - 10	5	6	11.2000	-0.9581
L - 14	7	8	0.0	-13.7137
L - 15	7	9	37.0537	16.2828
L - 16	9	10	12.5813	7.8119
L - 17	9	14	15.2297	5.7012
L - 18	10	11	3.5129	1.8302

Con la línea L - 10 energizada, ahora el sistema suministra energía a una carga previamente desenergizada de 11.2 MW. Inmediatamente se ajusta la posición del tap del transformador y se considera en sincronía el compensador síncrono que se encuentra en el nodo 6, por lo que para la siguiente etapa, se considera este nodo como un nodo de generación, y con el compensador síncrono capaz de absorber ó suministrar reactivos.

A continuación se decide, con base en el análisis para la segunda etapa, que la mejor opción es energizar la línea L - 12. Esta consideración implica el suministro de energía al nodo 12 con una carga previamente desenergizada de 6.1 MW. Los resultados se muestran en las tablas 4.20 y 4.21.

Tabla 4.20. Magnitudes nodales para la segunda etapa de restauración en la red de 14 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0550	0.0	128.643	31.311	0.0	0.0
2	1.0143	-3.7482	192.417	57.614	81.7	82.7
3	0.9900	-15.2935	0.0	48.128	94.2	19.0
4	0.9641	-14.9896			47.8	-3.9
5	0.9863	-5.9709			7.6	1.8
6	0.9916	-8.4771	0.0	2.948	11.2	7.5
7	1.0265	-19.1744			0.0	0.0
8	1.0500	-19.1744	0.0	14.028	0.0	0.0
9	1.0098	-21.4282			29.5	16.6
10	0.9993	-21.8908			9.0	5.8
11	0.9929	-22.1937			3.5	1.8
12	0.9797	-9.2815			6.1	1.6
14	0.9759	-23.4013			14.9	5.0
$DV_2 = 5.38 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.21. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la segunda etapa de restauración de la red de 14 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	128.6434	31.311
L - 3	2	3	101.4252	-5.8224
L - 4	2	4	109.5030	1.5449
L - 5	2	5	25.3464	6.7350
L - 6	3	4	2.5259	12.3059
L - 8	4	7	37.0536	-29.4896
L - 9	4	9	20.2573	-7.0327
L - 10	5	6	17.3509	-1.7478
L - 12	6	12	6.1509	1.706
L - 14	7	8	-6.1000	-1.6
L - 15	7	9	37.0536	16.2825
L - 16	9	10	12.5813	7.8119
L - 17	9	14	15.2296	5.7012
L - 18	10	11	3.5129	1.8302

En la tercera etapa del análisis se concluyó energizar la línea L - 13 con el fin de satisfacer el total de la demanda de carga del sistema. Los resultados se muestran en las tablas 4.22 y 4.23.

Tabla 4.22. Magnitudes nodales para la tercera etapa de restauración en la red de 14 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0550	0.0	126.45	31.876	0.0	0.0
2	1.0143	-3.6473	200.00	56.591	81.7	82.7
3	0.9900	-15.2180	0.0	48.128	94.2	19.0
4	0.9641	-14.9141			47.8	-3.9
5	0.9839	-6.4542			7.6	1.8
6	0.9916	-9.7362	0.0	10.044	11.2	7.5
7	1.0265	-19.0989			0.0	0.0
8	1.0500	-19.0989	0.0	14.028	0.0	0.0
9	1.0098	-21.3527			29.5	16.6
10	0.9993	-21.8153			9.0	5.8
11	0.9929	-22.1182			3.5	1.8
12	0.9797	-10.5406			6.1	1.6
13	0.9803	-9.9146			5.269	5.8
14	0.9759	-23.3258			14.9	5.0
$DV_3 = 5.836 \times 10^{-3}$						

Para este caso, solo se restauró el 39% de la carga demandada en el nodo 13 puesto que al pretender suministrar los 13.5 MW de demanda en ese nodo, se provoca un desbalance en el sistema debido a que alguna de las vías de transmisión sobrepasaría su límite térmico permisible. Sin embargo, después de tres etapas de restauración, se considera la mejor opción dentro del análisis pues se satisface el 97.4% de la demanda total de carga del sistema, con un buen índice de comportamiento.

Este tiro de carga provoca que se haya maximizado la carga restaurada con las condiciones que prevalecen en el sistema. Sin embargo, se espera que en el análisis de la siguiente etapa se pueda suministrar el total de la carga demandada en el sistema.

Tabla 4.23. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la tercera etapa de restauración de la red de 14 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	126.4499	31.8763
L - 3	2	3	101.4253	-5.8224
L - 4	2	4	109.5030	1.5448
L - 5	2	5	30.8265	6.5542
L - 6	3	4	2.5259	12.3059
L - 8	4	7	37.0536	-29.4896
L - 9	4	9	20.2573	-7.0327
L - 10	5	6	22.6623	-2.4094
L - 12	6	12	6.1509	1.706
L - 13	6	13	5.3113	5.8832
L - 14	7	8	0.0	-13.7135
L - 15	7	9	37.0537	16.2827
L - 16	9	10	12.5813	7.8119
L - 17	9	14	15.2296	5.7012
L - 18	10	11	3.5129	1.8302

En la etapa cuatro de restauración, se buscó energizar una línea que pueda mantener al sistema estable suministrando el 100% de la carga demandada, y al mismo tiempo, que minimice las desviaciones de voltaje nodal en la red. Después del respectivo análisis, se decidió energizar la línea L - 2. Los resultados después de esta conclusión se muestran en las tablas 4.24 y 4.25.

Tabla 4.24. Magnitudes nodales para la cuarta etapa de restauración en la red de 14 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0550	0.0	130.219	52.212	0.0	0.0
2	1.0143	-2.6820	200.000	39.008	81.7	82.7
3	0.9900	-14.1067	0.0	47.375	94.2	19.0
4	0.9653	-13.6952			44.567	-3.9
5	1.0075	-3.3639			7.6	1.8
6	0.9916	-7.7503	0.0	1.311	11.2	7.5
7	1.0272	-17.8717			0.0	0.0
8	1.0500	-17.8717	0.0	13.616	0.0	0.0
9	1.0106	-20.1219			29.5	16.6
10	1.0002	-20.5837			9.0	5.8
11	0.9938	-20.8861			3.5	1.8
12	0.9797	-8.5547			6.1	1.6
13	0.9746	-8.5656			13.5	5.8
14	0.9768	-22.0917			14.9	5.0
$DV_4 = 5.813 \times 10^{-3}$						

Para este caso, solo se restauró el 93.2% de la carga demandada en el nodo 4 puesto que había una saturación de flujo de potencia en algún elemento. Sin embargo, aunque no se consigue satisfacer el total de la carga, se consigue obtener niveles de voltaje dentro de los límites establecidos. Después de cuatro etapas de restauración se satisface el 99% de la demanda total del sistema.

Tabla 4.25. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la cuarta etapa de restauración de la red de 14 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	98.4778	39.3559
L - 2	1	5	31.7409	12.8560
L - 3	2	3	100.1686	-5.7817
L - 4	2	4	107.1092	1.1977
L - 5	2	5	7.4999	-0.2045
L - 6	3	4	1.3850	12.0809
L - 8	4	7	37.0495	-29.2917
L - 9	4	9	20.2608	-6.9812
L - 10	5	6	31.0013	7.6918
L - 12	6	12	6.1509	1.706
L - 13	6	13	13.6503	6.0961
L - 14	7	8	0.0	-13.3198
L - 15	7	9	37.0495	16.1726
L - 16	9	10	12.5811	7.8115
L - 17	9	14	15.2291	5.6999
L - 18	10	11	3.5129	1.8301

Después de un análisis en la quinta etapa, se concluyó energizar la línea L - 7 pues representó la mejor opción.

En este punto del análisis, se tiene que se satisface el total de la carga. Por lo tanto, mediante el análisis realizado, se pudo concluir que se puede minimizar el tiempo de restauración, conservando las restricciones del sistema en sus límites. Los resultados de flujos de potencia después de cinco etapas de restauración se muestran en las tablas 4.26 y 4.27.

Tabla 4.26. Magnitudes nodales para la quinta etapa de restauración en la red de 14 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0550	0.0	165.473	53.893	0.0	0.0
2	1.0143	-2.7894	165.227	37.405	81.7	82.7
3	0.9900	-11.4734	0.0	36.189	94.2	19.0
4	0.9840	-8.9626			47.8	-3.9
5	0.9920	-7.2851			7.6	1.8
6	0.9916	-11.7399	0.0	7.586	11.2	7.5
7	1.0382	-13.0090			0.0	0.0
8	1.0500	-13.0090	0.0	7.006	0.0	0.0

ND	V	ANG	PG	QG	PC	QC
9	1.0238	-15.2051			29.5	16.6
10	1.0134	-15.6554			9.0	5.8
11	1.0071	-15.9501			3.5	1.8
12	0.9797	-12.5442			6.1	1.6
13	0.9746	-12.5551			13.5	5.8
14	0.9904	-17.1238			14.9	5.0
$DV_5 = 5.796 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.27. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la quinta etapa de restauración de la red de 14 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	101.583	38.5007
L - 2	1	5	63.8905	15.3916
L - 3	2	3	76.6034	-4.4237
L - 4	2	4	61.0664	-1.3273
L - 5	2	5	45.3442	-1.7876
L - 6	3	4	-20.2626	10.2729
L - 7	4	5	-66.7390	2.8954
L - 8	4	7	36.9880	-26.0893
L - 9	4	9	20.3246	-6.1547
L - 10	5	6	30.9968	1.3500
L - 12	6	12	6.1508	1.7059
L - 13	6	13	13.65	6.0957
L - 14	7	8	0.0	-6.9273
L - 15	7	9	37.0243	14.3787
L - 16	9	10	12.5885	7.8036
L - 17	9	14	15.2238	5.6746
L - 18	10	11	3.5142	1.8289

Ya con el total de la carga restaurada, se procede a energizar las líneas restantes, únicamente escogiendo aquella opción que suavice lo más posible la transición de una etapa a otra, y que implique un posible nulo cambio en las variables del sistema de una etapa a otra. En la sexta etapa de restauración se energiza la línea L - 19. Los resultados de flujos se muestran en las tablas 4.28 y 4.29.

Tabla 4.28. Magnitudes nodales para la sexta etapa de restauración en la red de 14 nodos.

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0550	0.0	165.474	53.892	0.0	0.0
2	1.0143	-2.7894	165.225	37.405	81.7	82.7
3	0.9900	-11.4734	0.0	36.189	94.2	19.0
4	0.9840	-8.9626			47.8	-3.9
5	0.9920	-7.2851			7.6	1.8
6	0.9916	-11.7396	0.0	7.583	11.2	7.5
7	1.0382	-13.0090			0.0	0.0
8	1.0500	-13.0090	0.0	7.006	0.0	0.0
9	1.0238	-15.2051			29.5	16.6
10	1.0134	-15.6554			9.0	5.8
11	1.0071	-15.9501			3.5	1.8

ND	V	ANG	PG	QG	PC	QC
12	0.9777	-12.5677			6.1	1.6
13	0.9756	-12.5439			13.5	5.8
14	0.9904	-17.1238			14.9	5.0
$DV_6 = 5.83 \times 10^{-3}$						

Se intentó no modificar ninguna de las magnitudes de las variables de control desde la etapa inicial hasta la etapa actual, que es el caso ideal. Aquí se resalta el hecho de que es muy importante en restauración, tener un conocimiento previo del *SEP* a analizar. Esto permitió hacer un estudio para la etapa post-disturbio en el que se calcularon valores en las variables de control que se mantuvieron prácticamente constantes el resto del análisis. Sin embargo, como ya se mencionó en el capítulo 2, dentro de un escenario común, se debe contar con un plan de restauración que considere una gama de posibilidades de disturbios.

Tabla 4.29. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la sexta etapa de restauración de la red de 14 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	101.5837	38.5004
L - 2	1	5	63.8902	15.3915
L - 3	2	3	76.6032	-4.4237
L - 4	2	4	61.0659	-1.3273
L - 5	2	5	45.3436	-1.7877
L - 6	3	4	-20.2628	10.2728
L - 7	4	5	-66.7396	2.8954
L - 8	4	7	36.9880	-26.0893
L - 9	4	9	20.3246	-6.1547
L - 10	5	6	30.9952	1.3501
L - 12	6	12	6.5720	2.2781
L - 13	6	13	13.2273	5.5206
L - 14	7	8	0.0	-6.9272
L - 15	7	9	37.0244	14.3786
L - 16	9	10	12.5886	7.8037
L - 17	9	14	15.2238	5.6746
L - 18	10	11	3.5141	1.8288
L - 19	12	13	0.4117	0.5524

En la séptima etapa de restauración se concluyó energizar la línea L - 20. Los resultados de flujos después de siete etapas de restauración se muestran en las tablas 4.30 y 4.31.

Tabla 4.30. Magnitudes nodales para la séptima etapa de restauración en la red de 14 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0550	0.0	165.753	54.281	0.0	0.0
2	1.0143	-2.7863	164.953	38.168	81.7	82.7
3	0.9900	-11.4391	0.0	36.485	94.2	19.0
4	0.9835	-8.8860			47.8	-3.9
5	0.9911	-7.3263			7.6	1.8
6	0.9916	-12.5858	0.0	4.755	11.2	7.5
7	1.0356	-12.5573			0.0	0.0
8	1.0500	-12.5573	0.0	8.554	0.0	0.0
9	1.0181	-14.5593			29.5	16.6
10	1.0077	-15.0145			9.0	5.8
11	1.0014	-15.3124			3.5	1.8
12	0.9788	-13.6304			6.1	1.6
13	0.9764	-13.8480			13.5	5.8
14	0.9808	-15.3783			14.9	5.0
$DV_7 = 5.453 \times 10^{-3}$						

Normalmente se requiere de una gran cantidad de pruebas en *FP* para determinar una secuencia de restauración que mantenga seguridad y operación de un sistema. La dificultad para determinar un conjunto de valores de las variables de control, que mantengan al sistema estable durante una secuencia, crece a medida que el sistema crece en número de elementos. Un sistema a gran escala implica estudios y análisis bien estructurados para desarrollar planes de restauración y programas de entrenamiento para los despachadores en los *SCE*.

Tabla 4.31. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la séptima etapa de restauración de la red de 14 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	101.4935	38.5252
L - 2	1	5	64.2599	15.7556
L - 3	2	3	76.3353	-4.4018
L - 4	2	4	60.4477	-0.9246
L - 5	2	5	45.8707	-1.4159
L - 6	3	4	-20.5143	10.6696
L - 7	4	5	-62.1079	2.2169
L - 8	4	7	33.4631	-25.2429
L - 9	4	9	18.3664	-5.4027
L - 10	5	6	36.5499	1.4711
L - 12	6	12	7.5838	1.3873
L - 13	6	13	17.772	2.7578
L - 14	7	8	0.0	-8.4374
L - 15	7	9	33.4836	17.1131
L - 16	9	10	12.5845	7.807
L - 17	9	14	9.7386	9.4868
L - 18	10	11	3.5132	1.8294
L - 19	12	13	1.4099	-0.3672
L - 20	13	14	5.4617	-3.8418

En la última etapa de restauración se reincorporó a la línea L - 11. Los resultados del AEE se muestran en las tablas 4.32 y 4.33.

Tabla 4.32. Magnitudes nodales para la última etapa de restauración en la red de 14 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0550	0.0	165.962	54.514	0.0	0.0
2	1.0143	-2.7859	164.680	38.671	81.7	82.7
3	0.9900	-11.4178	0.0	36.666	94.2	19.0
4	0.9832	-8.8372			47.8	-3.9
5	0.9905	-7.3508			7.6	1.8
6	0.9916	-13.1085	0.0	3.002	11.2	7.5
7	1.0341	-12.2705			0.0	0.0
8	1.0500	-12.2705	0.0	9.489	0.0	0.0
9	1.0147	-14.1483			29.5	16.6
10	1.0029	-14.3046			9.0	5.8
11	0.9938	-13.8846			3.5	1.8
12	0.9784	-14.089			6.1	1.6
13	0.9760	-14.234			13.5	5.8
14	0.9788	-15.31			14.9	5.0
$DV_8 = 5.349 \times 10^{-3}$						

Se tiene el total de elementos de la red energizados incluyendo toda la carga demandada..

Tabla 4.33. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la última etapa de restauración de la red de 14 nodos

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	101.4811	38.5286
L - 2	1	5	64.4813	15.9851
L - 3	2	3	76.1558	-4.3869
L - 4	2	4	60.0377	-0.6722
L - 5	2	5	46.1746	-1.1763
L - 6	3	4	-20.6826	10.9174
L - 7	4	5	-59.2187	1.8234
L - 8	4	7	31.2405	-24.7279
L - 9	4	9	17.1346	-4.9462
L - 10	5	6	39.979	1.5824
L - 11	6	11	5.0588	-3.4582
L - 12	6	12	7.2898	1.665
L - 13	6	13	16.4377	3.6331
L - 14	7	8	0.0	-9.3455
L - 15	7	9	31.2535	18.753
L - 16	9	10	7.557	11.347
L - 17	9	14	11.3102	8.2175
L - 18	10	11	-1.4996	5.3944
L - 19	12	13	1.1202	-0.0803
L - 20	13	14	3.866	-2.6248

4.2.3 Red de prueba de 28 nodos

Esta fue la última red de prueba utilizada en este trabajo, con 28 nodos tal y como se muestra en el diagrama unifilar de la figura 4.9. La red se simplifica a 52 líneas de transmisión, 11 nodos de generación, 2 compensadores síncronos, dos transformadores y diez reactores en derivación. Se realizó un análisis heurístico con los mismos criterios utilizados en las dos secciones anteriores. Los datos completos de esta red se encuentran en el Apéndice D, y en la referencia [46].

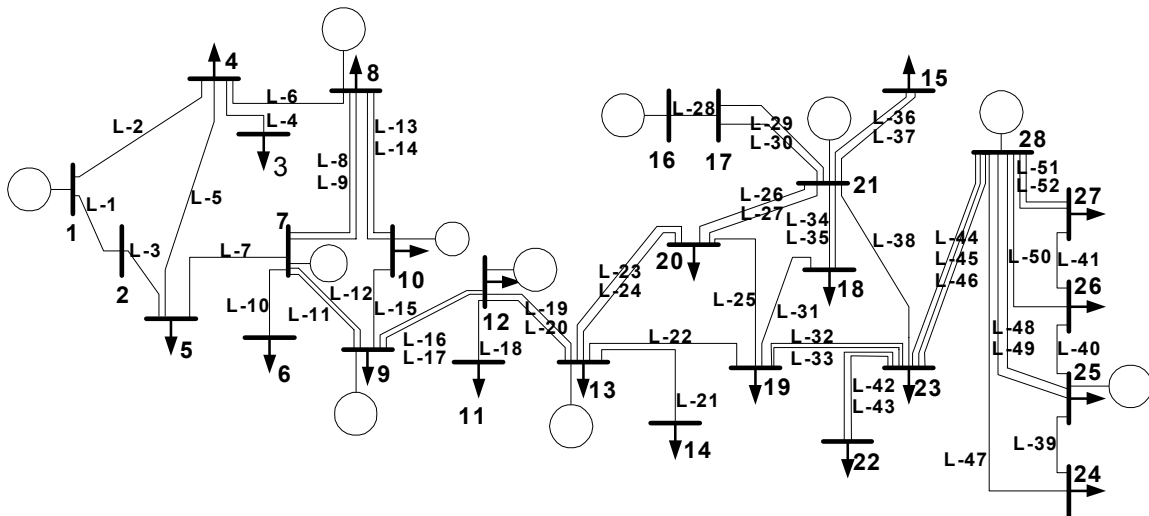


Figura 4.9. Red de prueba de 28 nodos

Se desean restaurar 6 líneas, y de acuerdo a la figura 4.9, las líneas a restaurar son las líneas L - 19 (nodo 12 – nodo 13), L - 20 (nodo 12 – nodo 13), L - 22 (nodo 13 – nodo 19), L - 25 (nodo 19 – nodo 20), L - 27 (nodo 20 – nodo 21), y L - 31 (nodo 18 – nodo 19).

La figura 4.10 muestra el diagrama unifilar de la red de 28 en la etapa post-disturbio.

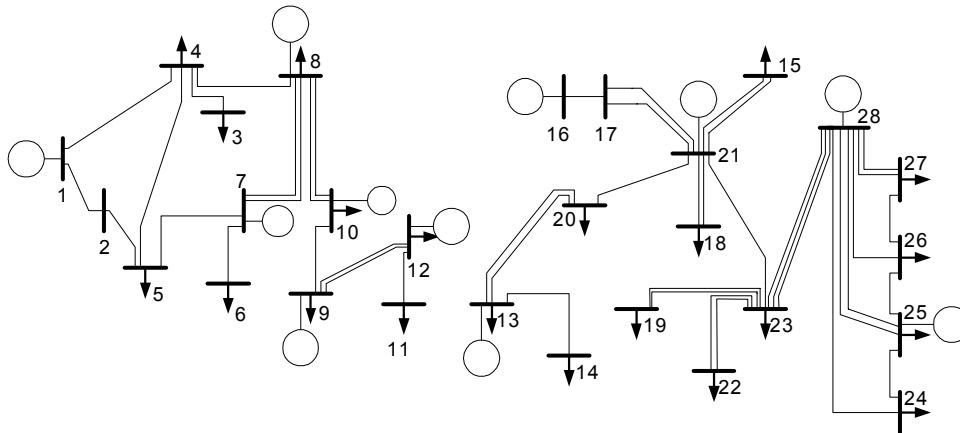


Figura 4.10. Diagrama de flujo de la red de prueba de 28 nodos en la etapa de post-disturbio

El sistema queda partido en dos subsistemas. Normalmente este problema puede tratarse como dos subsistemas independientes y restaurar cada uno por separado, y al final, simplemente interconectarlos por medio de las líneas L – 19 Y L – 20. Sin embargo, para este caso, lo consideraremos como un solo subsistema a todo el sistema. Por lo tanto, se tiene como única opción, restaurar cualquiera de las dos líneas que interconectan a los dos subsistemas (líneas 19 y 20). En un procedimiento común de restauración, se recomienda dividir el sistema en subsistemas dependiendo de la disponibilidad de generación, y restaurar cada subsistema por separado, y al final se interconectan todos para volver a un estado de operación normal [1].

Para obtener el índice de comportamiento DV , se utilizó un factor de peso W_i de 0.3 para nodo de generación y 1.0 para nodo de carga. El voltaje de referencia V_{REF} para nodos de generación es de 0.985, y de 0.992 para nodos de carga.

Tratando esta configuración a restaurar como un solo sistema, se requiere restaurar primeramente cualquiera de estas dos líneas antes mencionadas. Como las dos líneas tienen el mismo calibre, se puede elegir cualquiera de las dos para iniciar la secuencia de restauración en la primera etapa.

Como primera etapa de restauración aleatoriamente se elige la energización de la línea L - 19. En la tabla 4.34 se muestra los resultados del análisis para esta primera etapa de la secuencia.

Tabla 4.34. Magnitudes nodales para la primera etapa de restauración en la red de 28 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0000	0.0	68.979	-44.651	0.0	0.0
2	1.0001	-3.8136			0.0	0.0
3	0.9924	-3.8588			14.053	4.662
4	0.9923	-3.2343			57.227	18.811
5	0.9875	-3.1755			57.243	18.82
6	0.9937	-0.5068			94.356	31.012
7	0.9999	0.2155	150.0	-1.213	0.0	0.0
8	1.0000	-0.3586	150.0	121.047	141.549	46.519
9	0.9990	0.5859	55.0	1.517	130.463	42.883
10	1.0000	-0.5648	30.0	73.049	86.041	28.271
11	0.9814	7.7038			50.053	16.263
12	1.0000	10.9010	0.0	27.969	83.350	27.409

ND	V	ANG	PG	QG	PC	QC
13	0.9990	20.9863	200.0	173.153	0.015	0.102
14	1.0008	18.3074			28.194	9.264
15	0.9576	22.4545			113.209	37.221
16	0.9990	29.3692	100.0	-20.864	0.0	0.0
17	1.0450	26.3690			0.0	0.0
18	0.9753	25.0586			58.557	19.241
19	1.0467	18.8645			81.999	26.938
20	0.9752	23.4855			91.067	29.939
21	0.9790	25.6739	300.0	80.823	0.0	0.0
22	1.0029	20.8090			51.546	16.934
23	1.0092	23.0048			38.0	44.0
24	0.9901	24.7253			100.888	33.157
25	0.9900	25.0589	0.0	191.044	122.966	40.432
26	0.9506	25.0902			164.0	447.0
27	0.9762	25.5970			5.531	1.816
28	1.0050	26.2614	540.877	307.370	0.0	0.0
$DV_l = 10.97 \times 10^{-3}$						

Para esta red de prueba se omite desplegar los flujos en las líneas de transmisión, excepto en el caso de que haya una sobrecarga en las líneas de transmisión.

A continuación, en la tabla 4.35, se muestran los resultados de la segunda etapa de restauración donde se decidió, de acuerdo al análisis efectuado como la mejor opción la línea L - 31.

Tabla 4.35. Magnitudes nodales para la segunda etapa de restauración en la red de 28 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0000	0.0	68.475	-44.585	0.0	0.0
2	1.0001	-3.7853			0.0	0.0
3	0.9924	-3.8352			14.053	4.662
4	0.9923	-3.2106			57.227	18.811
5	0.9875	-3.1519			57.243	18.82
6	0.9937	-0.4552			94.356	31.012
7	0.9999	0.2671	150.0	-1.242	0.0	0.0
8	1.0000	-0.3090	150.0	121.099	141.549	46.519
9	0.9990	0.6412	55.0	1.625	130.463	42.883
10	1.0000	-0.5150	30.0	73.045	86.041	28.271
11	0.9814	7.8013			50.053	16.263
12	1.0000	10.9985	0.0	28.168	83.350	27.409
13	0.9990	21.1048	200.0	173.296	0.015	0.102
14	1.0008	18.4259			28.194	9.264
15	0.9576	22.5926			113.209	37.221
16	0.9990	29.5073	100.0	-20.864	0.0	0.0
17	1.0450	26.5071			0.0	0.0
18	0.9838	24.7130			58.557	19.241
19	0.9909	24.3044			81.999	26.938
20	0.9752	23.6170			91.067	29.939
21	0.9790	25.8121	300.0	43.57	0.0	0.0

ND	V	ANG	PG	QG	PC	QC
22	0.9870	24.1585			51.546	16.934
23	0.9938	26.4211			38.0	44.0
24	0.9901	28.0598			100.888	33.157
25	0.9900	28.3935	0.0	191.044	122.966	40.432
26	0.9506	28.4248			164.0	447.0
27	0.9762	28.9316			5.531	1.816
28	1.0050	29.6260	540.556	346.161	0.0	0.0
$DV_2 = 7.375 \times 10^{-3}$						

En la tabla 4.36 se muestran los resultados que se obtuvieron para la tercera etapa de restauración en la que se energizó la línea L - 27.

Tabla 4.36. Magnitudes nodales para la tercera etapa de restauración en la red de 28 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0000	0.0	68.638	-44.607	0.0	0.0
2	1.0001	-3.7944			0.0	0.0
3	0.9924	-3.8428			14.053	4.662
4	0.9923	-3.2182			57.227	18.811
5	0.9875	-3.1595			57.243	18.82
6	0.9937	-0.4719			94.356	31.012
7	0.9999	0.2505	150.0	-1.233	0.0	0.0
8	1.0000	-0.3250	150.0	121.082	141.549	46.519
9	0.9990	0.6234	55.0	1.590	130.463	42.883
10	1.0000	-0.5311	30.0	73.045	86.041	28.271
11	0.9814	7.7699			50.053	16.263
12	1.0000	10.9670	0.0	28.104	83.350	27.409
13	0.9990	21.0666	200.0	168.373	0.015	0.102
14	1.0008	18.3877			28.194	9.264
15	0.9576	21.4259			113.209	37.221
16	0.9990	28.3406	100.0	-20.864	0.0	0.0
17	1.0450	25.3404			0.0	0.0
18	0.9838	23.5417			58.557	19.241
19	0.9909	23.1291			81.999	26.938
20	0.9770	23.5539			91.067	29.939
21	0.9790	24.6453	300.0	41.052	0.0	0.0
22	0.9870	22.9619			51.546	16.934
23	0.9938	25.2244			38.0	44.0
24	0.9901	26.8447			100.888	33.157
25	0.9900	27.1783	0.0	191.044	122.966	40.432
26	0.9506	27.2096			164.0	447.0
27	0.9762	27.7164			5.531	1.816
28	1.0050	28.4108	539.749	346.172	0.0	0.0
$DV_3 = 7.317 \times 10^{-3}$						

En la tabla 4.37 se muestran los resultados para la cuarta etapa de restauración en la que se concluyó energizar la línea L - 25.

Tabla 4.37. Magnitudes nodales para la cuarta etapa de restauración en la red de 28 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0000	0.0	68.643	-44.607	0.0	0.0
2	1.0001	-3.7947			0.0	0.0
3	0.9924	-3.8430			14.053	4.662
4	0.9923	-3.2185			57.227	18.811
5	0.9875	-3.1598			57.243	18.82
6	0.9937	-0.4724			94.356	31.012
7	0.9999	0.2500	150.0	-1.233	0.0	0.0
8	1.0000	-0.3255	150.0	122.082	141.549	46.519
9	0.9990	0.6228	55.0	1.589	130.463	42.883
10	1.0000	-0.5316	30.0	73.045	86.041	28.271
11	0.9814	7.7689			50.053	16.263
12	1.0000	10.9661	0.0	28.102	83.350	27.409
13	0.9990	21.0654	200.0	163.031	0.015	0.102
14	1.0008	18.3865			28.194	9.264
15	0.9576	21.4649			113.209	37.221
16	0.9990	28.3796	100.0	-20.864	0.0	0.0
17	1.0450	25.3794			0.0	0.0
18	0.9807	23.6796			58.557	19.241
19	0.9851	23.3497			81.999	26.938
20	0.9790	23.5301			91.067	29.939
21	0.9790	24.6843	300.0	38.462	0.0	0.0
22	0.9853	23.0946			51.546	16.934
23	0.9922	25.3644			38.0	44.0
24	0.9901	26.9750			100.888	33.157
25	0.9900	27.3086	0.0	191.044	122.966	40.432
26	0.9506	27.3400			164.0	447.0
27	0.9762	27.8468			5.531	1.816
28	1.0050	28.5412	539.681	350.303	0.0	0.0
$DV_4 = 7.387 \times 10^{-3}$						

En la tabla 4.38 se muestran los resultados para la quinta etapa de restauración en la que se energizó a la línea L - 20.

Tabla 4.38. Magnitudes nodales para la quinta etapa de restauración en la red de 28 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0000	0.0	69.310	-44.694	0.0	0.0
2	1.0002	-3.8321			0.0	0.0
3	0.9924	-3.8744			14.053	4.662
4	0.9923	-3.2499			57.227	18.811
5	0.9875	-3.1910			57.243	18.82
6	0.9937	-0.5406			94.356	31.012
7	0.9999	0.1817	150.0	-1.193	0.0	0.0
8	1.0000	-0.3911	150.0	121.014	141.549	46.519
9	0.9990	0.5495	55.0	1.447	130.463	42.883
10	1.0000	-0.5974	30.0	73.052	86.041	28.271
11	0.9814	7.6399			50.053	16.263
12	1.0000	10.8371	0.0	11.045	83.350	27.409
13	0.9990	15.8239	200.0	142.708	0.015	0.102
14	1.0008	13.1449			28.194	9.264
15	0.9576	16.1102			113.209	37.221

ND	V	ANG	PG	QG	PC	QC
16	0.9990	23.0250	100.0	-20.864	0.0	0.0
17	1.0450	20.0247			0.0	0.0
18	0.9807	18.3168			58.557	19.241
19	0.9851	17.9801			81.999	26.938
20	0.9790	18.1897			91.067	29.939
21	0.9790	19.3297	300.0	38.114	0.0	0.0
22	0.9854	17.5919			51.546	16.934
23	0.9923	19.8611			38.0	44.0
24	0.9901	21.3673			100.888	33.157
25	0.9900	21.7009	0.0	191.044	122.966	40.432
26	0.9506	21.7322			164.0	447.0
27	0.9762	22.2391			5.531	1.816
28	1.0050	22.9335	539.681	350.403	0.0	0.0
$DV_5 = 7.384 \times 10^{-3}$						

En la tabla 4.39 se muestran los resultados para la última etapa de restauración en la que se energizó a la última línea faltante L - 22.

Tabla 4.39. Magnitudes nodales para la última etapa de restauración en la red de 28 nodos

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0000	0.0	69.525	-44.721	0.0	0.0
2	1.0002	-3.8441			0.0	0.0
3	0.9924	-3.8845			14.053	4.662
4	0.9923	-3.2600			57.227	18.811
5	0.9875	-3.2011			57.243	18.82
6	0.9937	-0.5626			94.356	31.012
7	0.9999	0.1597	150.0	-1.180	0.0	0.0
8	1.0000	-0.4123	150.0	120.992	141.549	46.519
9	0.9990	0.5259	55.0	1.402	130.463	42.883
10	1.0000	-0.6187	30.0	73.054	86.041	28.271
11	0.9814	7.5984			50.053	16.263
12	1.0000	10.7956	0.0	10.983	83.350	27.409
13	0.9990	15.7780	200.0	141.857	0.015	0.102
14	1.0008	13.0991			28.194	9.264
15	0.9576	15.4997			113.209	37.221
16	0.9990	22.4144	100.0	-20.864	0.0	0.0
17	1.0450	19.4142			0.0	0.0
18	0.9823	17.6096			58.557	19.241
19	0.9881	17.1917			81.999	26.938
20	0.9797	17.6264			91.067	29.939
21	0.9790	18.7191	300.0	21.432	0.0	0.0
22	0.9863	16.8698			51.546	16.934
23	0.9931	19.1353			38.0	44.0
24	0.9901	20.6382			100.888	33.157
25	0.9900	20.9718	0.0	191.044	122.966	40.432
26	0.9506	21.0031			164.0	447.0
27	0.9762	21.5100			5.531	1.816
28	1.0050	22.2044	539.681	348.313	0.0	0.0
$DV_6 = 7.291 \times 10^{-3}$						

4.3 Descripción de Resultados Utilizando un *AG*

A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis realizado sobre las mismas redes de prueba de la sección anterior, pero con la ayuda de la herramienta propuesta en este Tesis, un programa para *AEE* utilizando un *AG* simple, tal y como se describió en el diagrama de flujo de la figura 3.3.

Como ya se describió en el Capítulo 3, la estrategia de restauración y las consideraciones son las mismas. En este caso, el *AG* realizó una búsqueda con base en su *FH* para optimizar una solución.

Las herramientas utilizadas para el análisis convencional abordado en la sección anterior, se integraron como parte de la evaluación de la *FO*. Y con estas herramientas, se analiza cada combinación de posibles soluciones, y el *AG* mediante su forma de búsqueda, decidió la solución que mejor se adapta a la *FO*.

A continuación se muestran, al igual que de la forma convencional, los resultados obtenidos por el programa de simulación del algoritmo propuesto. Se muestra el índice de comportamiento DV_M en cada etapa M de la secuencia correspondiente, y al final de cada secuencia, determinada mediante el análisis del algoritmo propuesto, se despliega una tabla en la que se comparó el índice de comportamiento en cada etapa M obtenida por dicho algoritmo, con el índice de comportamiento en la misma etapa M obtenida del análisis convencional descrito en la sección anterior para la misma red de prueba. Con estas comparaciones se validaron los resultados obtenidos.

La idea es demostrar las ventajas conseguidas con el algoritmo propuesto, y mostrar que el *AG* puede mejorar y optimizar un *AEE* de restauración en un tiempo de cómputo muy corto, sin cálculos tediosos y garantizando la seguridad y operación en el estado estacionario, en cada etapa del proceso restaurativo.

Para la simulación, como parámetros del *AG* se utilizó una población inicial de 100 individuos y un número máximo de generaciones de 50 para las tres redes de prueba. Aunque la referencia propone una ecuación para determinar el tamaño de la población, tal y como se refiere en el apéndice A (ecuación (A.1)), para nuestras simulaciones se determina una población inicial de 100 individuos, pues proporcionan una buena variedad de soluciones iniciales. La constante de sintonización *A* (ecuación 3.7) para todas las pruebas de esta sección es de 2.0.

Se utilizará una probabilidad de cruce (P_c) de 0.6 y una probabilidad de mutación (P_m) de 0.1 que, de acuerdo con la referencia, han presentado los mejores resultados para distintas aplicaciones [2].

Los resultados de las simulaciones utilizando el algoritmo genético simple descrito en el capítulo 3 se muestran en la siguiente sección.

4.3.1 Red de prueba de 5 nodos

Se presenta el mismo disturbio presentado en la sección 4.2.1. El factor de peso W_i (ecuación (3.7)) para los nodos, será de 0.3 para nodos de generación y 1.0 para nodos de carga. El voltaje de referencia V_{REF} para todos los nodos es de 1 p.u.

La secuencia de apertura de líneas seleccionada por el algoritmo propuesto, sugiere energizar las líneas L - 1, L - 4, L - 5, L - 7, L - 2, L - 3 y L - 6, respectivamente.

Tabla 4.40. Magnitudes nodales para la primera etapa de restauración de la red de 5 nodos con *AG*

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0061	0.000	20.025	4.166	0.0	0.0
2	0.9978	-0.6035			20.0	10.0
$DV_1 = 0.017522 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.41. Flujos de potencia en líneas de transmisión para la primera etapa de restauración de la red de 5 nodos utilizando un *AG*

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	20.0246	4.1659
L - 1	2	1	-19.9352	-9.921

En la segunda etapa, el programa decide energizar la línea L - 4 elevando los niveles de tensión de una etapa a otra.

Tabla 4.42. Magnitudes nodales para la segunda etapa de restauración de la red de 5 nodos con AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0156	0.000	41.406	-24.173	0.0	0.0
2	1.0203	-1.0607	20.00	33.141	20.0	10.0
4	0.988	-5.5985			40.0	5.0
$DV_2 = 0.3737 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.43. Flujos de potencia en líneas de transmisión para la segunda etapa de restauración de la red de 5 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	41.4062	-24.173
L - 1	2	1	-40.9800	19.2112
L - 4	2	4	40.9867	3.93
L - 4	4	2	-39.9976	-4.9967

En la tercera etapa el programa decide energizar la línea L - 5 elevando los niveles de tensión principalmente en el nodo 1.

Tabla 4.44. Magnitudes nodales para la tercera etapa de restauración de la red de 5 nodos con AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0434	0.000	63.22	5.546	0.0	0.0
2	1.0268	-1.9347	60.00	15.548	20.0	10.0
4	0.9948	-5.8747			40.0	5.0
5	0.9898	-5.8039			60.0	10.0
$DV_3 = 1.04062 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.45. Flujos de potencia en líneas de transmisión para la tercera etapa de restauración de la red de 5 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	63.2197	5.5459
L - 1	2	1	-62.4713	-9.7295
L - 4	2	4	40.9740	3.8362
L - 4	4	2	-39.9984	-4.9970
L - 5	2	5	61.4962	11.4423
L - 5	5	2	-59.9970	-9.9958

En la cuarta etapa el programa decide energizar la línea L - 7 reduciendo un poco los niveles de tensión de generación.

Tabla 4.46. Magnitudes nodales para la cuarta etapa de restauración de la red de 5 nodos con AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0383	0.000	63.179	-1.044	0.0	0.0
2	1.0255	-2.0166	60.00	17.106	20.0	10.0
4	0.9958	-6.0062			40.0	5.0
5	0.9930	-5.9579			60.0	10.0
$DV_4 = 0.807771 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.47. Flujos de potencia en líneas de transmisión para la cuarta etapa de restauración de la red de 5 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	63.1787	-1.0443
L - 1	2	1	-62.4373	-3.1206
L - 4	2	4	41.0090	2.5048
L - 4	4	2	-40.0375	-3.6768
L - 5	2	5	61.4275	7.7220
L - 5	5	2	-59.9594	-6.3743
L - 7	4	5	0.0389	-1.3201
L - 7	5	4	-0.0378	-3.6211

En la quinta etapa el programa decide energizar la línea L - 2.

Tabla 4.48. Magnitudes nodales para la quinta etapa de restauración de la red de 5 nodos con AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0491	0.000	102.669	29.746	0.0	0.0
2	1.0265	-1.8139	59.999	0.170	20.0	10.0
3	0.9842	-4.5226			38.117	15.0
4	0.9969	-5.7953			40.0	5.0
5	0.9941	-5.7471			60.0	10.0
$DV_5 = 1.3845 \times 10^{-3}$						

En esta etapa se tira carga en el recién energizado nodo 3 tal y como sucedió en la forma convencional. Se puede observar en las magnitudes de voltaje y ángulo de fase que se mantiene mayor estabilidad que de la forma convencional. Esto debido a la estrategia de restauración seleccionada.

Tabla 4.49. Flujos de potencia en líneas de transmisión para la quinta etapa de restauración de la red de 5 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	63.2257	15.9329
L - 1	2	1	-62.4320	-20.0148
L - 2	1	3	39.4434	13.8136
L - 2	3	1	-38.1130	-14.9954
L - 4	2	4	41.0070	2.4858
L - 4	4	2	-40.0375	-3.6727
L - 5	2	5	61.4245	7.6993
L - 5	5	2	-59.9597	-6.3677
L - 7	4	5	0.0389	-1.3241
L - 7	5	4	-0.0378	-3.6279

Tabla 4.50. Magnitudes nodales para la sexta etapa de restauración de la red de 5 nodos con AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0331	0.000	109.518	-8.834	0.0	0.0
2	1.0235	-2.645	60.00	34.746	20.0	10.0
3	1.0002	-3.8862			45.0	15.0
4	0.9937	-6.6503			40.0	5.0
5	0.9909	-6.6019			60.0	10.0
$DV_6 = 0.6989 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.51. Flujos de potencia en líneas de transmisión para la sexta etapa de restauración de la red de 5 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	78.7149	-11.0329
L - 1	2	1	77.5423	8.2063
L - 2	1	3	30.8033	2.1985
L - 2	3	1	-30.0744	-5.1811
L - 3	2	3	15.0953	6.2321
L - 3	3	2	-14.9251	-9.8174
L - 4	2	4	41.0131	2.5425
L - 4	4	2	-40.0373	-3.6847
L - 5	2	5	61.4335	7.7673
L - 5	5	2	-59.9589	-6.3875
L - 7	4	5	0.0390	-1.3119
L - 7	5	4	-0.0379	-3.6079

Tabla 4.52. Magnitudes nodales para la última etapa de restauración de la red de 5 nodos con AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0308	0.000	109.238	-13.635	0.0	0.0
2	1.0241	-2.4551	60.00	36.692	20.0	10.0
3	0.9983	-4.8788			45.0	15.0
4	0.9980	-5.2008			40.0	5.0
5	0.9931	-5.9917			60.0	10.0
$DV_7 = 0.59003 \times 10^{-3}$						

Completado el número de etapas en el análisis de restauración, se obtiene la *FO* producto de la sumatoria de los índices de comportamiento *DV* de todas las etapas.

La tabla 4.53 es una tabla comparativa de los resultados obtenidos en cada etapa para la secuencia de restauración convencional y la restauración con *AG*. La primera columna se refiere al índice de comportamiento desde la primera hasta la última etapa. La segunda y cuarta etapa se refiere al número de línea seleccionada para energizarse en la etapa *M*. La tercera y quinta columna se refiere a la magnitud de la *FO* (Ecuación 3.5) para cada tipo de secuencia.

Tabla 4.53.- Evaluación de la FO, en forma convencional y utilizando un AG, para la red de 5 nodos. La secuencia muestra el orden en el que fueron energizadas ($\times 10^{-3}$)

Tabla comparativa de AEE				
	<i>Secuencia convencional</i>		<i>Secuencia con AG</i>	
DV_1	1	0.01753	1	0.01752
DV_2	4	0.52415	4	0.37369
DV_3	5	1.88997	5	1.04062
DV_4	2	3.05480	7	0.80777
DV_5	3	1.98058	2	1.38451
DV_6	6	1.65522	3	0.69885
DV_7	7	1.31439	6	0.59002
FO	10.44		4.913	

En esta secuencia se observa que el algoritmo genético optimiza la solución del problema eligiendo una secuencia de energización de elementos que minimiza las desviaciones en los voltajes nodales durante toda la secuencia. Además, se observa que la secuencia elegida por el algoritmo es similar con respecto a la determinada de forma convencional. En las primeras tres etapas se eligen la misma secuencia.

En cuanto al tiempo del cálculo digital para esta red de prueba, se tiene que en un procesador digital tipo Pentium 4, a 1.7 GHz, el programa tardó en optimizar la secuencia restaurativa en 7 minutos y medio.

4.3.2 Red de 14 nodos utilizando un AG

A continuación se aplica el algoritmo propuesto sobre la red de prueba de 14 nodos. Para este caso se presenta el mismo disturbio presentado en la sección 4.2.2.

El factor de peso W_i (ecuación (3.7)) para los nodos, será de 0.3 para nodos de generación y 1.0 para nodos de carga. El voltaje de referencia V_{REF} para todos los nodos es de 1 p.u.

En la primera etapa el algoritmo decide energizar la línea L – 7, y los resultados se muestran en las tablas 4.54 y 4.55.

Tabla 4.54. Magnitudes nodales para la primera etapa de restauración en la red de 14 nodos utilizando un AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0326	0.0	211.338	-55.555	0.0	0.0
2	1.0315	-7.2967	94.497	158.337	81.7	82.7
3	1.0133	-16.4480	0.0	50.301	94.2	19.0
4	0.9877	-14.2542			47.8	-3.9
5	0.9942	-13.0042			7.6	1.8
7	1.0204	-18.3429			0.0	0.0
8	1.0094	-18.3429	0.0	-6.301	0.0	0.0
9	1.0088	-20.6022			29.5	16.6
10	0.9983	-21.0658			9.0	5.8
11	0.9919	-21.3693			3.5	1.8
14	0.9749	-22.5790			14.9	5.6
$DV_1 = 2.1892 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.56. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la primera etapa de restauración de la red de 14 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	211.3378	-55.5553
L - 3	2	3	83.1253	-8.2139
L - 4	2	4	72.0110	4.1385
L - 5	2	5	60.3747	3.4499
L - 6	3	4	-14.1182	19.364
L - 7	4	5	-50.4583	0.6799
L - 8	4	7	36.8704	-15.2638
L - 9	4	9	20.4406	-2.7253
L - 14	7	8	0.0	6.3696
L - 15	7	9	36.8871	11.5436
L - 16	9	10	12.5836	7.8104
L - 17	9	14	15.2247	5.6978
L - 18	10	11	3.5125	1.8300

En la segunda etapa, el AG decide energizar la línea L - 2. Los resultados de la simulación se muestran en las tablas 4.56 y 4.57.

Tabla 4.56. Magnitudes nodales para la segunda etapa de restauración en la red de 14 nodos utilizando un AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0134	0.0	225.139	-52.332	0.0	0.0
2	1.0152	-5.7565	76.616	146.274	81.7	82.7
3	0.9889	-13.7530	0.0	36.393	94.2	19.0
4	0.9813	-10.5663			47.8	-3.9
5	0.9907	-8.4444			7.6	1.8
7	1.0252	-14.6689			0.0	0.0
8	1.0268	-14.6689	0.0	0.031	0.0	0.0
9	1.0119	-16.9150			29.5	16.6
10	1.0014	-17.3758			9.0	5.8
11	0.9950	-17.6775			3.5	1.8
14	0.9781	-18.8796			14.9	5.6
$DV_2 = 2.157 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.57. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la segunda etapa de restauración de la red de 14 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	159.2175	-49.0550
L - 2	1	5	65.9220	-3.2771
L - 3	2	3	70.9163	-2.9498
L - 4	2	4	49.1146	3.3500
L - 5	2	5	28.9134	3.7086
L - 6	3	4	-25.5622	13.5745
L - 7	4	5	-83.4873	5.6663
L - 8	4	7	36.9324	-20.7763
L - 9	4	9	20.3740	-4.4248
L - 14	7	8	0.0	-0.8987
L - 15	7	9	36.9569	13.1977
L - 16	9	10	12.5846	7.8089
L - 17	9	14	15.2244	5.6929
L - 18	10	11	3.5129	1.8297

Para la etapa tres de la secuencia, el algoritmo decide energizar la línea L - 10 incluyendo un transformador. Los resultados se muestran en las tablas 4.58 y 4.59.

Tabla 4.58. Magnitudes nodales para la tercera etapa de restauración en la red de 14 nodos utilizando un AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0120	0.0	221.425	-74.419	0.0	0.0
2	1.0267	-5.7462	92.219	170.051	81.7	82.7
3	1.0082	-13.8771	0.0	48.110	94.2	19.0
4	0.9867	-10.7121			47.8	-3.9
5	0.9927	-8.6924			7.6	1.8
6	0.9957	-10.2926			11.2	7.5
7	1.0254	-14.7883			0.0	0.0
8	1.0208	-14.7883	0.0	-2.704	0.0	0.0
9	1.0130	-17.0294			29.5	16.6
10	1.0026	-17.4892			9.0	5.8
11	0.9962	-17.7902			3.5	1.8
14	0.9793	-18.9895			14.9	5.6

$DV_3 = 1.989 \times 10^{-3}$

Tabla 4.59. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la tercera etapa de restauración de la red de 14 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	153.9437	-69.4599
L - 2	1	5	67.4815	-4.9588
L - 3	2	3	73.3433	-7.1753
L - 4	2	4	52.4215	6.1800
L - 5	2	5	33.3696	8.1049
L - 6	3	4	-23.2417	20.8882
L - 7	4	5	-78.1304	11.5187
L - 8	4	7	36.9036	-18.2905
L - 9	4	9	20.4080	-3.6853
L - 10	5	6	11.1986	-1.0346
L - 14	7	8	0.0	2.7168

Lin	NS	NE	P	Q
L - 15	7	9	36.9253	12.32
L - 16	9	10	12.5849	7.8085
L - 17	9	14	15.2243	5.6912
L - 18	10	11	3.5130	1.8296

A continuación el algoritmo decide restaurar la línea L - 12 en la cuarta etapa de restauración con un AG.

El compensador síncrono del nodo 6 se considera en sincronía con el resto del sistema. Con la energización de esta línea, se suministra energía a la carga del nodo 12. Los resultados se muestran en las tablas 4.60 y 4.61.

Tabla 4.60. Magnitudes nodales para la cuarta etapa de restauración en la red de 14 nodos utilizando un AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0113	0.0	219.646	-67.179	0.0	0.0
2	1.0227	-5.6061	100.205	156.407	81.7	82.7
3	1.0109	-13.9726	0.0	54.336	94.2	19.0
4	0.9849	-10.8288			47.8	-3.9
5	0.9897	-8.8514			7.6	1.8
6	0.9909	-11.3504	0.0	1.293	11.2	7.5
7	1.0258	-14.9129			0.0	0.0
8	1.0236	-14.9129	0.0	-1.227	0.0	0.0
9	1.0129	-17.1543			29.5	16.6
10	1.0025	-17.6142			9.0	5.8
11	0.9961	-17.9152			3.5	1.8
12	0.9790	-12.1559			6.1	1.6
14	0.9792	-19.1146			14.9	5.6
$DV_4 = 2.552 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.61. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la cuarta etapa de restauración de la red de 14 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	150.9544	-63.1641
L - 2	1	5	68.6920	-4.0145
L - 3	2	3	74.5487	-10.6276
L - 4	2	4	54.1303	4.5162
L - 5	2	5	35.7695	6.8177
L - 6	3	4	-22.1508	23.1765
L - 7	4	5	-75.4677	13.2678
L - 8	4	7	36.9155	-19.3505
L - 9	4	9	20.3940	-4.0048
L - 10	5	6	17.3491	-0.0940
L - 12	6	12	6.1509	1.7061
L - 14	7	8	0.0	1.2297
L - 15	7	9	36.9377	12.6734
L - 16	9	10	12.5847	7.8086
L - 17	9	14	15.2244	5.6914
L - 18	10	11	3.5129	1.8296

A continuación el algoritmo decide energizar la línea L - 11 en la quinta etapa de proceso. Los resultados se muestran en las tablas 4.62 y 4.63.

Tabla 4.62. Magnitudes nodales para la quinta etapa de restauración en la red de 14 nodos utilizando un AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0097	0.0	220.682	-57.631	0.0	0.0
2	1.0152	-5.5412	98.924	138.550	81.7	82.7
3	1.0056	-13.9435	0.0	54.051	94.2	19.0
4	0.9823	-10.7400			47.8	-3.9
5	0.9885	-9.0564			7.6	1.8
6	1.0182	-13.2552	0.0	14.282	11.2	7.5
7	1.0168	-13.9710			0.0	0.0
8	1.0050	-13.9710	0.0	-6.728	0.0	0.0
9	1.0059	-15.7518			29.5	16.6
10	0.9999	-15.6309			9.0	5.8
11	1.0048	-14.6062			3.5	1.8
12	1.0066	-14.0177			6.1	1.6
14	0.9719	-17.7402			14.9	5.6
$DV_5 = 1.865 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.63. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la quinta etapa de restauración de la red de 14 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	150.6812	-53.3340
L - 2	1	5	70.0005	-4.2966
L - 3	2	3	73.6738	-11.5792
L - 4	2	4	52.5417	2.0071
L - 5	2	5	36.8852	2.8325
L - 6	3	4	-23.0132	21.8924
L - 7	4	5	-65.4246	6.6953
L - 8	4	7	28.8822	-16.5535
L - 9	4	9	16.0167	-3.6014
L - 10	5	6	29.8968	-10.8091
L - 11	6	11	12.5549	0.9757
L - 12	6	12	6.1482	1.7004
L - 14	7	8	0.0	6.8065
L - 15	7	9	28.8907	10.4821
L - 16	9	10	0.1702	7.1234
L - 17	9	14	15.2274	5.7041
L - 18	10	11	-8.8455	1.2816

A continuación el algoritmo decidió energizar la línea 13 en la sexta etapa de restauración. Los resultados se muestran en las tablas 4.64 y 4.65.

Tabla 4.64. Magnitudes nodales para la sexta etapa de restauración en la red de 14 nodos utilizando un AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0097	0.0	218.055	-54.406	0.0	0.0
2	1.0152	-5.3537	115.294	150.354	81.7	82.7
3	0.9858	-13.8053	0.0	36.157	94.2	19.0
4	0.9757	-10.9823			47.8	-3.9
5	0.9834	-9.3818			7.6	1.8
6	1.0209	-15.0590	0.0	26.892	11.2	7.5
7	1.0124	-14.4777			0.0	0.0
8	1.0004	-14.4777	0.0	-6.781	0.0	0.0
9	1.0033	-16.3963			29.5	16.6
10	0.9984	-16.4748			9.0	5.8
11	1.0057	-15.9130			3.5	1.8
12	1.0093	-15.8174			6.1	1.6
13	1.0044	-15.8273			13.5	5.8
14	0.9692	-18.3954			14.9	5.6
$DV_6 = 2.458 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.65. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la sexta etapa de restauración de la red de 14 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	145.4262	-52.1509
L - 2	1	5	72.6286	-2.2554
L - 3	2	3	74.9492	-1.7588
L - 4	2	4	57.2568	4.6272
L - 5	2	5	42.3289	4.3503
L - 6	3	4	-21.8038	13.3627
L - 7	4	5	-62.6999	2.3491
L - 8	4	7	30.8996	-17.4168
L - 9	4	9	17.1372	-4.1767
L - 10	5	6	40.2924	-12.9597
L - 11	6	11	9.313	3.3902
L - 12	6	12	6.148	1.6998
L - 13	6	13	13.6416	6.0788
L - 14	7	8	0.0	6.8616
L - 15	7	9	30.9110	8.9177
L - 16	9	10	3.3133	4.4890
L - 17	9	14	15.2279	5.7079
L - 18	10	11	-5.6966	-1.3368

A continuación el algoritmo decidió energizar la línea L - 20 en la etapa siete del análisis. Los resultados se muestran en las tablas 4.66 y 4.67.

Tabla 4.66. Magnitudes nodales para la etapa siete de restauración en la red de 14 nodos utilizando un AG.

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0097	0.0	218.361	-64.012	0.0	0.0
2	1.0203	-5.4267	115.025	165.473	81.7	82.7
3	0.9855	-13.7229	0.0	31.654	94.2	19.0
4	0.9783	-10.9371			47.8	-3.9
5	0.9857	-9.4020			7.6	1.8
6	1.0227	-15.4265	0.0	26.540	11.2	7.5

ND	V	ANG	PG	QG	PC	QC
7	1.0134	-14.2214			0.0	0.0
8	0.9948	-14.2214	0.0	-10.511	0.0	0.0
9	1.0074	-16.0215			29.5	16.6
10	1.0023	-16.2293			9.0	5.8
11	1.0088	-15.9701			3.5	1.8
12	1.0111	-16.1822			6.1	1.6
13	1.0003	-16.4955			13.5	5.8
14	0.9854	-17.3302			14.9	5.6
$DV_7 = 1.772 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.67. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la etapa siete de restauración de la red de 14 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	145.6483	-60.7485
L - 2	1	5	72.7126	-3.2631
L - 3	2	3	74.6094	0.9975
L - 4	2	4	57.0516	6.2149
L - 5	2	5	42.6389	5.9833
L - 6	3	4	-22.1067	11.8221
L - 7	4	5	-60.4824	2.1115
L - 8	4	7	29.1420	-16.8154
L - 9	4	9	16.2054	-4.5689
L - 10	5	6	42.9243	-12.5221
L - 11	6	11	6.7920	3.9200
L - 12	6	12	6.1478	1.6995
L - 13	6	13	18.7939	8.1614
L - 14	7	8	0.0	10.7073
L - 15	7	9	29.1511	6.0145
L - 16	9	10	5.7894	3.8645
L - 17	9	14	10.0609	3.5642
L - 18	10	11	-3.2259	-1.9757
L - 20	13	14	5.0290	1.8386

A continuación se decidió energizar la línea L - 19 en la última etapa. Los resultados se muestran en las tablas 4.68 y 4.69.

Tabla 4.68. Magnitudes nodales para la última etapa de restauración en la red de 14 nodos utilizando un AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0172	0.0	218.483	-38.692	0.0	0.0
2	1.0152	-5.1885	114.462	137.855	81.7	82.7
3	0.9851	-13.6121	0.0	35.289	94.2	19.0
4	0.9758	-10.7851			47.8	-3.9
5	0.9832	-9.2277			7.6	1.8
6	1.0114	-15.2651	0.0	23.585	11.2	7.5
7	1.0128	-14.1169			0.0	0.0
8	1.0002	-14.1169	0.0	-7.165	0.0	0.0
9	1.0041	-15.9443			29.5	16.6
10	0.9976	-16.1455			9.0	5.8
11	1.0008	-15.8557			3.5	1.8
12	0.9962	-16.2087			6.1	1.6

ND	V	ANG	PG	QG	PC	QC
13	0.9918	-16.2972			13.5	5.8
14	0.9797	-17.2137			14.9	5.6
$DV_g = 1.86 \times 10^{-3}$						

Tabla 4.69. Flujos de potencia en líneas de transmisión en la última etapa de restauración de la red de 14 nodos utilizando un AG

Lin	NS	NE	P	Q
L - 1	1	2	145.6798	-39.8564
L - 2	1	5	72.8034	1.1645
L - 3	2	3	74.7566	-1.3421
L - 4	2	4	56.9727	4.6783
L - 5	2	5	42.4801	4.4913
L - 6	3	4	-21.9850	12.9588
L - 7	4	5	-60.9290	2.5154
L - 8	4	7	29.4710	-17.6723
L - 9	4	9	16.3491	-4.3939
L - 10	5	6	42.4333	-9.0350
L - 11	6	11	6.3720	2.3594
L - 12	6	12	7.6328	2.3864
L - 13	6	13	17.2385	6.6358
L - 14	7	8	0.0	7.2552
L - 15	7	9	29.4802	8.4555
L - 16	9	10	6.1972	5.4028
L - 17	9	14	10.1269	4.3947
L - 18	10	11	-2.8236	-0.4536
L - 19	12	13	1.4560	0.6264
L - 20	13	14	4.9687	1.0227

En la secuencia propuesta por el AG, se asegura dar mayor estabilidad al sistema en la energización de la carga total, debido a que la solución es óptima.

La tabla 4.70 es una tabla comparativa de los resultados obtenidos en cada etapa para la secuencia de restauración convencional y la restauración con AG. La primera columna se refiere al índice de comportamiento desde la primera hasta la última etapa. La segunda y cuarta etapa se refiere al número de línea seleccionada para energizarse en la etapa M . La tercera y quinta columna se refiere a la magnitud de la FO (Ecuación 3.5) para cada tipo de secuencia.

Tabla 4.70.- Comparación de la evaluación de la FO, en forma convencional y utilizando un AG, para la red de 14 nodos. La secuencia muestra el orden en el que fueron energizadas ($\times 10^{-3}$)

Tabla comparativa de AEE				
	<i>Secuencia convencional</i>		<i>Secuencia con AG</i>	
DV_1	10	4.9490	7	2.1890
DV_2	12	5.3800	2	2.1570
DV_3	13	5.8360	10	1.9890
DV_4	2	5.8130	12	2.5520
DV_5	7	5.7960	11	1.8650
DV_6	19	5.8300	13	2.4580
DV_7	20	5.4530	20	1.7720
DV_8	11	5.3490	19	1.8600
FO	44.4060		16.8422	

En cuanto al tiempo del cálculo digital para esta red de prueba, se tiene que en un procesador digital tipo Pentium 4, a 1.7 GHz, el programa tardó en optimizar la secuencia restaurativa en 40 minutos aproximadamente.

4.3.3 Red de prueba de 28 nodos

La siguiente secuencia es la secuencia elegida por el AG simple propuesto en esta tesis para la red de 28 nodos. Los resultados obtenidos serán comparados con los de la forma convencional de la sección anterior como se hizo en las redes de prueba anteriores.

Se presenta el mismo disturbio presentado en la sección 4.2.3. El factor de peso W_i (ecuación (3.7)) para los nodos, será de 0.3 para nodos de generación y 1.0 para nodos de carga. El voltaje de referencia V_{REF} para los nodos de generación es de 0.985 y para los nodos de carga de 0.992.

La primera línea a restaurar elegida para mantener en este caso, la convergencia en FP, es la línea L - 19. Los resultados de FP se ilustran en la tabla 4.71.

Tabla 4.71. Magnitudes nodales para la primera etapa de restauración en la red de 28 nodos utilizando un AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	0.9897	0.0	69.064	-49.798	0.0	0.0
2	0.9958	-3.9067			0.0	0.0
3	0.9870	-3.9576			14.053	4.662

ND	V	ANG	PG	QG	PC	QC
4	0.9870	-3.3267			57.227	18.811
5	0.9822	-3.2651			57.243	18.82
6	0.9954	-0.6824			94.356	31.012
7	1.0016	0.0375	150.0	-20.551	0.0	0.0
8	0.9998	-0.5173	150.0	115.717	141.549	46.519
9	1.0057	0.3643	55.0	43.355	130.463	42.883
10	0.9994	-0.7219	30.0	64.794	86.041	28.271
11	0.9840	7.4347			50.053	16.263
12	1.0025	10.6163	0.0	28.267	83.350	27.409
13	0.9990	20.6951	200.0	158.362	0.015	0.102
14	1.0008	18.0163			28.194	9.264
15	0.9639	22.1136			113.209	37.221
16	0.9804	29.1172	100.0	-60.079	0.0	0.0
17	1.0462	25.9801			0.0	0.0
18	0.9814	24.6850			58.557	19.241
19	1.0365	18.4943			81.999	26.938
20	0.9793	23.1464			91.067	29.939
21	0.9851	25.2929	300.0	143.636	0.0	0.0
22	0.9935	20.4665			51.546	16.934
23	1.0001	22.7015			38.0	44.0
24	0.9839	24.4444			100.888	33.157
25	0.9884	24.7442	0.0	315.424	122.966	40.432
26	0.9429	24.8241			164.0	447.0
27	0.9664	25.3620			5.531	1.816
28	0.9926	26.0900	540.973	175.733	0.0	0.0
$DV_I = 10.11 \times 10^{-3}$						

La restauración de la línea L - 31 se efectúa en la segunda etapa de la secuencia de restauración elegida por el AG. Los resultados de FP se muestran en la tabla 4.72.

Tabla 4.72. Magnitudes nodales para la segunda etapa de restauración en la red de 28 nodos utilizando un AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	0.9974	0.0	68.592	-43.231	0.0	0.0
2	0.9965	-3.8101			0.0	0.0
3	0.9887	-3.8587			14.053	4.662
4	0.9886	-3.2298			57.227	18.811
5	0.9841	-3.1706			57.243	18.82
6	0.9941	-0.5253			94.356	31.012
7	1.0006	0.1960	150.0	9.980	0.0	0.0
8	0.9919	-0.3131	150.0	99.230	141.549	46.519
9	1.0072	0.5100	55.0	67.528	130.463	42.883
10	0.9886	-0.4980	30.0	18.872	86.041	28.271
11	0.9845	7.6180			50.053	16.263
12	1.0029	10.7967	0.0	28.094	83.350	27.409
13	0.9992	20.8951	200.0	165.964	0.015	0.102
14	1.0009	18.2170			28.194	9.264
15	0.9595	22.3688			113.209	37.221
16	0.9753	29.4371	100.0	-60.935	0.0	0.0
17	1.0416	26.2691			0.0	0.0
18	0.9866	24.4795			58.557	19.241
19	0.9944	24.0714			81.999	26.938

ND	V	ANG	PG	QG	PC	QC
20	0.9765	23.3933			91.067	29.939
21	0.9809	25.5759	300.0	80.520	0.0	0.0
22	0.9943	23.9221			51.546	16.934
23	1.0009	26.1535			38.0	44.0
24	1.0023	27.7414			100.888	33.157
25	1.0039	28.0541	0.0	236.750	122.966	40.432
26	0.9630	28.10174			164.0	447.0
27	0.9874	28.6040			5.531	1.816
28	1.0148	29.2906	540.695	305.616	0.0	0.0
$DV_2 = 6.078 \times 10^3$						

En la tercera etapa del proceso de restauración, el AG elige restaurar la línea L - 20. Los resultados del archivo de salida del programa propuesto se muestran en la tabla 4.73.

Tabla 4.73. Magnitudes nodales para la tercera etapa de restauración en la red de 28 nodos utilizando un AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	0.9989	0.0	69.251	-42.172	0.0	0.0
2	0.9970	-3.8337			0.0	0.0
3	0.9890	-3.8759			14.053	4.662
4	0.9889	-3.2474			57.227	18.811
5	0.9848	-3.1884			57.243	18.82
6	0.9997	-0.6610			94.356	31.012
7	1.0059	0.0527	150.0	186.844	0.0	0.0
8	0.9864	-0.3571	150.0	-13.295	141.549	46.519
9	0.9994	0.4756	55.0	-32.495	130.463	42.883
10	0.9853	-0.5631	30.0	50.931	86.041	28.271
11	0.9817	7.6002			50.053	16.263
12	1.0003	10.7956	0.0	6.826	83.350	27.409
13	1.0006	15.7710	200.0	159.426	0.015	0.102
14	1.0024	13.1001			28.194	9.264
15	0.9580	17.1236			113.209	37.221
16	0.9710	24.2326	100.0	-65.162	0.0	0.0
17	1.0394	21.0356			0.0	0.0
18	0.9855	19.2155			58.557	19.241
19	0.9937	18.7852			81.999	26.938
20	0.9760	18.1917			91.067	29.939
21	0.9794	20.3403	300.0	76.284	0.0	0.0
22	0.9954	18.5211			51.546	16.934
23	1.0020	20.7479			38.0	44.0
24	1.0052	22.2257			100.888	33.157
25	1.0070	22.5343	0.0	245.177	122.966	40.432
26	0.9659	22.5847			164.0	447.0
27	0.9901	23.0856			5.531	1.816
28	1.0172	23.7700	536.522	300.589	0.0	0.0
$DV_3 = 6.114 \times 10^{-3}$						

En la cuarta etapa se elige la restauración de la línea L - 27. Los resultados se muestran en la tabla 4.74.

Tabla 4.74. Magnitudes nodales para la cuarta etapa de restauración en la red de 28 nodos utilizando un AG.

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0021	0.0	69.284	-37.036	0.0	0.0
2	0.9947	-3.8032			0.0	0.0
3	0.9880	-3.8384			14.053	4.662
4	0.9880	-3.2088			57.227	18.811
5	0.9834	-3.1521			57.243	18.82
6	0.9867	-0.4328			94.356	31.012
7	0.9930	0.2996	150.0	96.364	0.0	0.0
8	0.9863	-0.2287	150.0	68.095	141.549	46.519
9	0.9853	0.7359	55.0	-56.883	130.463	42.883
10	0.9861	-0.4386	30.0	68.370	86.041	28.271
11	0.9827	7.8471			50.053	16.263
12	1.0012	11.0367	0.0	24.277	83.350	27.409
13	0.9994	16.0248	200.0	139.842	0.015	0.102
14	1.0012	13.3480			28.194	9.264
15	0.9609	16.2468			113.209	37.221
16	0.9777	23.2894	100.0	-59.509	0.0	0.0
17	1.0432	20.1365			0.0	0.0
18	0.9877	18.3226			58.557	19.241
19	0.9953	17.8910			81.999	26.938
20	0.9796	18.3895			91.067	29.939
21	0.9822	19.4452	300.0	81.61	0.0	0.0
22	0.9939	17.6104			51.546	16.934
23	1.0005	19.8434			38.0	44.0
24	1.0027	21.3111			100.888	33.157
25	1.0057	21.6120	0.0	276.628	122.966	40.432
26	0.9630	21.6744			164.0	447.0
27	0.9867	22.1838			5.531	1.816
28	1.0132	22.8775	535.390	262.897	0.0	0.0
$DV_4 = 5.883 \times 10^{-3}$						

Para la etapa cinco del proceso de restauración, El AG propone restaurar la línea L - 25. Los resultados del archivo de salida se muestran en la tabla 4.75.

Tabla 4.75. Magnitudes nodales para la quinta etapa de restauración en la red de 28 nodos utilizando un AG.

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0009	0.0	69.393	-40.268	0.0	0.0
2	0.9969	-3.8228			0.0	0.0
3	0.9895	-3.8607			14.053	4.662
4	0.9895	-3.2328			57.227	18.811
5	0.9850	-3.1749			57.243	18.82
6	0.9919	-0.5264			94.356	31.012
7	0.9981	0.1985	150.0	31.599	0.0	0.0
8	0.9899	-0.3137	150.0	66.714	141.549	46.519
9	1.0010	0.5380	55.0	32.838	130.463	42.883
10	0.9891	-0.5197	30.0	55.560	86.041	28.271
11	0.9855	7.5711			50.053	16.263
12	1.0039	10.7434	0.0	24.187	83.350	27.409
13	0.9990	15.7435	200.0	99.301	0.015	0.102
14	1.0008	13.0646			28.194	9.264

ND	V	ANG	PG	QG	PC	QC
15	0.9722	15.9404			113.209	37.221
16	0.9803	22.8921	100.0	-73.491	0.0	0.0
17	1.0530	19.7443			0.0	0.0
18	0.9939	18.0891			58.557	19.241
19	0.9975	17.7666			81.999	26.938
20	0.9905	17.9800			91.067	29.939
21	0.9931	19.0680	300.0	128.539	0.0	0.0
22	0.9956	17.4011			51.546	16.934
23	1.0021	19.6273			38.0	44.0
24	0.9991	21.1204			100.888	33.157
25	1.0005	21.4357	0.0	234.367	122.966	40.432
26	0.9596	21.4827			164.0	447.0
27	0.9842	21.9881			5.531	1.816
28	1.0117	22.6786	535.156	297.885	0.0	0.0
$DV_5 = 6.445 \times 10^{-3}$						

A continuación, en la tabla 4.76 se muestran los resultados obtenidos del análisis de la última etapa donde se energiza la línea L - 22.

Tabla 4.76. Magnitudes nodales para la última etapa de restauración en la red de 28 nodos utilizando un AG

ND	V	ANG	GENERACIÓN		CARGA	
			PG	QG	PC	QC
1	1.0004	0.0	69.514	-39.991	0.0	0.0
2	0.9960	-3.8338			0.0	0.0
3	0.9889	-3.8696			14.053	4.662
4	0.9888	-3.2409			57.227	18.811
5	0.9841	-3.1833			57.243	18.82
6	0.9876	-0.4834			94.356	31.012
7	0.9939	0.2478	150.0	41.461	0.0	0.0
8	0.9917	-0.3144	150.0	96.64	141.549	46.519
9	0.9892	0.6525	55.0	-33.955	130.463	42.883
10	0.9920	-0.5265	30.0	77.413	86.041	28.271
11	0.9830	7.7264			50.053	16.263
12	1.0015	10.9141	0.0	19.827	83.350	27.409
13	1.0003	15.8856	200.0	125.848	0.015	0.102
14	1.0021	13.2130			28.194	9.264
15	0.9643	15.5781			113.209	37.221
16	0.9758	22.6116	100.0	-67.636	0.0	0.0
17	1.0456	19.4419			0.0	0.0
18	0.9882	17.6643			58.557	19.241
19	0.9935	17.2554			81.999	26.938
20	0.9851	17.6851			91.067	29.939
21	0.9854	18.7551	300.0	84.99	0.0	0.0
22	0.9924	16.9432			51.546	16.934
23	0.9990	19.1828			38.0	44.0
24	1.0013	20.6447			100.888	33.157
25	1.0052	20.9388	0.0	302.527	122.966	40.432
26	0.9613	21.0111			164.0	447.0
27	0.9845	21.5270			5.531	1.816
28	1.0105	22.2276	534.877	234.327	0.0	0.0
$DV_6 = 5.864 \times 10^{-3}$						

La tabla 4.77 es una tabla comparativa de los resultados obtenidos en cada etapa para la secuencia de restauración convencional y la restauración con *AG*. La primera columna se refiere al índice de comportamiento desde la primera hasta la última etapa. La segunda y cuarta etapa se refiere al número de línea seleccionada para energizarse en la etapa *M*. La tercera y quinta columna se refiere a la magnitud de la *FO* (Ecuación 3.5) para cada tipo de secuencia.

Tabla 4.77.- Evaluación de la *FO* en forma convencional, y utilizando un *AG*, para la red de 28 nodos. La secuencia muestra el orden en el que fueron energizadas ($\times 10^3$).

Tabla comparativa de AEE				
	<i>Secuencia convencional</i>		<i>Secuencia con AG</i>	
<i>DV</i> ₁	19	10.970	19	10.110
<i>DV</i> ₂	31	7.375	31	6.078
<i>DV</i> ₃	27	7.317	20	6.114
<i>DV</i> ₄	25	7.387	27	5.883
<i>DV</i> ₅	20	7.384	25	6.445
<i>DV</i> ₆	22	7.291	22	5.864
FO	47.720		40.490	

En cuanto al tiempo del cálculo digital para esta red de prueba, se tiene que en un procesador digital tipo Pentium 4, a 1.7 GHz, el programa tardó en optimizar la secuencia restaurativa en 1 hora con 30 minutos aproximadamente.

Como la estrategia seleccionada enfatiza en la estabilidad del sistema durante toda la secuencia, el algoritmo propuesto ajustó las variables de control en cada etapa de tal manera que no varíen bruscamente de una etapa a otra, situación que es aceptable en el caso real.

4.4 Variación de los Parámetros del Algoritmo Genético

En esta sección se presentan resultados de simulaciones variando los parámetros del algoritmo genético descritos en el capítulo anterior. Se llevaron a cabo algunas simulaciones considerando las tres redes de prueba consideradas en ésta tesis, con el fin de observar la eficacia del algoritmo con base en dichos parámetros, aplicando variantes en dichos parámetros del *AG*. Se busca hacer ciertas variaciones en *P_c*, *P_m*, y *A*, para comparar y obtener una sintonización óptima global.

4.4.1 Red de Prueba de 5 Nodos

4.4.1.1 Variando el Porcentaje de Cruce

Para esta simulación se deja P_m en el 10%, y P_c variando desde 0% hasta el 100% con el fin de comparar el grado de optimización alcanzado en cada caso. En la tabla 4.78, se muestra la comparación de la FO variando P_c .

Tabla 4.78. Tabla comparativa variando el P_c . ($FO \times 10^{-3}$)

P_c	FO	Convencional
0.0	6.3877	10.4367
0.1	8.7146	
0.2	9.5755	
0.3	8.8162	
0.4	8.6160	
0.5	5.7710	
0.6	4.9140	
0.7	6.5350	
0.8	7.6582	
0.9	8.3146	
1.0	9.2853	

En la última columna se muestra la FO obtenida del análisis convencional para compararlo con el resto. Para las siguientes pruebas, se opta por un P_c del 60%.

4.4.1.2 Variando el Porcentaje de Mutación

En esta sección, el P_m se irá variando desde 0% hasta el 100% para ver que tanto el algoritmo propuesto puede minimizar la FO con P_c de 0.6. Los resultados se muestran en la tabla 4.79.

Tabla 4.79. Tabla comparativa variando el P_m . ($FO \times 10^{-3}$)

P_m	FO	Convencional 10.4367
0.0	8.5902	
0.1	4.9140	
0.2	8.2892	
0.3	7.9452	
0.4	8.5438	
0.5	8.1933	
0.6	7.9455	
0.7	7.6870	
0.8	7.7142	
0.9	8.5521	
1.0	8.7783	

4.4.1.3. Variando la Constante de Sintonización

De la ecuación (3.7), se tiene que al variar A , se puede variar también la eficiencia del algoritmo, y esto se refleja en la solución. En la tabla 4.80 se comparan resultados utilizando distintas constantes de sintonización, con un P_c de 60% y P_m de 10% para todas las simulaciones.

Tabla 4.80. Tabla comparativa variando la constante de sintonización. ($FO \times 10^{-3}$)

A	FO
0.5	6.7524
1.0	5.1620
2.0	4.1940
3.0	6.2505
4.0	6.7311
5.0	6.1096
10.0	6.7602
20.0	7.0894
30.0	7.4805
50.0	9.3098
100.0	8.6471

4.4.2 Red de Prueba de 14 Nodos

4.4.2.1 Variando el Porcentaje de Cruce

Después de las pruebas realizadas a la red de 5 nodos, se tiene aproximación una sintonización adecuada de los parámetros de *AG* simple empleado en este trabajo. Para la red de 14 nodos se realizaron las mismas pruebas para la variación de la P_c que en la sección anterior. En la tabla 4.81 se muestran los resultados obtenidos, mostrando únicamente aquellos P_c que mejor sintonizan el *AG*.

Tabla 4.81. Tabla comparativa variando el P_c .

P_c	FO	Convencional
0.5	0.01650	0.04441
0.6	0.01684	
0.7	0.02125	

Se demuestra con estos resultados que existe una pequeña mejoría con un P_c menor. Esto demuestra que el *AG* propuesto es capaz de encontrar una solución cercana al óptimo global, y que mejora por mucho una solución convencional en un tiempo de computo mucho menor.

4.4.2.2 Variando el Porcentaje de Mutación

En esta sección, el P_m se irá variando desde 0% hasta el 100% para observar que tanto el algoritmo puede minimizar la FO con P_c de 0.6. Los resultados se muestran en la tabla 4.82.

Tabla 4.82. Tabla comparativa variando el P_m .

P_m	FO	Convencional
0.0	0.01980	0.04441
0.1	0.01684	
0.2	0.01685	
0.3	0.01975	
0.4	0.01882	
0.5	0.01941	
0.6	0.01965	
0.7	0.01903	
0.8	0.01996	
0.9	0.02100	

En estas pruebas realizadas se muestra que la mejor solución se obtiene para una P_c igual a 0.5, y P_m igual a 0.1. La constante de sintonización se mantuvo en 2.0.

4.4.3 Red de Prueba de 28 Nodos

4.4.3.1 Variando la Constante de Sintonización

En la tabla 4.83 se comparan resultados con la red de 28 nodos utilizando distintas constantes de sintonización, con un P_c de 60% y P_m de 10% para todas las simulaciones.

Tabla 4.83. Tabla comparativa variando la constante de sintonización.

A	FO	<i>Convencional</i>
0.4	0.04095	0.04772
1.0	0.04043	
2.0	0.04049	
3.0	0.04282	
5.0	0.04182	

Para esta red de prueba no hay mucha variación en los resultados debido a que se trata de una red de configuración predominantemente radial. Sin embargo se consigue mejorar la solución con una constante de sintonización de 1.0. Se puede mejorar un poco más la solución si se modifican los operadores genéticos para formar un *AG* híbrido más preciso.

Manipulando la *Función de Habilidad* se puede variar la *FO*. Se puede modificar la función objetivo sin necesidad de variar los parámetros del *AG*. Cabe mencionar que el *AG* simple empleado contiene únicamente los operadores genéticos básicos. De acuerdo a las referencias, se tienen *AG*'s híbridos mas sofisticados que el empleado, que realizan una búsqueda más profunda que la propuesta aquí, y que garantizan encontrar una solución óptima global [1, 2, 32, 34].

CAPITULO 5

Conclusiones, Recomendaciones y Aportaciones

5.1 Conclusiones

Los resultados obtenidos demuestran que el *Algoritmo Genético* ayuda a obtener una secuencia de restauración óptima en un tiempo de cómputo muy corto en comparación a la forma heurística. En cada una de las pruebas en la sección 4.3, el tiempo para obtener la solución se abate de 5 a 10 veces en comparación a la forma heurística que se describió en la sección 4.2, con el procesador digital mencionado en la sección 4.3, esto dependiendo de la cantidad de elementos a restaurar, y del conocimiento previo del sistema de prueba.

La implementación y programación del *AG* fué relativamente sencilla, a pesar de que se trató con un problema de optimización del tipo no lineal, entero, combinatorial, multietapa, y con restricciones. Es no lineal pues *Flujos de Potencia* determina el modelo en estado estacionario de los sistemas de prueba. Entero porque implica una integración no fraccionada de elementos del sistema, esto es que, al hablar de la reintegración de líneas desenergizadas al subsistema, se habla del manejo de números enteros dentro de una selección para determinar la mejor secuencia. Combinatorial porque se combina un número de posibilidades que pueden ó no ser parte de una solución. Multietapa porque la reintegración de una línea implica una etapa distinta e independiente de otra, y en cada etapa se realiza una nueva búsqueda de la mejor solución con una nueva topología de red. Y un problema con restricciones pues de acuerdo al modelo matemático, se tienen varias restricciones que se deben cumplir.

El problema principal a resolver en la restauración es encontrar una secuencia de restauración óptima en el menor tiempo posible. Por otra parte, en el estado del arte se tiene que aún se requieren de herramientas interactivas que, consigan abatir el tiempo en los cálculos realizados por los operadores de los *SEP's*, y ayuden a automatizar el proceso

restaurativo. En esta Tesis se resuelve solo una parte del problema de la restauración, el *Algoritmo Genético* mostró ser una herramienta poderosa para el objetivo por el que fue implementado.

Su robustez permite combinarse con otras *Herramientas Analíticas* como las que se describieron en la sección 2.6, incluyendo las de este trabajo como lo fué *Flujos de Potencia* y flujos óptimos lineales, herramientas que en un escenario común de restauración, interactúan con el ingeniero encargado del sistema. Su naturaleza estocástica permite localizar la solución óptima en un amplio y complejo espacio de búsqueda.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar un análisis previo de la red de prueba, ó mejor aún, un análisis sobre la base de algún plan de restauración convencional previo, con el fin de reducir el margen en el límite en las variables de control, y de esta forma, asegurar una solución óptima con menos iteraciones, con menor tamaño en la población inicial, y por consecuencia, en menor tiempo de cómputo. Así mismo, un conocimiento previo permite determinar correctamente los parámetros requeridos por la *Función de Habilidad*.

Se recomienda también realizar varias simulaciones con la red de prueba antes de iniciar la secuencia, para determinar los parámetros de los operadores genéticos con los cuales el *AG* se desempeñe mejor. Para cada sistema distinto, es posible que tengan que modificarse algunos parámetros.

Si se tiene la necesidad de iniciar con una población aleatoria donde no se tiene conocimiento preciso de la red, ó bien, si se tiene un sistema a gran escala que emplea una gran cantidad de variables de control, sería recomendable, aunque no indispensable, sofisticar los operadores genéticos mediante técnicas de *AG's* híbridos para realizar una búsqueda mas profunda y obtener mayor precisión y exactitud en la solución.

Existen algunas técnicas de *AG's* híbridos en los que se puede modificar el mecanismo de reproducción dentro del operador de selección, ó bien, *AG's* que usan estrategias simples para adaptar automáticamente el P_m [34].

5.3 Aportaciones

Como aportación principal se considera cumplir con el objetivo previamente establecido en la sección 1.1 de esta Tesis. Se realizó una correcta integración de la técnica propuesta al problema en estudio, y se ha tratado de explicar lo mas claro posible los pasos para conseguir dicha integración.

Por otra parte, se marca una apertura en el estudio de la restauración de sistemas eléctricos de potencia, en este caso en estado estacionario, por medio de una técnica novedosa y robusta utilizada como alternativa para resolver una etapa del problema de restauración. El algoritmo propuesto demostró adaptarse a la solución del problema en cuestión. Además, se representa como iniciativa para el estudio de esta y otras técnicas de optimización inteligente, y como herramienta de validación y comparación.

Como técnica de optimización, no requiere modificar la estructura interna del algoritmo en caso de cambiar ó modificar la *Función Objetivo*. Esto es gracias a las ventajas que presenta sobre otros métodos convencionales, y que se mencionan en la sección A.2.

5.4 Trabajos Futuros

Profundizar, en el estudio de técnicas inteligentes de optimización que puedan ser aplicadas en trabajos futuros que vayan en diferentes direcciones y que realicen aportaciones en otras áreas de la ingeniería. En investigaciones que puedan abarcar otras técnicas inteligentes de optimización como *Templado Simulado*, *Búsqueda por Tabú*, y combinaciones de *AG's* con *Lógica Difusa* [44, 47].

Utilizar variantes de los *AG's*, como *Algoritmos Evolutivos ó Evolucionarios* que presentan modificaciones dentro de los operadores genéticos. Se pueden operar algoritmos genéticos en paralelo ó utilizar niveles de jerarquía, entre otras variantes, pero todas relacionadas con la evolución natural [2, 3, 18, 34].

Inteligencia artificial y las técnicas inteligentes de optimización mencionadas antes para el estudio de la restauración a pequeños y grandes disturbios, y su interacción con sistemas expertos.

Referencias

- [1] M.M. Adibi, “*Power System Restoration, Methodologies and Implementation Strategies*”. IEEE Press series on power engineering. P.M. Anderson, Series Editor. Piscataway N.J. U.S.A. 2000.
- [2] David E. Goldberg, “*Genetic Algorithm in Search Optimization, and Machine Learning*”. Addison – Wesley publishing company, inc. New-York. U.S.A. January 1989.
- [3] José Alberto Gómez Hernández, “*Optimización de la Confiabilidad en Sistemas Eléctricos de Potencia Compuestos Utilizando Algoritmos Evolucionarios*”. Tesis doctoral. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. ESIME - IPN. Noviembre 2001.
- [4] José Alberto Gómez Hernández. “*Optimización de la Confiabilidad en la Transmisión de Sistemas Eléctricos de Potencia utilizando Algoritmos Genéticos*”. Tesis de maestría. Sección de estudios de Posgrado e Investigación. ESIME - IPN. Julio 1997.
- [5] M. M. Adibi, y L. H. Fink. “*Power System Restoration Planning*”, IEEE Transactions on power systems, Vol. 9, No. 1, pp. 22 – 28, Febrero 1994.
- [6] J. A. Huang, L. Audette, y S. Harrison. “*A Systematic Method for Power System Restoration Planning*”. IEEE Transactions on power systems, vol. 10, No. 2, pp. 869 – 875, Mayo 1995.
- [7] P. Kundur. “*Power System Stability and Control*”. pp. 3 – 39. McGraw – Hill. 1993.
- [8] R. Nadira, T. E. Dy Laico, y K. A. Loparo. “*A Hierarchical Interactive Approach to Electric Power System Restoration*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 7, No. 3, pp. 1123 – 1131, Agosto 1992.
- [9] M. M. Adibi, et al. “*New Approaches in Power System Restoration*”. IEEE Transactions on power systems, vol. 7, No. 4, pp. 1428 – 1434, Febrero 1992.
- [10] Félix F. Wu, y A. Monticelli. “*Analytical Tools for Power System Restoration – Conceptual design*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 3, No. 1, pp 10 – 16, February 1988.
- [11] T. Nagata, H. Sasaki, y R. Yokoyama. “*Power System Restoration by Joint Usage of Expert System and Mathematical Programming Approach*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 10, No. 3, Agosto 1995.

- [12] M. M. Adibi, R. J. Kafka, D. P. Milanics. “*Expert System Requirements for Power System Restoration*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1592 – 1600, Agosto 1994.
- [13] M. M. Adibi, y R. J. Kafka, “*Power System Restoration Issues*”. IEEE Computer Applications in Power, Vol. 4, No. 2, pp. 19 – 24, April 1991.
- [14] M. M. Adibi, et al. “*Power system restoration – a task force report*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 2, No. 2, pp 271 – 277, May 1987.
- [15] M. M. Adibi, et al. “*Special considerations in power system restoration*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 7, No. 4, pp 1419 – 1427, November 1992.
- [16] M. M. Adibi, R. W. Alexander, y B. Avramovic. “*Overvoltage Control During Restoration*”, IEEE Transactions on power systems, Vol. 7, No. 4, pp. 1464 – 1470, Noviembre 1992.
- [17] R. J. Kafka, et al. “*Role of Interactive and control computers in the development of a system restoration plan*”. IEEE Transactions on power apparatus and systems. Vol. 101, No. 1, pp. 43 – 52, Enero 1982.
- [18] Manlio Al Altamirano González. “*Control Difuso de velocidad tipo Mamdani de un motor de corriente directa autosintonizable por Algoritmos Genéticos*”. Tesis de maestría. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. ESIME - IPN Agosto 2002.
- [19] Hugo Ruiz Rosas. “*Control Difuso autosintonizable de Voltaje por medio de la Búsqueda por Tabú para un Generador Síncrono* ” (Sección 2.4). Tesis de maestría. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. ESIME - IPN. Abril del 2002.
- [20] Stephen Mungai Kariuki,. “*Evaluación de Sistemas de Transmisión Flexible de Corriente Alterna Tipo Serie en el Despacho Económico Restringido utilizando Algoritmos Genéticos*”. Tesis de maestría. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. ESIME – IPN. Diciembre del 2002.
- [21] Armando Morales Castorena. “*Sensibilidad Paramétrica de Modelos Dos Ejes para Turbogeneradores*”. Tesis de maestría. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. ESIME - IPN Junio del 2003.
- [22] L. H. Fink y K. Carlsen. “*Operating under stress and strain*”. IEEE Spectrum, pp. 48 – 53, Marzo 1978.
- [23] M. M. Adibi, J. N. Borkoski, y R. J. Kafka. “*Power System Restoration – The Second Task Force Report*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 2, No. 4, pp 927 – 933, Noviembre 1987.

- [24] Lester H. Fink, Kan-Lee Liou, y Chen-Ching Liu. “*From Generic Restoration Actions to Specific Restoration Strategies*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 10, No. 2, pp. 745 – 751, Mayo 1995.
- [25] Jerry J. Ancona, “*A Framework for power system restoration following a major power failure*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 10, No. 3, pp 1480 – 1485, August 1995.
- [26] M. M. Adibi, et al. “*Special consideration in power system restoration - The second working group report*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 9, No. 1, pp 15–21, February 1994.
- [27] M. M. Adibi, J. N. Borkoski, y R. J. Kafka. “*Analytical Tool Requirements for Power System Restoration*”, IEEE Transactions on power systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1582 – 1591, Agosto 1994.
- [28] T. Nakata, y H. Sasaki, “*A Multi-Agent Approach to Power System Restoration*”. IEEE Transactions on power systems. Vol. 17, No. 2, Mayo 2002.
- [29] T. Kasuya, H. Oda, H. Inoue, y S. Iizuka, “*Development of automatic restorative operation aplicable to power system local area dispatching*”, Trans. IEE Japan, Vol. 109-B, No. 4, pp. 177-184, 1989.
- [30] Y. Arita, et al., “*Development of an operation supporting expert system for power system networks in an integrated control center*”, Trans. IEE Japan, Vol. 110-B, No. 6, pp. 504-510, 1990.
- [31] K. Komai, y T. Sakaguchi, “*Análisis and evaluation of human knowledge for power system restoration by mathematical programming method*”, Trans., IEE Japan, Vol. 107-B, no. 6, pp. 269-275, 1987.
- [32] J. A. Huang, F. D. Galiana, y G. T. Vuong. “*Power System Restoration Incorporating Interactive Graphics and Optimization*”. IEEE Power Industry Computer Application Conference, pp. 216 – 222, mayo 1991.
- [33] A. G. Bakirtzis, P. N. Biskas, C. E. Zoumas, y V. Petridis, “*Optimal Power Flow by Enhanced Genetic Algorithm*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 17, No. 2, Mayo 2002.
- [34] D. T. Pham, y D. Karaboga, “*Intelligent optimisation techniques*”. pp. 1–7, 51. Spinger, 2000.
- [35] Florencio Aboytes Garcia. “*Análisis de sensibilidad*”. Curso análisis avanzado de Sistemas Eléctricos de Potencia, CFE-CENACE, México D.F. Diciembre 1982.

- [36] Hugo Ambriz Pérez, “*Cálculo de acciones correctivas en sistemas eléctricos de potencia operando en estado de emergencia*”. Tesis de maestría. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. ESIME - IPN. Marzo 1992.
- [37] David Romero Romero, “*Estudio de flujos de potencia por el método desacoplado rápido*”. Tesis de maestría. Sección de Estudios de Posgrado e Investigación. E.S.I.M.E. I.P.N. Abril 1977.
- [38] J. Peschon, et al. “*Sensitivity in Power Systems*”, IEEE Trans. Power App. Syst, Vol. PAS-87, No. 8, pp. 1687-1696 Agosto 1968.
- [39] R.L. Sullivan, “*Power System Planning*”. pp 190–198. McGraw Hill. U.S.A. 1977.
- [40] William Stevenson. “*Elements of Power System Analysis*”. McGraw Hill, 1975.
- [41] G. Stagg, El - Abiad, “*Computer Methods in power System Analysis*”. McGraw Hill, 1968.
- [42] Bruce F. Wollenberg, y Allen J. Wood. “*Power generation, operation, and control*”. p. 421. John Wiley and Sons. U.S.A. 1996.
- [43] A. Bergen, “*Power System Analysis*”, Prentice Hall. 1986.
- [44] Ying-Tung Hsiao, y Ching-Yang Chien, “*Enhancement of restoration service in distribution systems using a combination fuzzy-GA method*”. IEEE Transactions on power systems, Vol. 15, No. 4, Noviembre 2000.
- [45] L. L. Freris, y A. M. Sasson, “*Investigation on the Load Flow Problems*”, IEE Proc., Vol. 114, pp. 1459 – 1470, Diciembre 1967.
- [46] Comisión Federal de Electricidad, Subdirección de Programación, Gerencia de Programación de Sistemas Eléctricos, *Programa de obras e inversiones del sector eléctrico 1999-2008*, Diagramas unifilares, área norte. 11ª Edición, 1999
- [47] Y. Fukuyama, et al. “*Comparative Study of Modern Heuristic Algorithms to Service Restoration in Distribution Systems*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, pp. 173 – 181, Enero 2002.

APÉNDICE A

Algoritmos Genéticos

A.1 Introducción

Los algoritmos genéticos (*AG*) son algoritmos de búsqueda basados en los mecanismos de selección natural y genética natural. Combinan la supervivencia entre estructuras de cadenas con un cambio de información todavía aleatorio, para formar un algoritmo de búsqueda con lo novedoso del instinto de búsqueda humano.

Los algoritmos genéticos han sido desarrollados por John Holland, sus colegas, y sus estudiantes de la Universidad de Michigan en la década de los 70's. En la década de los 80's se hacen más populares. Las metas de su investigación son: (1) resumir y rigurosamente explicar el proceso adaptable de los sistemas naturales, y (2) diseñar programas de sistemas artificiales que contienen los mecanismos de sistemas naturales. Ésta ha guiado a importantes descubrimientos.

Su funcionamiento fundamental es tomado del mundo físico; crean una población inicial de soluciones mediante un proceso aleatorio representadas por cadenas de bits que se desenvuelven a través de generaciones; en cada generación, un nuevo conjunto de criaturas artificiales (cadenas) es creado utilizando la selección de piezas de las generaciones anteriores; Las nuevas y mejores soluciones se aparean con otras soluciones por cruzamiento de partes de una cadena solución con otra; la mutación es una alteración aleatoria ocasional del valor de la posición. La reproducción y el cruce son necesarios, pero ocasionalmente pierden material genético, y por eso es necesaria la mutación. La operación de mutación previene pérdidas irreparables o casos como el incesto. El mecanismo de recombinación permite mezclar información paternal pasada a sus descendientes y la mutación presenta innovación a la población.

A través del tiempo, las operaciones básicas de selección, cruzamiento y mutación limpian desechando las soluciones menos idóneas y se van reproduciendo las mejores soluciones. Los *AG's* no trabajan aleatoriamente. Eficientemente usan información histórica para especular nuevos puntos de búsqueda con un esperado mejor desempeño.

El tema central de la investigación en los *AG's* ha sido su robustez. Las implicaciones de robustez para sistemas artificiales son diversas. Si los sistemas artificiales pueden ser más robustos, se pueden reducir o eliminar costosos rediseños. Si se realizan niveles más altos de adaptación, los sistemas existentes pueden realizar sus funciones más extensivas y mejores. Las características de autorreparación, autoguía, y reproducción, son regla en sistemas biológicos, mientras que existen escasamente en los más sofisticados sistemas artificiales.

Los *AG's* prueban teórica y empíricamente que proporcionan robustez en la búsqueda de espacios complejos (*Adaptation in natural and artificial systems de Holland, 1975*). Son computacionalmente simples y poderosos en su búsqueda de mejora. Además no se limitan a suposiciones de restricción acerca del espacio de búsqueda (suposiciones acerca de continuidad, existencia de derivadas y otras materias).

A.2 Ventaja de los Algoritmos Genéticos sobre los Métodos Convencionales

La principal ventaja de los algoritmos genéticos sobre los métodos convencionales es la robustez, aunque tienen otras ventajas. Las cuatro ventajas más importantes que los algoritmos genéticos tienen como método de optimización y procedimiento de búsqueda son:

1. Los algoritmos genéticos trabajan con una codificación de los conjuntos de los parámetros, y no con los parámetros mismos.
2. Los algoritmos genéticos buscan una población de puntos, no un simple punto.
3. Los algoritmos genéticos buscan información objetiva, no aquella que proviene de información auxiliar.

4. Los algoritmos genéticos 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 algoritmos genéticos no necesitan información auxiliar: Para desarrollar una búsqueda efectiva, requieren solamente valores de la función de habilidad asociados con cadenas individuales. Estas características hacen que los algoritmos genéticos establezcan un método de búsqueda de muchos esquemas. Los algoritmos genéticos no necesitan conocimiento del problema a optimizar. Tampoco están relacionados directamente con los parámetros del problema.

El primer problema en la aplicación de los algoritmos genéticos es codificar el problema bajo estudio. Como estos no trabajan con una solución sino con una población de posibles soluciones, surge el segundo problema. El tercer problema es elegir los operadores genéticos adecuados. El cuarto problema es crear una interfase adecuada con el problema a optimizar.

El uso directo de un código, la búsqueda heurística de una población de soluciones, y el uso de operadores aleatorios, contribuyen a que los algoritmos genéticos sean robustos y resulten ventajosos sobre otras técnicas usadas comúnmente. En la siguiente sección se explica un algoritmo genético simple que se compone de tres operadores básicos.

A.3 Algoritmo Genético Simple

Existen cinco factores que influyen en el desempeño de un algoritmo genético: el método de representar las soluciones (cómo son codificados los cromosomas), población inicial de soluciones (el grupo de cromosomas creado al inicio del proceso de evaluación), evaluación de la función (el valor de la función de habilidad de cada cromosoma), operadores genéticos (selección, cruce y mutación), y los parámetros de control. (tamaño de la población, los porcentajes de cruce y de mutación)

A continuación se describe un algoritmo genético simple: (figura A.1)

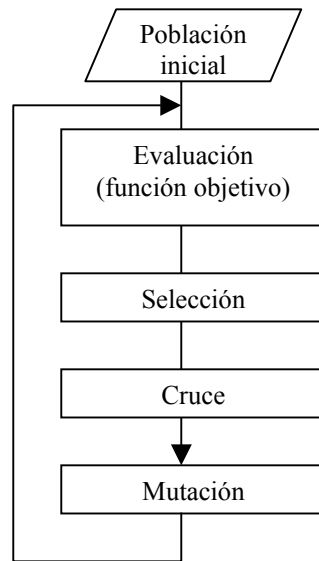


Figura A.1.- Diagrama de flujo del algoritmo genético simple.

Los parámetros a ser optimizados se representan en forma de una cadena de bits. Con éste esquema de representación se tiene un mejor desempeño en exactitud y tiempo de cómputo. Existen dos métodos comunes de representación: el método de representación de una cadena binaria, y el método que utiliza un vector de números enteros o reales. Cuando se utiliza el método binario, el más común, se presenta el problema de decidir el número de bits que se utilizarán para representar los parámetros, éste esquema es caracterizado por dos parámetros: longitud y el orden; la longitud es la longitud desde el primer bit hasta el último, y orden es el número de bits con un valor específico y que se mantiene constante.

De acuerdo a este esquema, la distribución de una generación a otra depende del orden, longitud y del valor de adaptabilidad de los cromosomas.

Para comenzar el proceso de optimización con los algoritmos genéticos, se requiere de un grupo de soluciones iniciales. Existen dos formas de crear una población inicial: la primera consiste en una producción aleatoria de soluciones dentro de un rango predefinido. Este método se utiliza cuando no se tiene un conocimiento previo del problema; la segunda manera de crearla emplea un conocimiento previo del problema. En este caso se comienza

con una aproximación de la solución. Por esto converge a la solución óptima en menos tiempo que en la forma anterior.

Una investigación teórica del tamaño óptimo de la población inicial para los algoritmos genéticos empleando el método de codificación binaria de los cromosomas fue llevada a cabo por Goldberg quien encontró la siguiente relación (A.1) entre el tamaño de la población y la longitud del cromosoma.

$$\text{Tamaño de la población} = 1.65 \times 2^{0.2 \cdot \text{long}} \quad (A.1)$$

Donde:

long = longitud del cromosoma

La evaluación de la función habilidad actúa como una interfase entre los algoritmos genéticos y el problema a optimizar. Los algoritmos genéticos evalúan la solución de cada cromosoma de acuerdo a información producida por la función, y no utilizan información directa de la estructura del problema a optimizar.

La selección es un proceso donde se hacen copias de las cadenas individuales acorde a los valores de la función de habilidad. Las cadenas con valores altos tienen una alta probabilidad 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.

Se realiza una selección proporcional llamada selección de la “rueda de la ruleta” (figura A.2). El valor de amplitud de cada individuo en la ruleta depende del valor obtenido de evaluar la función de habilidad y del porcentaje de total de la suma de todos los valores obtenidos de evaluar todos y cada uno de los individuos en la función objetivo.

Los individuos que tienen un área mayor en la rueda de la ruleta tienen una mayor oportunidad de seleccionarse para presentarse en la siguiente generación.

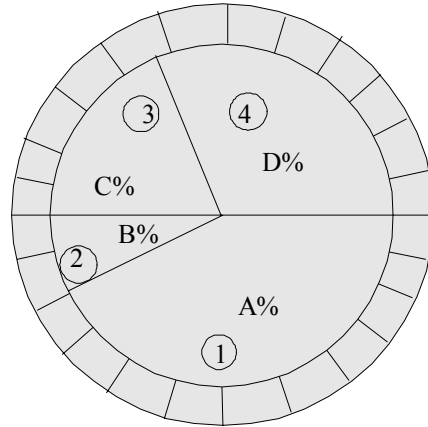


Figura A.2.- Asignación de selección mediante una rueda de ruleta con tamaños de aberturas de acuerdo al valor de la función objetivo de cada cadena.

El cruce es la operación que hace que los algoritmos genéticos sean diferentes de otros algoritmos. Es utilizado para crear nuevos individuos a partir de dos individuos ya existentes. Existen varias maneras de realizarlo: cruce a un punto, cruce a dos puntos (figura A.3), cruce cíclico y el cruce uniforme. Se lleva a cabo mediante dos pasos. Primeramente, las cadenas son seleccionadas 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 [2, 34].

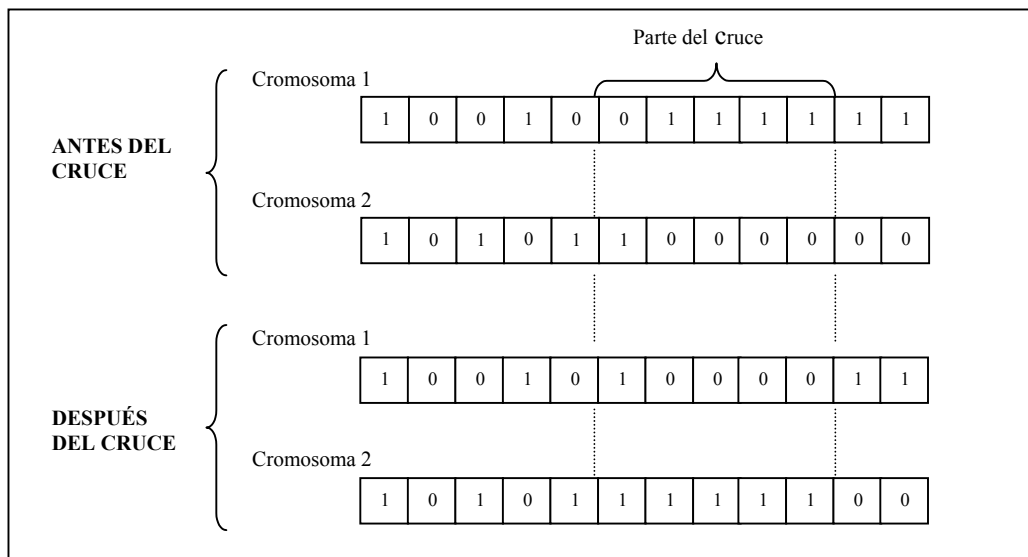


Figura A.3.- Esquema para mostrar el cruzamiento a dos puntos entre dos cadenas, mostrando el sitio de cruce escogido aleatoriamente.

La mutación (figura A.4), juega un papel secundario en la operación de los algoritmos genéticos. 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.

A todos los individuos de la población se les cambian algunos bits aleatoriamente de acuerdo al porcentaje de mutación. La mutación permite realizar búsquedas en nuevas áreas y permite encontrar un óptimo global.

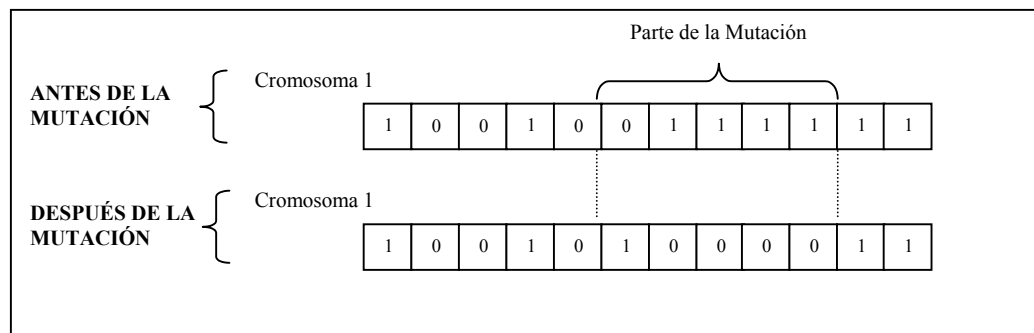


Figura A.4.- Esquema para mostrar la mutación, mostrando el sitio de mutación escogido aleatoriamente.

La mutación depende en gran manera de su parámetro de control, ó sea, el porcentaje de mutación. La mutación se utiliza para crear diversidad en las posibles soluciones, y requiere un correcto porcentaje de mutación. Si este es grande, convierte al algoritmo en un proceso de búsqueda aleatoria y si es pequeño puede caer en un óptimo local.

Como un ejemplo simple, se considera el problema de optimización mostrado en la figura A.5. Se desea encontrar el punto máximo de la función $f(x)=x^2$ en el intervalo $[0, 31]$. Con algoritmos genéticos se siguen los siguientes pasos como se muestra en la figura A.1. El primer paso del proceso de optimización es codificar el parámetro x como una cadena de longitud finita.

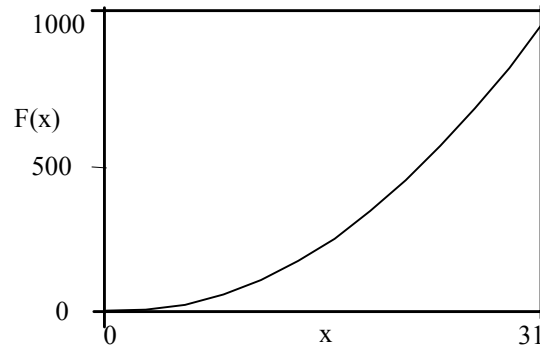


Figura A.5.- Ejemplo de optimización de la función $f(x)=x^2$ en el intervalo entero $[0,31]$

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 $n = 4$.

1 1 0 0 1
 0 0 1 1 0
 1 0 0 1 0
 1 1 0 0 0

Una vez creada la población inicial, se procede a evaluar la idoneidad de cada cadena. Esto se hace, por ejemplo, aplicando la base 10 de números.

Por ejemplo para la cadena 1 0 0 1 0 es:

$$1 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 16 + 0 + 0 + 2 + 0 = 18$$

Para una cadena de cinco bits (código binario) se pueden obtener números entre 0 (00000) y 31 (11111). Aplicando las operaciones básicas de algoritmos genéticos (reproducción, cruzamiento y mutación), la idoneidad de la cadena 00110 decodificada en manera binaria es $2^2 \cdot 2^1 = 6$. De aquí que para la cadena 0 0 1 1 0 $x = 6$. Para calcular su idoneidad simplemente es el cuadrado del valor de x obteniendo una idoneidad de $f(x)=36$. Otros x & $f(x)$ se pueden obtener de manera similar. Algunas cadenas en valores binarios, así

como su valor en decimal y su valor al evaluar la función de habilidad, se muestran en la tabla A.1 para utilizarlos en este ejemplo.

Tabla A.1.- Cadenas para el ejemplo y sus valores de idoneidad.

No.	Cadena	Idoneidad	% del total
1	1 1 0 0 1	625	40.0
2	0 0 1 1 0	36	2.3
3	1 0 0 1 0	324	20.8
4	1 1 0 0 0	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 A.6)

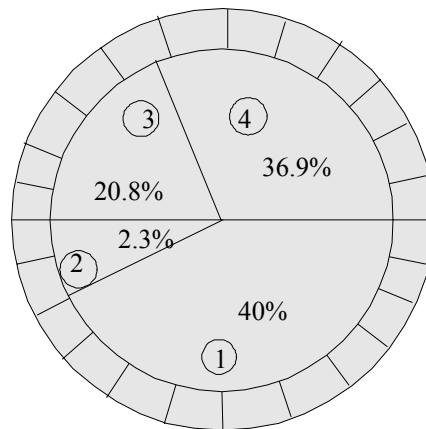


Figura A.6.- Asignación de reproducción mediante una rueda de ruleta con tamaños de aberturas de acuerdo a la idoneidad de cada cadena. Datos tomados de las tablas A.1 y A.2.

Usando esta rueda de la 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. Todo esto se muestra al centro de la tabla A.2.

Tabla A.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 $\frac{f_i}{\bar{f}}$	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><u>625</u></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><u>676</u></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 dado a la rueda de ruleta (aleatoriamente).
- 3) El cruzamiento es a través de una decodificación binaria de 2 lanzes de moneda (SS = 00₂ = 0 = sitio de cruce 1, AA = 11₂ = 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 = $5 \cdot 4 \cdot 0.001 = 0.02$.
En este caso ninguna mutación se espera en cada generación.

Ahora para el cruzamiento (apareo de cadenas) se tienen dos pasos: (1) las cadenas son apareadas aleatoriamente, escogiendo un par con más idoneidad. Y (2) las cadenas son apareadas cruzándose entre ellas, escogiendo aleatoriamente el sitio de cruzamiento. Refiriéndose nuevamente a la tabla A.2, en la selección aleatoria de cadenas, resulta que la primera es escogida para aparearse con la segunda. Con un cruzamiento en 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 $P_m = 0.001$. Con 20 transferencias de posiciones de bit se espera $20 \cdot 0.001 = 0.02$ 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 idoneidad es incrementado de 625 a 676 de la generación 0 a la 1 (tablas A.1 y A.2). Donde se puede decir que el algoritmo genético presenta una convergencia al óptimo que es 961. La tabla A.3 muestra las cadenas solución hasta la población no. 3.

Tabla A.3.- Cadenas solución hasta la generación no. 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. 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: $5 \cdot 4 \cdot 0.1 = 2$. En la tabla A.4 se muestran las mejores cadenas solución para cada población empleando una $P_m = 0.1$.

Tabla A.4.- Mejores cadenas solución 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 A.4, 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. 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 algoritmos genéticos buscan espacios de solución mediante recombinaciones y manteniendo sus *esquemas* de población. Cada miembro de la población hace un muestreo de todos los posibles *esquemas* mediante sus bits correspondientes. Por ejemplo, la cadena de bits 10010 muestrea la región de espacio 1#### (# representa 0 ó 1). Así como también muestrea la región de espacio #0###, etc. De ésta manera, los esquemas en el espacio se muestrean implícitamente. Esta habilidad inherente de exploración de muestreo de los algoritmos genéticos 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.

La programación evolutiva, especialmente los algoritmos genéticos, fue creada con un extenso rango de posibles aplicaciones en mente. Este tipo de programación confirma una amplia aplicabilidad con una variedad de usos importantes en campos como lo son redes neuronales, aprendizaje de máquinas, control, programación automática, y planeación. El algoritmo genético es una técnica de optimización extremadamente poderosa, pero su eficiencia depende de realizar un gran número de operaciones en un tiempo razonable si no se pretende modificar ningún operador.

APENDICE B

Despacho de Potencia Activa

B.1 Introducción

Las formulaciones de problemas de optimización en la operación de sistemas de potencia pueden ser presentadas como problemas de programación lineal [35, 36]. Las formulaciones, en general, tienen una función objetivo que asocia costos de generación, y que será obligada a tomar su valor mínimo en el proceso de optimización. Cuando la red eléctrica está en un punto de operación seguro, se puede operar flexiblemente con márgenes adecuados. Por lo tanto los aspectos económicos pueden ser el principal objetivo de la programación de potencia generada. Pero en condiciones de inseguridad del *SEP*, otros criterios pueden ser más apropiados, tal como maximizar la potencia requerida por los consumidores. Esta condición es incluida en la formulación del problema con la ecuación de balance de potencia. La ecuación relaciona las variables de control de este problema con la generación de potencia activa en el nodo compensador, es decir, se relaciona la forma de transferir potencia de los nodos con variación de inyección al nodo compensador. El balance se mantiene al ir buscando la condición de operación del sistema de potencia [3, 4, 36].

El modelo de potencia activa del método desacoplado rápido se puede utilizar para calcular la matriz de sensibilidad empleada en las formulaciones de los problemas de optimización. Por lo que las consideraciones prácticas utilizadas para derivar este método de flujos son aplicadas a la formulación de la optimización linealizada. Una matriz de sensibilidad debe ser recalculada si la topología del *SEP* cambia, haciéndose antes unas modificaciones de las matrices B_1 y B_2 del método desacoplado rápido para calcular la matriz de sensibilidad perteneciente a la nueva condición del sistema [36, 37].

En los problemas de optimización se pueden definir dos tipos de variables: variables independientes ó de control, y variables dependientes. Las variables independientes ó de control son aquellas que pueden ajustarse al valor deseado por operadores del equipo eléctrico, como por ejemplo la magnitud de los voltajes y la potencia activa generada en las

distintas centrales eléctricas. Las variables dependientes son función de las variables independientes, tales como los voltajes en los nodos de carga ó las potencias reactivas generadas [3, 4, 36].

B.2 Formulación del Problema en Potencia Activa

Se definen como variables de control las potencias activas de las unidades generadoras del sistema así como el monto de carga que puede ser tirada en cada uno de los nodos. Las potencias de las unidades representan “generación verdadera” en un nodo, mientras que la carga que puede ser tirada representa “generación ficticia” que es necesario añadir en un nodo determinado, ó lo que es equivalente a tirar carga. En el nodo donde existe generación y carga se consideran conectados ambos “tipos” de generadores, por lo tanto las variables de control de este problema serán iguales al número de generadores mas el número de nodos de carga [3, 4].

El objetivo de la formulación es aliviar la sobrecarga de uno(s) elemento(s) del sistema, intentando redespachar las unidades en primera instancia. Si no se consigue, entonces se tira carga en nodos específicos de la red. Por lo tanto los factores de peso asociados a las unidades generadoras, deberán ser considerablemente menores que las variables de control que representan el tiro de carga.

A continuación se realiza una formulación del problema en potencia activa. Este problema de optimización lineal con restricciones se resuelve con un método de programación lineal basado en el método *Simplex*.

Sea el objetivo, minimizar la función:

$$f(x) = \sum_{k=1}^{n_g} c_k P_k + \sum_{i=1}^{n_l} c_i X_i \quad (B.1)$$

sujeta a:

$$\begin{aligned} P_{\min} &\leq P_k \leq P_{\max} \\ \sum_k \alpha_{ij/k} P_k + P_{ij}^0 &\leq (P_{ij})_{\lim} \\ \sum_{k=1}^{n_g} P_k + \sum_{i=1}^{n_l} X_i - (P_D + P_L) &= 0 \end{aligned} \quad (B.2)$$

Donde:

- P_k = Inyección de potencia nodal (*incógnita*).
- X_i = Tiro de carga (*incógnita*).
- P_{min}, P_{max} = Límites de potencia en nodos de generación.
- $\alpha_{ij/k}$ = Coeficiente de sensibilidad de la línea ij con respecto al nodo controlado k .
- P_{ij} = Flujo en la línea ij .
- P_{ij}^0 = Flujo en la línea ij antes del disturbio.
- P_D = Potencia demandada.
- P_L = Pérdidas.
- P_{lim} = Flujo máximo que soporta la línea ij .
- n_g = Nodos de generación.
- n_l = Nodos de carga.
- c_k, c_i = Factores de peso asociados a las unidades generadoras en la función objetivo.

La función objetivo trata de minimizar el monto de generación de las “unidades ficticias” ó lo que es lo mismo, minimizar el monto de carga a tirar en cada nodo de carga.

Sujeto a diferentes restricciones de igualdad y desigualdad. La restricción de igualdad es la ecuación de balance de energía en todo el sistema (en forma alterna, puede definirse una ecuación de balance para cada nodo, para un área en particular, etc.) y es la suma de la “generación ficticia” mas la suma de la “generación ficticia” igual a la carga total incluyendo las pérdidas. Las restricciones de desigualdad son restricciones operacionales tales como los límites de cargabilidad en las líneas de transmisión, los límites de generación de las unidades, y el monto máximo de tiro de carga en un nodo. Para construir las restricciones de transmisión, como se describió, se recurre al modelo de potencia real del método desacoplado rápido de flujos de potencia. Este relaciona cambios en las inyecciones de potencia real con ángulos de voltaje nodales. Por lo tanto los elementos de la inversa de este modelo representan las sensibilidades lineales del cambio en los ángulos de voltaje nodales con los cambios en las inyecciones nodales [37, 38].

Para obtener la inversa de la matriz B_l , se implementó una rutina de inversión de matrices basada en el método de *Gauss – Jordan*.

B.3 Coeficientes de Sensitividad del Modelo de Potencia Activa

Como una aplicación de los coeficientes de sensitividad de potencia real se pueden mencionar las siguientes utilidades[35, 39]:

- Reducción de flujos de potencia por determinados enlaces.
- Se pueden forzar flujos por trayectorias definidas.
- Análisis de la redistribución de flujos por contingencias.
- Cambios múltiples de generación.

El cálculo de los coeficientes se realiza basado en las condiciones prácticas, propias de los sistemas eléctricos de potencia. La exactitud de estos coeficientes será mayor en cuanto más cerca se esté a las consideraciones hechas para su formulación.

Los coeficientes de sensitividad calculados del modelo de potencia activa del método desacoplado rápido dependen directamente de las reactancias de la red eléctrica quedando expresados como [35, 37, 38]:

$$\alpha_{ij/k} = \frac{Z_{ik} - Z_{jk}}{x_{ij}} \quad (B.3)$$

Donde:

Z_{ik}, Z_{jk} son elementos de la matriz inversa de B_l .

x_{ij} es la reactancia de la línea (i, j)

De la ecuación de flujo de potencia de una línea de transmisión con resistencia cero se tiene [37, 40, 41, 42, 43]:

$$P_{kj} = \frac{|V_k||V_j|}{x_{kj}} \text{sen}\theta_{kj} \quad (B.4)$$

Donde x_{kj} es la reactancia de la línea. Asumiendo las siguientes simplificaciones prácticas utilizadas en el método desacoplado rápido, $|V_k|=1$, $|V_i|=1$ y $\text{sen}\theta_{kj} = \theta_k - \theta_j$ se obtiene de la expresión [37, 41]:

$$P_{kj} = \frac{\theta_k - \theta_j}{x_{kj}} \quad (B.5)$$

La ecuación anterior puede ser escrita para un sistema multinodal como:

$$P = B_1 \theta \quad (B.6)$$

Ó bien incrementalmente:

$$\Delta P = B_1 \Delta \theta \quad (B.7)$$

En función de la inversa de la matriz esto se puede expresar:

$$\Delta \theta = B_1^{-1} \Delta P \quad (B.8)$$

Si se realiza un cambio de generación (ó carga) en el nodo i , el flujo por la línea $k-j$ cambiará de la siguiente forma:

$$P_{kj} = P_{kj}^o + \frac{\Delta \theta_k - \Delta \theta_j}{x_{kj}} \quad (B.9)$$

De modo que los elementos de B_1^{-1} representan *las sensibilidades lineales de los cambios en los ángulos de voltaje debido a los cambios en las inyecciones nodales*. Los coeficientes de sensibilidad lineales que relacionan cambios en el flujo de potencia activa a través de un elemento de transmisión ante cambios en las inyecciones nodales de potencia real (a_{ij}) pueden ser calculados de la ecuación anterior de la manera siguiente:

$$B_1 a_{ij} = e_{ij} \quad (B.10)$$

Donde:

- e_{ij} es un vector de ceros excepto en las posiciones i y j donde son colocados los valores $(1/x_{ij})$ y $(-1/x_{ij})$, respectivamente.
- a_{ij} es el vector de coeficientes de sensibilidad calculada para el elemento de transmisión (i, j)

Los elementos de a_{ij} , $\alpha_{ij/k}$ son coeficientes de sensibilidad del flujo de potencia real a través del elemento (i, j) debido a cambios en el nodo generador k . Dada la linealidad del problema es posible suponer los efectos a realizar cambios en las inyecciones de potencia activa sobre un elemento (i, j) de donde se puede escribir:

$$P_{ij} = P_{ij}^o + \sum_k \alpha_{ij/k} \Delta p_k \quad (B.11)$$

APÉNDICE C

Método de Newton - Raphson para Flujos de Potencia

C.1 Introducción

Un *SEP* tiene como propósito principal satisfacer continuamente la demanda de potencia eléctrica requerida por los consumidores. Existen varias restricciones que deben cumplirse al proporcionarse el servicio de energía eléctrica. Los niveles de voltaje y frecuencia deben mantenerse dentro de cierta tolerancia; las líneas de transmisión no deben operar cerca de sus límites térmicos y de estabilidad; además, el suministro debe ser confiable y con el menor costo posible [37, 40, 41, 42, 43, 44].

En el análisis del comportamiento del *SEP* bajo las consideraciones anteriores, y dadas las inyecciones de potencia real y reactiva (generaciones y cargas) en los nodos de la red, encontrar las condiciones eléctricas en estado estacionario implica un análisis del comportamiento del *SEP* conocido como *Análisis de FP*. La información que proporciona este análisis permite evaluar el comportamiento del sistema, observando las magnitudes de voltaje y flujos de potencia en las líneas de transmisión [37, 40, 41, 42, 44].

El problema en el análisis de *FP* es determinar la magnitud y el ángulo de fase de los voltajes nodales y el flujo de potencia real y reactiva a través de las líneas de transmisión y transformadores [37, 40, 41, 42, 44].

El programa de *FP* nos proporciona los valores de tensión en los nodos de carga dependiendo de la magnitud del voltaje de generación, creando un conjunto de voltajes nodales.

C.2 Modelo matemático en Forma Polar

El modelo matemático del problema de *FP* es una ecuación compleja:

$$P_i - jQ_i = V_i \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (C.1)$$

Donde:

- n = Número de nodos del sistema
- Y_{ik} = Admitancia serie entre los nodos i y k
- V_i = Voltaje complejo en el nodo i
- V_k = Voltaje complejo en el nodo k

Se deben encontrar las derivadas parciales de dicha ecuación.

Como no es posible derivar una ecuación compleja, es necesario usar la separación de potencia real y reactiva como sigue:

$$P_i = \text{Re}\{P_i - jQ_i\}$$

$$P_i = \sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (C.2)$$

Donde:

- Y = Matriz de admitancia nodal. ($Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \gamma_{ij}$)
- V = Matriz de voltajes nodales. ($V_i = |V_i| \angle \delta_i$)

Además:

$$Q_i = -\text{Im}\{P_i - jQ_i\}$$

$$Q_i = -\sum_{k=1}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \text{sen}(\delta_k - \delta_i + \gamma_{ik}) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (C.3)$$

De aquí, en términos de la parte real e imaginaria de elementos de la matriz de admitancias, se tiene:

$$Y_{ik} \angle \gamma_{ik} = G_{ik} + jB_{ik} \quad (C.4)$$

Dichas ecuaciones quedan determinadas como:

$$\begin{aligned}
 P_i &= \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [G_{ik} \cos(\delta_k - \delta_i) - B_{ik} \text{sen}(\delta_k - \delta_i)] \quad i = 1, 2, \dots, n \\
 Q_i &= -\sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [G_{ik} \text{sen}(\delta_k - \delta_i) + B_{ik} \cos(\delta_k - \delta_i)] \quad i = 1, 2, \dots, n
 \end{aligned} \tag{C.5}$$

El lado derecho de las ecuaciones está en función del voltaje y ángulo de fase, por lo que se tienen $n-1$ variables desconocidas de $|V|$ y $n-1$ variables desconocidas del ángulo δ . Esto es porque se conocen esos valores del nodo compensador. Definiendo valores para los conjuntos de incógnitas se tiene:

$$[\delta] = \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \dots \\ \delta_{n-1} \end{bmatrix} \quad [V] = \begin{bmatrix} |V_1| \\ |V_2| \\ \dots \\ |V_{n-1}| \end{bmatrix} \tag{C.6}$$

O bien, para el método de Newton es:

$$F'(x_o) = -\frac{\Delta F_o}{\Delta x} \tag{C.7}$$

Representando ambos vectores, es un solo vector de incógnitas, se tiene:

$$[x] = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix} \tag{C.8}$$

Donde:

$[x]$ Representa el vector incógnitas.

De este modo, se definen las funciones $P_i(x)$ y $Q_i(x)$ como en la ecuación (C.5):

$$\begin{aligned}
 P_i(x) &= P_i \\
 Q_i(x) &= Q_i
 \end{aligned}$$

Se tiene que P_i^{esp} y Q_i^{esp} son las inyecciones de potencia. Estas son cantidades conocidas y su comparación con $P_i(x)$ y $Q_i(x)$, permitirán las aproximaciones en el proceso

de solución. En el método de Newton-Raphson es necesario tener las ecuaciones de la forma $F(x) = 0$.

Si a las ecuaciones anteriores se les subtrae P_i^{esp} y Q_i^{esp} del lado izquierdo, dichas ecuaciones tendrán la forma conveniente para poder aplicar el método:

$$\begin{aligned} FP_i(x) &= P_i(x) - P_i^{esp} = 0; & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ FQ_i(x) &= Q_i(x) - Q_i^{esp} = 0; & i = 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (C.9)$$

Dentro del proceso iterativo, (C.9) permite evaluar la convergencia del problema. Se puede identificar como la ecuación de error nodal. En forma vectorial se tiene:

$$\Delta F(x) = \begin{bmatrix} \Delta P(x) \\ \Delta Q(x) \end{bmatrix} \quad \Delta P(x) = \begin{bmatrix} P_1^{esp} - P_1(x) \\ \dots \\ P_{n-1}^{esp} - P_{n-1}(x) \end{bmatrix} \quad \Delta Q(x) = \begin{bmatrix} Q_1^{esp} - Q_1(x) \\ \dots \\ Q_{n-1}^{esp} - Q_{n-1}(x) \end{bmatrix}$$

Donde:

$\Delta F(x)$ = Vector de Funciones.

Conforme a la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \Delta F_1 \\ \Delta F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{bmatrix} \quad (C.10)$$

La relación entre el vector de incógnitas (C.8) y el vector de funciones, es la matriz de derivadas parciales ó *Jacobiano*. Esta matriz puede ser particionada de tal manera que cada elemento tenga una representación específica:

$$J = \begin{bmatrix} H & N \\ J & L \end{bmatrix} \quad (C.11)$$

Donde las sub-matrices del *Jacobiano* representan:

$$\begin{aligned} H &= \left[\frac{\partial P_i(x)}{\partial \delta_k} \right] & N &= \left[\frac{\partial P_i(x)}{\partial |V_k|} \right] \Big|_{V_k} \\ J &= \left[\frac{\partial Q_i(x)}{\partial \delta_k} \right] & L &= \left[\frac{\partial Q_i(x)}{\partial |V_k|} \right] \Big|_{V_k} \end{aligned} \quad (C.12)$$

Las expresiones para las ecuaciones de (C.5) cuando $k \neq m$ es:

$$\begin{aligned} L_{km} &= \frac{\partial Q_k}{\partial |V_m|} \Big|_{V_m} = -|V_k| |V_m| [G_{km} \text{sen} \delta_{mk} + B_{km} \text{cos} \delta_{mk}] \\ J_{km} &= \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_m} = -|V_k| |V_m| [G_{km} \text{cos} \delta_{mk} - B_{km} \text{sen} \delta_{mk}] \\ N_{km} &= \frac{\partial P_k}{\partial |V_m|} \Big|_{V_m} = |V_k| |V_m| [G_{km} \text{cos} \delta_{mk} - B_{km} \text{sen} \delta_{mk}] \\ H_{km} &= \frac{\partial P_k}{\partial \delta_m} = -|V_k| |V_m| [G_{km} \text{sen} \delta_{mk} + B_{km} \text{cos} \delta_{mk}] \end{aligned} \quad (C.13)$$

y para los elementos de la diagonal principal ($k = m$) es:

$$\begin{aligned} L_{kk} &= \frac{\partial Q_k}{\partial |V_k|} \Big|_{V_k} = Q_k - B_{kk} |V_k|^2 \\ J_{kk} &= \frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = P_k - G_{kk} |V_k|^2 \\ N_{kk} &= \frac{\partial P_k}{\partial |V_k|} \Big|_{V_k} = P_k + G_{kk} |V_k|^2 \\ H_{kk} &= \frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = -Q_k - B_{kk} |V_k|^2 \end{aligned} \quad (C.14)$$

La ecuación recursiva del método de Newton-Raphson para el problema de *FP*, queda como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P(x) \\ \Delta Q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N \\ L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} \quad (C.15)$$

Donde el superíndice V indica el número de la iteración. La solución iterativa de la ecuación (C.15) lleva a obtener la solución del problema de FP (si el proceso es convergente). El lado izquierdo de la ecuación representa la diferencia entre los valores especificados de P y Q , y los valores calculados en cada iteración. La solución es obtenida cuando el error sea cero ó menor a cierta tolerancia.

Las nuevas aproximaciones en el proceso iterativo se encuentran con:

$$\begin{bmatrix} \delta^{V+1} \\ |V|^{V+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^V \\ |V|^V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta^V \\ \Delta |V|^V \end{bmatrix} \quad (C.16)$$

De las ecuaciones (C.13) y (C.14) se puede deducir una propiedad importante del Jacobiano. Los elementos fuera de la diagonal principal se expresan en función de las admitancias entre nodos. Si no existe conexión entre nodos, los elementos correspondientes serán cero. Esta situación es común en los SEP reales, llegando a tener mas del 90% de sus elementos con valor cero. Las matrices con muchos elementos nulos son llamadas Matrices Dispersas y existen técnicas computacionales que aprovechan con ventaja esta propiedad, facilitando de esta forma la solución por computadora.

Para ver en detalle el análisis de FP con este y otros métodos, así como consideraciones y restricciones, ver las referencias citadas [37, 40, 41, 42, 43, 44].

APÉNDICE D

Datos de las Redes de Prueba

D.1 Introducción

A continuación se proporcionan los datos completos, necesarios para un análisis de *FP* ó para simular un *AEE* para restauración con la herramienta propuesta, de las redes de prueba utilizadas en esta tesis [41, 45, 46].

D.2 Red de prueba de 5 nodos

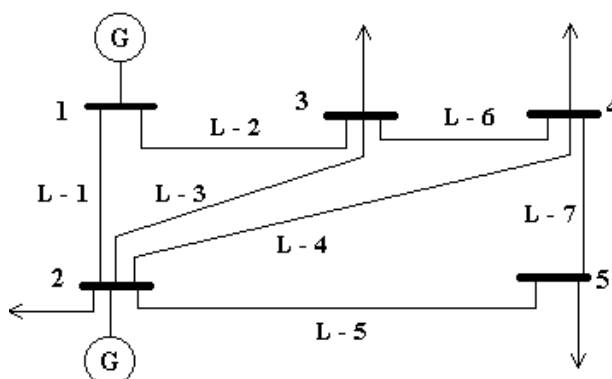


Tabla D.1.- Datos de nodos

No. Nodo	Tipo	PC	QC	Vmax	Vmin
1	1	0	0	1.10	0.90
2	1	20	10	1.05	0.95
3	2	45	15	1.05	0.95
4	2	40	5	1.05	0.95
5	2	60	10	1.05	0.95

Tabla D.2.- Datos de generación

No. Nodo	Pmax	Qmax	Qmin
1	150	150	-150
2	60	40	-40

No. Nodo	Tipo	PC	QC	Vmax	Vmin	Shunt(B)
8	3	0.0	0.0	1.10	0.90	0.19
9	2	29.5	16.6	1.05	0.95	
10	2	9.0	5.8	1.05	0.95	
11	2	3.5	1.8	1.05	0.95	
12	2	6.1	1.6	1.05	0.95	
13	2	13.5	5.8	1.05	0.95	
14	2	14.9	5.6	1.05	0.95	

Tabla D.5.- Datos de generación

No. Nodo	Pmax	Qmax	Qmin
1	250	250	-250
2	200	200	-200
3	0	60	-60
6	0	50	-50
8	0	60	-60

Tabla D.6.- Datos de líneas de transmisión

No. Lin	NS	NE	R	X	YD/2	Lim	TAPS
L - 1	1	2	0.01938	0.05917	0.0528	200	0.932 0.969 0.978
L - 2	1	5	0.05403	0.22304	0.0492	100	
L - 3	2	3	0.04699	0.19797	0.0438	100	
L - 4	2	4	0.05811	0.17632	0.0000	100	
L - 5	2	5	0.05695	0.17388	0.0340	100	
L - 6	3	4	0.06701	0.17103	0.0346	100	
L - 7	4	5	0.01335	0.04211	0.0128	100	
L - 8	4	7	0.00000	0.20450	0.0000	100	
L - 9	4	9	0.00000	0.53890	0.0000	100	
L - 10	5	6	0.00000	0.23490	0.0000	100	
L - 11	6	11	0.09498	0.19890	0.0000	100	
L - 12	6	12	0.12291	0.25581	0.0000	100	
L - 13	6	13	0.06615	0.13027	0.0000	100	
L - 14	7	8	0.00000	0.17615	0.0000	100	
L - 15	7	9	0.0000	0.11001	0.0000	100	
L - 16	9	10	0.03181	0.08450	0.0000	100	
L - 17	9	14	0.12711	0.27038	0.0000	100	
L - 18	10	11	0.08205	0.19207	0.0000	100	
L - 19	12	13	0.22092	0.19988	0.0000	100	
L - 20	13	14	0.17093	0.34802	0.0000	100	

D.4 Red de prueba de 28 nodos

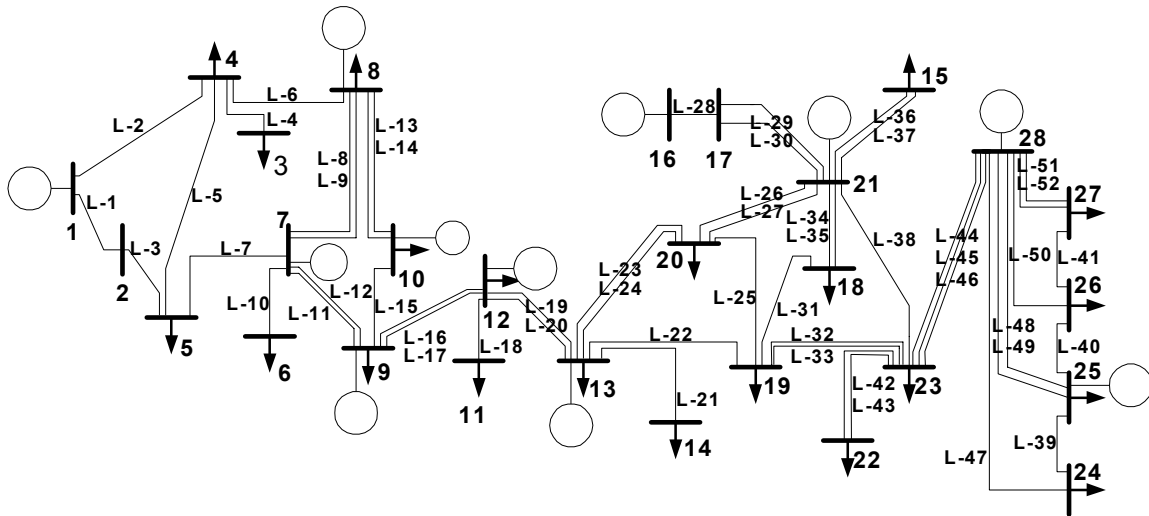


Tabla D.7.- Datos de nodos.

No. Nodo	Tipo	PC	QC	Vmax	Vmin	Shunt(B)
1	1	0.0	0.0	1.10	0.90	
2	2	0.0	0.0	1.05	0.95	-0.5
3	2	14.053	4.662	1.05	0.95	
4	2	57.227	18.811	1.05	0.95	
5	2	57.243	18.82	1.05	0.95	
6	2	94.356	31.012	1.05	0.95	
7	1	0.0	0.0	1.05	0.95	
8	1	141.549	46.519	1.05	0.95	-1.0
9	1	130.463	42.883	1.05	0.95	
10	1	86.041	28.271	1.05	0.95	-0.42
11	2	50.053	16.263	1.05	0.95	
12	3	83.35	27.409	1.05	0.95	
13	1	0.015	0.102	1.05	0.95	-1.5
14	2	28.194	9.264	1.05	0.95	
15	2	113.209	37.221	1.05	0.95	
16	1	0.0	0.0	1.05	0.95	-1.5
17	2	0.0	0.0	1.05	0.95	-1.0
18	2	58.557	19.241	1.05	0.95	
19	2	81.999	26.938	1.05	0.95	0.5
20	2	91.067	29.939	1.05	0.95	-0.5
21	1	0.0	0.0	1.05	0.95	
22	2	51.546	16.934	1.05	0.95	
23	2	38.0	44.0	1.05	0.95	-0.54
24	2	100.888	33.157	1.05	0.95	
25	3	122.966	40.432	1.05	0.95	-0.6
26	2	164.0	447.0	1.05	0.95	
27	2	5.531	1.816	1.05	0.95	
28	1	0.0	0.0	1.10	0.90	

Tabla D.8- Datos de generación

No. Nodo	Pmax	Qmax	Qmin
1	80	150	-150
7	150	190	-190
8	150	190	-190
9	55	90	-90
10	30	90	-90
12	0	300	-300
13	200	200	-200
16	100	100	-100
21	300	300	-300
25	0	350	-350
28	600	600	-600

Tabla D.9.- Datos de línea de transmisión

No. Lin	NS	NE	R	X	YD/2	Lim	TAPS
L - 1	1	2	0.03077	0.20499	0.1947	150	
L - 2	1	4	0.01227	0.15195	0.2452	150	
L - 3	2	5	0.0	-0.03484	0.0	150	
L - 4	4	3	0.0112	0.07454	0.0708	150	
L - 5	4	5	0.00168	0.01118	0.01062	50	
L - 6	4	8	0.01272	0.15695	0.25322	150	
L - 7	5	7	0.0816	0.18745	0.17804	150	
L - 8	7	8	0.00413	0.0274	0.0261	150	
L - 9	7	8	0.00413	0.0274	0.0261	150	
L - 10	7	6	0.00208	0.01393	0.01319	150	
L - 11	7	9	0.00413	0.02748	0.0261	150	
L - 12	7	9	0.00413	0.02748	0.0261	150	
L - 13	8	10	0.00221	0.01472	0.01398	150	
L - 14	8	10	0.00221	0.01472	0.01398	150	
L - 15	9	10	0.00365	0.2432	0.02308	200	
L - 16	9	12	0.04032	0.26835	0.25488	200	
L - 17	9	12	0.04032	0.26835	0.25488	200	
L - 18	12	11	0.01949	0.11178	0.1042	200	
L - 19	12	13	0.00951	0.06337	0.06013	300	
L - 20	12	13	0.00951	0.06337	0.06013	300	
L - 21	13	14	0.02411	0.1606	0.15245	150	
L - 22	13	19	0.01484	0.09877	0.09381	150	
L - 23	13	20	0.01119	0.07454	0.07074	150	
L - 24	13	20	0.01119	0.07454	0.07074	150	
L - 25	19	20	0.00374	0.02502	0.02407	150	
L - 26	20	21	0.0028	0.01863	0.0177	250	
L - 27	20	21	0.0028	0.01863	0.0177	250	
L - 28	17	16	0.0041	0.05071	0.7485	150	

No. Lin	NS	NE	R	X	YD/2	Lim	TAPS
L - 29	17	21	0.0	0.02313	0.0	150	1.04
L - 30	17	21	0.0	0.02313	0.0	150	1.04
L - 31	18	19	0.00194	0.01529	0.01563	150	
L - 32	19	23	0.0263	0.17644	0.16703	150	
L - 33	19	23	0.0238	0.1584	0.15045	150	
L - 34	21	18	0.00457	0.03598	0.03682	150	
L - 35	21	18	0.00457	0.03598	0.03682	150	
L - 36	21	15	0.01144	0.08995	0.04597	150	
L - 37	21	15	0.0154	0.10249	0.09735	150	
L - 38	21	23	0.01116	0.13769	0.2221455	150	
L - 39	24	25	0.00332	0.02609	0.02666	150	
L - 40	25	26	0.00305	0.02052	0.01942	150	
L - 41	26	27	0.0021	0.01397	0.013275	150	
L - 42	23	22	0.01882	0.14794	0.1512	150	
L - 43	23	22	0.02303	0.15325	0.01456	150	
L - 44	23	28	0.01466	0.11604	0.1186	200	
L - 45	23	28	0.01806	0.1206	0.11416	200	
L - 46	23	28	0.01806	0.1203	0.11416	200	
L - 47	28	24	0.00458	0.03598	0.0368	200	
L - 48	28	25	0.00408	0.02721	0.02582	200	
L - 49	28	25	0.00409	0.0272	0.02595	200	
L - 50	28	26	0.0071	0.04764	0.04509	150	
L - 51	28	27	0.00574	0.0382	0.036285	150	
L - 52	28	27	0.00237	0.02925	0.04719	150	

APENDICE E

Descripción del Programa Digital

E.1 Introducción

Una vez que se estudió los fundamentos de la herramienta de optimización inteligente y su aplicación a la solución del problema, se realizó su implementación en un programa digital que simula una restauración en estado estacionario que ayuda a decidir una secuencia mediante la implementación de un *AG* simple.

E.2 Descripción del Programa Principal y las Subrutinas

Para evaluar la habilidad de cada miembro de la población, se inserta la ecuación (3.7) en una rutina de *FP* que interactúa con una rutina de *DPA* para asegurar que no se violen las restricciones de operación (ecuación (3.2)). En cada etapa se evalúan todas las posibilidades de energizar un elemento de la red, y en cada posibilidad, se obtiene una habilidad. Y en la búsqueda del más hábil, se decide qué elemento de la red energizar. En esta tesis se considera que una etapa es equivalente a la energización de una línea y la restauración de una carga si el extremo de la línea energizada energiza a un nodo de carga previamente desenergizado.

En el caso de los transformadores, se energizan al energizarse la línea que le corresponda. En el caso de los elementos en derivación, se consideran energizados con sus valores correspondientes al energizarse el nodo que les corresponda. Después de alcanzar un número máximo de generaciones, el *AG* determina una línea factible, como candidata a restaurarse, con magnitudes de voltaje nodal y potencia que maximicen la *FH*, y mantengan en sus rangos las restricciones del sistema.

Para la evaluación de la *FH*, se requiere insertar dentro de los operadores de cruzamiento y mutación, una rutina de *FP* que determinará la habilidad de cada individuo. Así mismo, una rutina de *DPA* evaluará si el sistema opera en forma segura. De rebasarse alguna restricción de operación, dicha rutina ajustará el suministro de potencia real en los nodos de generación. En caso de rebasarse algún límite de generación reactiva, se limita la magnitud de voltaje en ese nodo para mantener el balance en todo el sistema.

Se realizó esta herramienta computacional en lenguaje FORTRAN, y se compone de un programa principal y diez subrutinas que se describen como sigue:

RESTAURACIÓN: Programa principal que lee los datos de entrada para flujos de potencia, así como los límites del sistema y las líneas a restaurar. Llama a la subrutina *RSEP*, elige a la línea que será restaurada, y despliega los datos de salida.

RSep: Es la subrutina que ajusta los datos del sistema post-disturbio, ó bien los datos más actuales en medio de la secuencia. Determina el área desenergizada, las vías de transmisión viables, y las no viables para restaurarse. Contiene las subrutinas *Conv*, *Fuen*, y *Gene*.

Conv: Esta subrutina determina los nodos del sistema que se encuentran energizados, y los que se encuentran desenergizados. Hace una estimación de la potencia de generación disponible, y la cantidad de carga demandada.

Fuen: Esta subrutina actualiza la situación de los nodos, esto es, los que son nodos de carga, y los que son nodos de generación. Ya que un nodo que normalmente es de generación y que ha sido desenergizado por el disturbio, habrá etapas en las que sea tomado simplemente como nodo de carga. También actualiza la situación de los transformadores y de los elementos en derivación.

Gene: Esta subrutina contiene los parámetros del *AG*, como tamaño de la población, número máximo de generaciones, probabilidad de cruce y de mutación. Contiene las

subrutinas *Creapop*, *Jac*, *Jacob*, y *Dpa*. Se efectúan los operadores genéticos de selección, cruzamiento y mutación, y se elige al mejor candidato a solución para líneas factibles.

Creapop: Esta Subrutina contiene un generador de números aleatorios decimales entre 0 y 1.

Jac: Esta subrutina contiene el programa para flujos de potencia por el método de Newton-Raphson. Utiliza las variables expresadas en forma polar. Contiene la subrutina *Jacob* para formar el jacobiano y la subrutina *Gauss* para resolver un sistema de ecuaciones. Contiene la función de habilidad que avalúa a los voltajes nodales.

Jacob: Esta subrutina sirve para formar el jacobiano y contiene la subrutina *Gauss* para resolver el sistema de ecuaciones.

Gauss: Esta subrutina sirve para resolver un sistema de ecuaciones por triangulación y sustitución de regreso.

Dpa: Esta Subrutina forma la matriz B prima del método desacoplado rápido de flujos de carga. Con ella determina los coeficientes de sensibilidad en potencia activa, para utilizarlos en una rutina interna del *IMSL* de programación lineal basada en el método *Simplex* para realizar un despacho de potencia activa. Contiene a la subrutina *Bbinv*.

Bbinv: Esta subrutina se encarga de invertir matrices, basada en el método de *Gauss-Jordan* para invertir matrices.

Las subrutinas representan los pasos y las estrategias descritas en los capítulos anteriores. También se tiene una plantilla de datos de entrada basados en los datos proporcionados en el apéndice D. Se utilizan comandos y rutinas propias del lenguaje FORTRAN que son necesarias para un correcto funcionamiento del programa digital, y la obtención de resultados confiables.

La figura 3.5 del capítulo 3 muestra la metodología descrita para simular un proceso de restauración utilizando un algoritmo genético.

E.2.1 Programa Fuente

```

PROGRAM RESTAURACION
USE PORTLIB
DIMENSION
NOD(60,2),R(60),X(60),YD(60),AVS(60,60),KG(60)
DIMENSION
PG(60),QG(60),PC(60),QC(60),BETA(60),PLIM(60)
DIMENSION
T(60),FIFU(60),MOBY(60),HAST(60),GAMA(60),DM(100)
DIMENSION
VMIN(60),VMAX(60),PMAX(60),QMIN(60),QMAX(60)
DIMENSION
IS(10),IE(10),TAP(10),IN(10),REA(10),Z(60,60)
INTEGER NB,NL,NG,NTAP,NDEV,NOD,IS,IE,IN,DAL,SA
REAL T,R,X,YD,PG,QG,PC,QC,BASE,TAP,REA
REAL VMIN,VMAX,PMAX,QMIN,QMAX,MOBY,PLIM
! ARCHIVO DE DATOS DE ENTRADA = ENTRADA.DAT
! ARCHIVO DE RESULTADOS OBTENIDOS =
SALIDA.DAT
OPEN(UNIT=2,FILE='CFE29.DAT')
OPEN(UNIT=3,FILE='DAT2.DAT')
OPEN(UNIT=8,FILE='LIM29.DAT')
OPEN(UNIT=15,FILE='CRUZA.DAT')
READ(2,*)NB
READ(2,*)NL
READ(2,*)NG
WRITE(6,*)NG
! EN CASO DE INCLUIR TRANSFORMADORES CON
TAP
; FUERA DE SU POSICIÓN NOMINAL, SE TIENE
NTAP=NUMERO
; DE TRANSFORMADORES CON TAP
READ(2,*)NTAP
! ELEMENTOS EN DERIVACION EN LOS NODOS
! NDEV=NUMERO DE ELEMENTOS EN DERIVACION
READ(2,*)NDEV
! INDICADOR DEL TIPO DE NODO CONSIDERADO ES
UN
; ARREGLO CON TANTOS ELEMENTOS
! COMO NODOS TIENE EL SISTEMA
! T(I)=TIPO DE NODO (GENERACION O CARGA)
READ(2,*)(T(I),I=1,NB)
DO I=1,NB
END DO
! NOD(I,1)=NODO DE SALIDA DE UNA LINEA
! NOD(I,2)=NODO DE LLEGADA DE UNA LINEA
DO I=1,NL
READ(2,678)NOD(I,1),NOD(I,2),R(I),X(I),YD(I)
!Lee los datos del conductor para cada línea
END DO
678 FORMAT(2I10,3F11.8)
! R(I)=RESISTENCIA DE LA LINEA
! X(I)=REACTANCIA DE LA LINEA
! YD(I)=ADMITANCIA EN DERIVACION=YD(I)/2
! PG(I)=POTENCIA ACTIVA DE GENERACION EN EL
NODO I
! QG(I)=POTENCIA REACTIVA DE GENERACION EN EL
NODO I
! PC(I)=POTENCIA ACTIVA DE CARGA EN EL NODO I
! QC(I)=POTENCIA REACTIVA DE CARGA EN EL NODO
I
DO I=1,NB
READ(2,*)PG(I),QG(I),PC(I),QC(I)
!Lee los valores de las potencias en cada nodo
END DO
IF(NTAP.NEQV.0)THEN
DO N=1,NTAP
READ(2,123)IE(N),IS(N),TAP(N)
123 FORMAT(2I5,F10.4)
END DO
END IF
IF(NDEV.NEQV.0)THEN
DO N=1,NDEV
READ(2,153)IN(N),REA(N)
END DO
153 FORMAT(15,F10.4)
END IF
BASE = 100.0
WRITE(6,131)BASE
WRITE(3,131)BASE
131 FORMAT(20X,'POTENCIA BASE=',F10.3)
DO I=1,NB
! Lee los limites de voltaje y potencia de cada nodo.
READ(8,15)VMIN(I),VMAX(I),PMAX(I),QMAX(I),QMIN(I)
)
15 FORMAT(5F7.2)
END DO
DO I=1,NL
! Lee los limites en las lineas de transmisión.
READ(8,16)PLIM(I)
16 FORMAT(F7.2)
END DO
DO M=1,100
READ(15,*)DM(M)
END DO
GAMA(1)=1
! BUS COMPENSADOR = BUS INICIAL
DO K=2,NB ! GAMA = 1 BUS ENERGIZADO.
GAMA(K)=0 ! GAMA = 0 BUS DESENERGIZADO.
END DO
DO K=1,NL
BETA(K) = 1
END DO
WRITE(*,*) '¿CUANTAS LINEAS A RESTAURAR?'
WRITE(3,*) '¿CUANTAS LINEAS A RESTAURAR?'
READ(*,*)DAL
WRITE(3,*)DAL
WRITE(*,*) 'INSERTE EN FORMA DE LISTA LAS
LINEAS A RESTAURAR'
WRITE(3,*) 'INSERTE EN FORMA DE LISTA LAS
LINEAS A RESTAURAR'
DO I=1,DAL
READ(*,*)SA
BETA(SA) = 0
WRITE(3,*)SA

```



```

END DO
DO I=1,NL
IF(BETA(I) == 1)THEN
PIT=NOD(I,1)
JAX=NOD(I,2)
GAMA(PIT)=1
GAMA(JAX)=1
END IF
END DO
WRITE(*,*) *** COMIENZA EL ANALISIS PARA
RESTAURACION...!
  98 CALL RSEP
IF(CA.GE.2)THEN
DO J=1,CA
TOTI=TOTI+FIFU(J)
END DO
OCO = TOTI/CA
DO J=1,CA
MOBY(J)=FIFU(J)/OCO
END DO
OAK = MOBY(1)
ZUR = 1
DO J=2,CA
IF(MOBY(J).GT.OAK)THEN
OAK = MOBY(J)
ZUR = J
END IF
END DO
ELSE
ZUR = 1
END IF
DO J=1,CA
IF(J.EQ.ZUR)THEN
WRITE(*,*) '
WRITE(3,*) '
WRITE(*,*)'LA LINEA A RESTAURAR ES ',HAST(J)
WRITE(*,*)' Con voltaje de generacion de '
WRITE(*,*)(AVS(J,LN),LN=1,NGFICT)
WRITE(3,*)'LA LINEA A RESTAURAR ES ',HAST(J)
WRITE(3,*)' Con voltaje de generacion de '
WRITE(3,*)(AVS(J,LN),LN=1,NGFICT)
WRITE(*,*) '
WRITE(3,*) '
WRITE(*,*)'LA FUNCION DE HABILIDAD ES ',KG(J)
WRITE(*,*) ' FF = ',FIFU(J)
WRITE(3,*)'LA FUNCION DE HABILIDAD ES ',KG(J)
WRITE(3,*) ' FF = ',FIFU(J)
SOL = HAST(J)
BETA(SOL) = 1
GB = NOD(SOL,1)
DET = NOD(SOL,2)
DO K=1,NB
IF(Z(K,J) /= 0.0)THEN
IF(T(K) == 0.0 .AND. GAMA(K) == 1)THEN
WRITE(*,*)'Con potencia real de generación en el nodo',K,'
de'
WRITE(*,*)Z(K,J)
WRITE(3,*)'Con potencia real de generacion en el nodo',K,'
de'
WRITE(3,*)Z(K,J)
ELSE
DEN = PC(K) - Z(K,J)
WRITE(*,*)'Potencia real consumida en el nodo',K,' debido al
 tiro de carga'
WRITE(*,*)DEN
WRITE(3,*)'Potencia real consumida en el nodo',K,' debido al
 tiro de carga'
WRITE(3,*)DEN
END IF
END IF
END IF
END DO
GAMA(GB) = 1
GAMA(DET) = 1
END IF
END DO
Z = 0.0
FIFU = 0.0
WRITE(3,*)'*****'
LIN = LIN + 1
IF(LIN.LT.NL)GOTO 98
WRITE(*,*)'FIN DE LA EJECUCION'
END PROGRAM RESTAURACION

SUBROUTINE RSEP
USE PORTLIB
DIMENSION
ALFA(60),BETA(60),GAMA(60),T1(30),NID(60,2),RFI(60),
XF(60),YDI(60)
DIMENSION
NAD(60,2),RF(60),XF(60),YDF(60),VM12(60),VMA2(60),D
M(100)
DIMENSION
PG2(60),PC2(60),QG2(60),QC2(60),FIFU(60),AVS(60,60),Q
MI2(60)
DIMENSION
KINT(60),HAST(60),NOD(60,2),R(60),X(60),YD(60),PMA
X(60),QMA2(60)
DIMENSION
PG(60),PC(60),QG(60),QC(60),VMIN(60),VMAX(60),PLIM(
60),QMIN(60)
DIMENSION
IE(10),IS(10),TAP(10),IN(10),REA(10),PLI2(60),PMA2(60),
QMAX(60)
DIMENSION
IE1(10),IS1(10),TAP1(10),IN1(10),REA1(10),Z(60,60),XSOL
(60),KG(60)
INTEGER NAD,JB,NLFICT,NBFICT
INTEGER AUX1,AUX2,AUX3,AUX4,KINT,NCON
REAL
RF,XF,YDF,PG2,PC2,QG2,QC2,VM12,VMA2,PMA2,Z,QMI
2,QMA2
CA = 0
NAD = 0
ALFA = 0
JB = 0
DO I=1,NL
IF(BETA(I) == 1)THEN
NAD(I,1) = NOD(I,1)
NAD(I,2) = NOD(I,2)
RF(I) = R(I)
XF(I) = X(I)
YDF(I) = YD(I)
AUX1 = NOD(I,1)
AUX2 = NOD(I,2)
ALFA(AUX1) = 1
ALFA(AUX2) = 1
JB = JB + 1
END IF
END DO
!%%%%%%%%%%
DO I=1,NL
IF(BETA(I).EQ.0)THEN
AUX3 = NOD(I,1)
AUX4 = NOD(I,2)
IF(GAMA(AUX3) == 1 .OR. GAMA(AUX4) == 1)THEN
DO L=1,NL
IF(BETA(L) /= 1)THEN
IF(L .NEQV. I)THEN

```

```

DO J=1,2
NAD(L,J) = 0
END DO
END IF
END IF
END DO
NAD(I,1) = NOD(I,1)
NAD(I,2) = NOD(I,2)
RF(I) = R(I)
XF(I) = X(I)
YDF(I) = YD(I)
AUX1 = NOD(I,1)
AUX2 = NOD(I,2)
LAL = I
ALFA(AUX1) = 1
ALFA(AUX2) = 1
JB = JB + 1
NLFICT = JB
L = 0
DO K=1,NB
IF(ALFA(K).EQ.1)THEN
L = L + 1
IF(GAMA(K).EQ.1)THEN
PG2(L) = PG(K)
QG2(L) = QG(K)
VMI2(L) = VMIN(K)
VMA2(L) = VMAX(K)
PMA2(L) = PMAX(K)
ELSE
PG2(L)=0.0
QG2(L)=0.0
END IF
PC2(L)=PC(K)
QC2(L)=QC(K)
QMI2(L)=QMIN(K)
QMA2(L)=QMAX(K)
KINT(K) = L
END IF
END DO
NBFICT = L
CALL CONV
CALL FUEN
CALL GENE
HAST(CA) = 1
NCON = 0
DO K=1,NB
IF(ALFA(K) == 1)THEN
NCON = NCON + 1
Z(K,CA) = XSOL(NCON)
END IF
END DO
DO K=1,NB
IF(GAMA(K) /= 1)THEN
ALFA(K) = 0
END IF
END DO
JB = JB - 1
IF(BETA(I) /= 1)THEN
NAD(I,1)=0
NAD(I,2)=0
RF(I) = 0.0
XF(I) = 0.0
YDF(I)= 0.0
END IF
END IF
END IF
END DO
RETURN
END

```

```

*****
SUBROUTINE GENE
*****
USE MSIMSL
DIMENSION
VFICT(100,NBFICT),FEF(100),VG2(NGFICT),VGF(100,NG
FICT),VAX(NGFICT),VIN(NGFICT),BTY(100)
DIMENSION
T1(30),AUX(100,NGFICT),ESP(100),AUC(100),MIMU(100)
,PEET(NGFICT),FIFU(10)
DIMENSION
VMI2(60),VMA2(60),PG2(60),PC2(60),QG2(60),QC2(60),P
MA2(60),AU(100,NGFICT)
DIMENSION
NID(60,2),RFI(60),XFI(60),YDI(60),AVS(60,60),PS(60),PLI2
(60),QMA2(60)
DIMENSION
IE1(10),IS1(10),IN1(10),TAP1(10),REA1(10),XSOL(60),PC3
(NBFICT),QMI2(60)
DIMENSION
QC3(NBFICT),PG3(NBFICT),QG3(NBFICT),TEN(150),VG3
(NGFICT),DM(100),KG(10)
INTEGER
GEN,ESP,QRO,STL,UNL,PIT,FDM,NMGEN,MOON,LONG
,POP,JON,VER,PUT
REAL
VFICT,FEF,VG2,VGF,VAX,VIN,TOL,TOT,AUX,KIL,PAT,
KIE,OP,PHI,TEN,PEET
REAL MIMU,BON,VG3,PT,PM,RRR
POP = 100
NMGEN = 50
TOL = 0.001
GEN = 0
VFICT = 0.0
VER = POP/2
JON = 0
BON = 0.0
PT = 0.6
PM = 0.1
WRITE(*,*) 'OTRA LINEA'
DO K=1,NBFICT
PC3(K)=PC2(K)
QC3(K)=QC2(K)
PG3(K)=PG2(K)
QG3(K)=QG2(K)
END DO
M=1
DO K=1,NBFICT
IF(T1(K) == 0.0)THEN
VFICT(1,K) = 1.0
END IF
END DO
KIE = 0.985
LONG = POP - 24
DO M=LONG,POP
DO K=1,NBFICT
IF(T1(K) == 0.0)THEN
VFICT(M,K) = KIE
IF(KIE == 1.015)THEN
KIE = 0.985
ELSE
KIE=KIE+0.005
END IF
END IF
END DO
END DO
CALL CREAPOP(BTY)
MOON = POP - 25
LONG = 1

```

```

DO M=2,MOON
DO K=1,NBFICT
IF(T1(K) == 0.0)THEN
VFICT(M,K)=VMI2(K)+((VMA2(K)-
VMI2(K))*(BTY(LONG)))
IF(LONG.EQ. 100)THEN
LONG = 1
ELSE
LONG = LONG + 1
END IF
END IF
END DO
END DO
96 GEN = GEN + 1
WRITE(*,*)GEN
FEF = 0.0
MIMU = 0.0
DO M=1,POP
L = 0
DO K=1,NBFICT
IF(VFICT(M,K) /= 0.0)THEN
L = L + 1
VG2(L) = VFICT(M,K)
VGF(M,L) = VG2(L)
VIN(L) = VMI2(K)
VAX(L) = VMA2(K)
END IF
END DO
DO K=1,NBFICT
PC2(K)=PC3(K)
QC2(K)=QC3(K)
PG2(K)=PG3(K)
QG2(K)=QG3(K)
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
PG2(K) = 0.0
QG2(K) = 0.0
END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
PHI = 0.0
CALL JAC
DO K=1,NBFICT
PC2(K)=PC3(K)
QC2(K)=QC3(K)
PG2(K)=PG3(K)
QG2(K)=QG3(K)
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
PG2(K) = 0.0
QG2(K) = 0.0
END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
IF(FE .GT. 100.0)THEN
CALL
DPA(NBFICT,NLFICT,NID,RFI,XFI,YDI,PMA2,PC3,PLI2,P
ERP,PS,T1,XSOL)
ELSE
XSOL = 0.0
END IF
DO N=2,NBFICT
IF(T1(N) == 0.0)THEN
PG2(N) = XSOL(N)
ELSE
PC2(N) = PC3(N)-XSOL(N)
END IF
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
PG2(N) = 0.0
QG2(N) = 0.0
END IF
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
PG2(N) = 0.0
QG2(N) = QG3(N)
END DO
PG2(1) = 0.0
CALL JAC
PHI=FF/NGFICT
DO N=1,NBFICT
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
IF(XSOL(N) /= 0.0)THEN
IF((PC3(N)-XSOL(N)) .GT. (PC3(N)/2))THEN
FF=FF-(PHI/2)
ELSE
FF=FF-PHI
END IF
END IF
END IF
END DO
FEF(M) = FF
END DO
OP = FEF(1)
FDM = 1
DO M=2,POP
IF(FEF(M) .GT. OP)THEN
OP = FEF(M)
FDM = M
END IF
END DO
IF(OP .GT. BON)THEN
JON = FDM
BON = OP
L = 0
DO K=1,NBFICT
IF(VFICT(JON,K) /= 0.0)THEN
L = L + 1
VG3(L)=VFICT(JON,K)
END IF
END DO
END IF
IF(GEN.EQ. NMGEN)GOTO 88

! INICIA EL PROCESO DE SELECCIÓN
TOT = 0.0
DO M=1,POP
TOT = TOT + FEF(M)
END DO
IF(TOT == 0.0)THEN
FF = 0.0
GOTO 878
END IF
PROM = TOT/POP
ICUEN = 1
DO M=1,POP
IF(GEN.EQ. 1)THEN
IF(FEF(M)/PROM .LT. 1.0)THEN
ESP(M)=NINT((FEF(M)/PROM) - 0.2)
ELSE
ESP(M)=NINT((FEF(M)/PROM) + 0.2)
END IF
ELSE
ESP(M)=NINT(FEF(M)/PROM)
END IF
IF(ESP(M).GT.0)THEN
DO J=ICUEN,ESP(M)+ICUEN-1
IF(J .LE. 100)THEN
DO L=1,NGFICT
AUX(J,L)=(VGF(M,L)-VIN(L))/(VAX(L)-VIN(L))
END DO
END IF

```

```

END DO
ICUEN=ICUEN+ESP(M)
END IF
END DO

MOON = 0
DO M=1,POP
LONG = ESP(M)
MOON = MOON + LONG
END DO

IF(MOON .LT. (POP-2))THEN
M=POP
DO L=1,NGFICT
AUX(M,L)=(VG3(L)-VIN(L))/(VAX(L)-VIN(L))
END DO
M=POP-1
IF(FEF(M)/PROM .LT. 1.0)THEN
DO L=1,NGFICT
AUX(M,L)=(VGF(FDM,L)-VIN(L))/(VAX(L)-VIN(L))
END DO
END IF
END IF

! INICIA EL PROCESO DE CRUZAMIENTO DE
CROMOSOMAS
DO M=1,POP
DO L=1,NGFICT
VGF(M,L)=VIN(L)+((VAX(L)-VIN(L))*(AUX(M,L)))
VG2(L) = VGF(M,L)
END DO
DO K=1,NBFICT
PC2(K)=PC3(K)
QC2(K)=QC3(K)
PG2(K)=PG3(K)
QG2(K)=QG3(K)
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
PG2(K) = 0.0
QG2(K) = 0.0
END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
PHI = 0.0
CALL JAC
DO K=1,NBFICT
PC2(K)=PC3(K)
QC2(K)=QC3(K)
PG2(K)=PG3(K)
QG2(K)=QG3(K)
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
PG2(K) = 0.0
QG2(K) = 0.0
END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
IF(FE .GT. 100.0)THEN
CALL DPA
ELSE
XSOL = 0.0
END IF
DO N=2,NBFICT
IF(T1(N) == 0.0)THEN
PG2(N) = XSOL(N)
ELSE
PC2(N) = PC3(N)-XSOL(N)
END IF
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
PG2(N) = 0.0
QG2(N) = 0.0
END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
DO N=1,NBFICT
IF(XSOL(N) /= 0.0)THEN
IF((PC3(N)-XSOL(N)) .GT. (PC3(N)/2))THEN
FF=FF-(PHI/2)
ELSE
FF=FF-PHI
END IF
END IF
END IF
END DO
MIMU(M) = FF
END DO
DO L=1,NGFICT
DO M=1,POP
AUX(M,L)=AUX(M,L)*10000.0
AU(M,L)=NINT(AUX(M,L))
END DO
END DO
CALL RANDOM_SEED( )
CALL RANDOM_NUMBER(TEN)
MOON = 1
PHI = 0.0
DO L=1,NGFICT
J = 0
M = 0
91 M = M + 1
NIP = DM(M)
MIP = DM(M+1)
CALL RANDOM_SEED( )
CALL RANDOM_NUMBER(RRR)
IF(RRR .LE. PT)THEN
AUC(MIP) = AU(MIP,L)
QRO = NINT(AU(NIP,L))
STL = NINT(AUC(MIP))
UNL = NINT(AU(MIP,L))
PHI = TEN(MOON)*10.0
IF(MOON .EQ. 150)THEN
MOON = 1
ELSE
MOON = MOON + 1
END IF
LEN=NINT(PHI)
LEN = LEN + 3
CALL MVBITS(QRO, 0, LEN, UNL, 0)
CALL MVBITS(STL, 0, LEN, QRO, 0)
AU(MIP,L) = UNL
AU(NIP,L) = QRO
END IF
J = J + 1
M = M + 1
IF(J .LT. VER)GOTO 91
END DO

DO L=1,NGFICT
DO M=1,POP
AU(M,L)=AU(M,L)/10000.0
END DO
END DO
PHI = 0.0
DO M=1,POP

```

```

DO L=1,NGFICT
VGF(M,L)=VIN(L)+((VAX(L)-VIN(L))*(AU(M,L)))
VG2(L) = VGF(M,L)
END DO
DO K=1,NBFICT
PC2(K)=PC3(K)
QC2(K)=QC3(K)
PG2(K)=PG3(K)
QG2(K)=QG3(K)
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
PG2(K) = 0.0
QG2(K) = 0.0
END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
DO K=1,NBFICT
PC2(K)=PC3(K)
QC2(K)=QC3(K)
PG2(K)=PG3(K)
QG2(K)=QG3(K)
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
PG2(K) = 0.0
QG2(K) = 0.0
END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
IF(FF .GT. 100.0)THEN
CALL DPA
ELSE
XSOL = 0.0
END IF
DO N=2,NBFICT
IF(T1(N) == 0.0)THEN
PG2(N) = XSOL(N)
ELSE
PC2(N) = PC3(N)-XSOL(N)
END IF
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
PG2(N) = 0.0
QG2(N) = 0.0
END IF
QG2(N) = QG3(N)
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
PHI=FF/NGFICT
DO N=1,NBFICT
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
IF(XSOL(N) /= 0.0)THEN
IF((PC3(N)-XSOL(N)) .GT. (PC3(N)/2))THEN
FF=FF-(PHI/2)
ELSE
FF=FF-PHI
END IF
END IF
END IF
END DO
FEF(M) = FF
END DO
DO M=1,POP
IF(FEF(M).GT.MIMU(M))THEN
DO L=1,NGFICT
AUX(M,L) = AU(M,L)
END DO
ELSE

```

```

DO L=1,NGFICT
AUX(M,L)=AUX(M,L)/10000.0
END DO
END IF
END DO
AU = 0.0
! INICIA LA MUTACIÓN
DO M=1,POP
DO L=1,NGFICT
AUX(M,L) = AUX(M,L)
END DO
END DO
PHI = 0.0
DO M=1,POP
DO L=1,NGFICT
VGF(M,L)=VIN(L)+((VAX(L)-VIN(L))*(AUX(M,L)))
VG2(L) = VGF(M,L)
END DO
DO K=1,NBFICT
PC2(K)=PC3(K)
QC2(K)=QC3(K)
PG2(K)=PG3(K)
QG2(K)=QG3(K)
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
PG2(K) = 0.0
QG2(K) = 0.0
END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
DO K=1,NBFICT
PC2(K)=PC3(K)
QC2(K)=QC3(K)
PG2(K)=PG3(K)
QG2(K)=QG3(K)
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
PG2(K) = 0.0
QG2(K) = 0.0
END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
IF(FF .GT. 100.0)THEN
CALL DPA
ELSE
XSOL = 0.0
END IF
DO N=2,NBFICT
IF(T1(N) == 0.0)THEN
PG2(N) = XSOL(N)
ELSE
PC2(N) = PC3(N)-XSOL(N)
END IF
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
PG2(N) = 0.0
QG2(N) = 0.0
END IF
QG2(N) = QG3(N)
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
HI=FF/NGFICT
DO N=1,NBFICT
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
IF(XSOL(N) /= 0.0)THEN
IF((PC3(N)-XSOL(N)) .GT. (PC3(N)/2))THEN
FF=FF-(PHI/2)

```

```

ELSE
FF=FF-PHI
END IF
END IF
END IF
END DO
MIMU(M) = FF
END DO
DO M=1,POP
DO L=1,NGFICT
AUX(M,L)=AUX(M,L)*10000.0
END DO
END DO
PHI = 0.0
DO M=1,POP
DO L=1,NGFICT
CALL RANDOM_SEED( )
CALL RANDOM_NUMBER(RRR)
IF(RRR .LT. PM)THEN
CALL RANDOM_SEED( )
CALL RANDOM_NUMBER(KIL)
KIE=KIL*10.0
KIC=NINT(KIE)
KIC = KIC + 3
K = KIC
PIT = AUX(M,L)
PUT = IBCHNG(PIT,K)
PAT = PUT/10000.0
PEET(L) = PAT
VG2(L)=VIN(L)+((VAX(L)-VIN(L))*PAT)
ELSE
AUX(M,L)=AUX(M,L)/10000.0
PEET(L) = AUX(M,L)
VG2(L)=VIN(L)+((VAX(L)-VIN(L))*AUX(M,L))
END IF
END DO
DO K=1,NBFICT
PC2(K)=PC3(K)
QC2(K)=QC3(K)
PG2(K)=PG3(K)
QG2(K)=QG3(K)
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
PG2(K) = 0.0
QG2(K) = 0.0
END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
DO K=1,NBFICT
PC2(K)=PC3(K)
QC2(K)=QC3(K)
PG2(K)=PG3(K)
QG2(K)=QG3(K)
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
PG2(K) = 0.0
QG2(K) = 0.0
END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
IF(FF .GT. 100.0)THEN
CALL DPA
ELSE
XSOL = 0.0
END IF
DO N=2,NBFICT
IF(T1(N) == 0.0)THEN
PG2(N) = XSOL(N)

```

```

ELSE
PC2(N) = PC3(N)-XSOL(N)
END IF
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
PG2(N) = 0.0
QG2(N) = 0.0
END IF
QG2(N) = QG3(N)
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
PHI=FF/NGFICT
DO N=1,NBFICT
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
IF(XSOL(N) /= 0.0)THEN
IF((PC3(N)-XSOL(N)) .GT. (PC3(N)/2))THEN
FF=FF-(PHI/2)
ELSE
FF=FF-PHI
END IF
END IF
END IF
END DO
FEF(M) = FF
IF(FEF(M).GT.MIMU(M))THEN
DO L=1,NGFICT
AUX(M,L) = PEET(L)
END DO
ELSE
DO L=1,NGFICT
AUX(M,L) = AU(M,L)
END DO
END IF
END DO
DO M=1,POP
DO L=1,NGFICT
VGF(M,L)=VIN(L)+((VAX(L)-VIN(L))*(AUX(M,L)))
END DO
END DO
DO M=1,POP
DO K=1,NBFICT
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
VFICT(M,K) = 0.0
END IF
END DO
END DO
DO M=1,POP
L = 0
DO K=1,NBFICT
IF(VFICT(M,K) /= 0.0)THEN
L = L + 1
VFICT(M,K) = VGF(M,L)
END IF
END DO
END DO
IF(GEN.LE.NMGEN)GOTO 96
!*****
88 L = 0
DO L=1,NGFICT
VG2(L)=VG3(L)
END DO
DO K=1,NBFICT
PC2(K)=PC3(K)
QC2(K)=QC3(K)
PG2(K)=PG3(K)
QG2(K)=QG3(K)
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
PG2(K) = 0.0
QG2(K) = 0.0

```

```

END IF
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
  878 CA = CA + 1
IF(FF.GT.100.0)THEN
CALL DPA
END IF
DO N=2,NBFICT
IF(T1(N) == 0.0)THEN
PG2(N) = XSOL(N)
ELSE
PC2(N) = PC3(N)-XSOL(N)
END IF
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
PG2(N) = 0.0
QG2(N) = 0.0
END IF
QG2(N) = QG3(N)
END DO
PG2(1) = 0.0
QG2(1) = 0.0
CALL JAC
PHI=FF/NGFICT
DO N=1,NBFICT
IF(T1(N) /= 0.0)THEN
IF(XSOL(N) /= 0.0)THEN
IF((PC3(N)-XSOL(N)).GT.(PC3(N)/2))THEN
FF=FF-(PHI/2)
ELSE
FF=FF-PHI
END IF
END IF
END IF
END DO
DO K=1,NGFICT
AVS(CA,K) = VG2(K)
END DO
FIFU(CA) = FF
KG(CA) = AUX5
RETURN
END

!*****
SUBROUTINE JAC
!*****
DIMENSION NID(60,2),XFI(60),YDI(60),RFI(60)
DIMENSION
PG2(60),P(60),PC2(60),Q(60),PB(60),QB(60),QG2(60),QC2(
60)
DIMENSION
V(60),VG2(NGFICT),THETA(60),T1(30),THEG(60),DPQ(60
)
DIMENSION
YR(60,60),YI(60,60),AJ(80,80),PS(60),QMI2(60),QMA2(60)
DIMENSION IE1(10),IS1(10),TAP1(10),IN1(10),REA1(10)
REAL MIA3,PS,PERP
INTEGER GEN
!Formación de la matriz de admitancias nodales.
DO N=1,NBFICT
DO J=1,NBFICT
YR(N,J)=0.0
YI(N,J)=0.0
END DO
END DO
DO N=1,NLFICT
ZM=RFI(N)*RFI(N)+XFI(N)*XFI(N)
RL=RFI(N)/ZM
YL=-XFI(N)/ZM
LL=NID(N,1)
MM=NID(N,2)
YR(LL,LL)=YR(LL,LL)+RL
YR(MM,MM)=YR(MM,MM)+RL
YR(LL,MM)=YR(LL,MM)-RL
YR(MM,LL)=YR(LL,MM)
YI(LL,LL)=YI(LL,LL)+YDI(N)+YL
YI(MM,MM)=YI(MM,MM)+YDI(N)+YL
YI(LL,MM)=YI(LL,MM)-YL
YI(MM,LL)=YI(LL,MM)
END DO
IF(NTA2.NEQV.0)THEN
DO N=1,NTA2
MIA1 = IE1(N)
MIA2 = IS1(N)
MIA3 = TAP1(N)
YI(MIA1,MIA1)=YI(MIA1,MIA1)+YI(MIA1,MIA2)-
YI(MIA1,MIA2)/(MIA3*MIA3)
YI(MIA1,MIA2)=YI(MIA1,MIA2)/MIA3
YI(MIA2,MIA1)=YI(MIA1,MIA2)
END DO
END IF
IF(NDE2.NEQV.0)THEN
DO N=1,NDE2
CLE1 = IN1(N)
CLE2 = REA1(N)
YI(CLE1,CLE1)=YI(CLE1,CLE1)+CLE2
END DO
END IF
MM = 0
DO N=1,NBFICT
P(N)=(PG2(N)-PC2(N))/BASE
Q(N)=(QG2(N)-QC2(N))/BASE
PC2(N)=PC2(N)/BASE
QC2(N)=QC2(N)/BASE
THETA(N) = 0.0
IF(T1(N) == 0.0)THEN
MM = MM + 1
V(N) = VG2(MM)
ELSE
V(N) = 1.0
END IF
END DO
NYJ = 0.0
CALL
JACOB(NBFICT,NGFICT,TOL,T1,Q,V,THETA,YR,YI,AJ,D
PQ,P,NYJ)
IF(NYJ == 3.0)THEN
FF = 0.0
GOTO 1002
END IF
PERP = 0.0
PERQ = 0.0
DO K = 1, NBFICT
SUMP = 0.0
SUMQ = 0.0
DO MM = 1, NBFICT
IF(YI(K,MM) .EQ. 0.0)GOTO 181
DEL = THETA(K) - THETA(MM)
SUMP = SUMP + V(MM) * (YR(K,MM) * COS(DEL) +
YI(K,MM) * SIN(DEL))
SUMQ = SUMQ + V(MM) * (YR(K,MM) * SIN(DEL) -
YI(K,MM) * COS(DEL))
181 END DO
PB(K) = V(K) * SUMP
QB(K) = V(K) * SUMQ
PERP = PERP + PB(K)
PERQ = PERQ + QB(K)

```

```

PG2(K) = (PB(K) + PC2(K)) * BASE
QG2(K) = (QB(K) + QC2(K)) * BASE
IF(GEN .LT. NMGEN)THEN
IF(T1(K) == 0.0)THEN
IF(QG2(K).GT. QMA2(K))THEN
QG2(K) = QMA2(K)
QG2(K)=QG2(K)/BASE
QB(K)=QG2(K)-QC2(K)
V(K)=QB(K)/SUMQ
QG2(K)=QG2(K)*BASE
END IF
IF(QG2(K) .LT. QMI2(K))THEN
QG2(K) = QMI2(K)
QG2(K)=QG2(K)/BASE
QB(K)=QG2(K)-QC2(K)
V(K)=QB(K)/SUMQ
QG2(K)=QG2(K)*BASE
END IF
END IF
END IF
PC2(K) = PC2(K) * BASE
QC2(K) = QC2(K) * BASE
END DO
PERP = PERP * BASE
PERQ = PERQ * BASE
DO N = 1,NBFICT
THEG(N) = THETA(N) * 57.29578
END DO

IF(GEN .LT. NMGEN)THEN
L = 0
DO K=1,NBFICT
IF(T1(K) == 0.0)THEN
L = L + 1
VG2(L) = V(K)
END IF
END DO
END IF
! FUNCIÓN DE HABILIDAD!!!!!!!!!!!!!!!
AUX5=0.0
DO N=1,NBFICT
IF(T1(N) == 0.0)THEN
AUX5=AUX5+(0.3*((V(N)-1.0)**2))
ELSE
AUX5=AUX5+((V(N)-1.0)**2)
END IF
END DO
!SOLO PARA LA RED DE 28 NODOS!!!!!!!
DO N=1,NBFICT
IF(T1(N) == 0.0)THEN
AUX5=AUX5+(0.3*((V(N)-0.985)**2))
ELSE
AUX5=AUX5+((V(N)-0.992)**2)
END IF
END DO
FF=ABS(2.0/AUX5)
FF=FF**2
IF(GEN .LT. NMGEN)THEN
IF(FF .LT. 1000.0)THEN
FF = 0.0
END IF
END IF
! Flujo en las lineas
DO N = 1, NLFICT
K = NID(N,1)
MM = NID(N,2)
DEL = THETA(K) - THETA(MM)
A = V(K) * V(K)
B = V(K) * V(MM)
C = V(MM) * V(MM)
D = YI(K,MM) - YDI(N)
E = YR(K,MM) * COS(DEL)
F = YI(K,MM) * SIN(DEL)
G = YI(K,MM) * COS(DEL)
H = YR(K,MM) * SIN(DEL)
PS(N) = ( B * (E + F) - A * YR(K,MM))* BASE
PE = ( B * (E - F) - C * YR(K,MM))* BASE
QS = (A * D - B * (G - H)) * BASE
QE = (C * D - B * (G + H)) * BASE
END DO
1002 RETURN
END

!*****
SUBROUTINE JACOB
! INTEGER MN,NBFICT,NGFICT,N,J,K,LL,MM,ITER
REAL
TOL,VKM,DEL,P1,Q1,VMK,SUMP,DVMAX,DES,V,
DIMENSION
AJ(80,80),DPQ(60),THETA(60),V(60),T1(30),Q(60)
DIMENSION YR(60,60),YI(60,60),P(60)
ITER = 0
MN = 2 * NBFICT - NGFICT - 1
200 DO N = 1, MN
DO J = 1, MN
AJ(N,J) = 0.0
END DO
END DO
N = 1
DO K = 2, NBFICT
VKM = V(1) * V(K)
DEL = THETA(K)
P1 = VKM * (YR(K,1) * COS(DEL) + YI(K,1) * SIN(DEL))
Q1 = VKM * (YR(K,1) * SIN(DEL) - YI(K,1) * COS(DEL))
IF(T1(K) == 0.0)GOTO 225
J = N + 1
AJ(N,N) = -Q1
AJ(J,N) = P1
LL = 0
DO MM = 2, NBFICT
LL = LL + 1
IF(YI(K,MM).EQ.0.0)GOTO 222
IF(MM.EQ.K)GOTO 223
VKM = V(K) * V(MM)
DEL = THETA(K) - THETA(MM)
AJ(N,LL) = VKM * (YR(K,MM) * SIN(DEL) - YI(K,MM) *
COS(DEL))
AJ(J,LL) = -VKM * (YR(K,MM) * COS(DEL) + YI(K,MM) *
SIN(DEL))
AJ(N,N) = AJ(N,N) - AJ(N,LL)
AJ(J,N) = AJ(J,N) - AJ(J,LL)
IF(T1(MM) == 0.0)GOTO 132
LL = LL + 1
L1 = LL - 1
AJ(N,LL) = -AJ(J,L1) / V(MM)
AJ(J,LL) = AJ(N,L1) / V(MM)
GOTO 132
222 IF(T1(MM) == 0.0)GOTO 132
223 LL = LL + 1
132 END DO
VV = V(K)
AJ(N,J) = 2.0 * YR(K,K) * VV + AJ(J,N) / VV
AJ(J,J) = -2.0 * YI(K,K) * VV - AJ(N,N) / VV
DPQ(N) = P(K) - VV * VV * YR(K,K) - AJ(J,N)
DPQ(J) = Q(K) + VV * VV * YI(K,K) + AJ(N,N)
N = N + 2
GOTO 131
225 AJ(N,N) = -Q1
SUMP = 0.0
LL = 0

```



```

DO MM = 2, NBFICT
LL = LL + 1
IF(YI(K,MM).EQ.0.0)GOTO 226
IF(MM.EQ.K)GOTO 128
VKM = V(K) * V(MM)
VMK = V(K)
DEL = THETA(K) - THETA(MM)
AJ(N,LL) = VKM * (YR(K,MM) * SIN(DEL) - YI(K,MM) *
COS(DEL))
AJ(N,N) = AJ(N,N) - AJ(N,LL)
SUMP = SUMP + V(MM) * (YR(K,MM) * COS(DEL) +
YI(K,MM) * SIN(DEL))
IF(T1(MM) == 0.0)GOTO 128
LL = LL + 1
AJ(N,LL) = VMK * (YR(K,MM) * COS(DEL) + YI(K,MM) *
SIN(DEL))
GOTO 128
226 IF(T1(MM) == 0.0)GOTO 128
LL = LL + 1
128 END DO
DPQ(N) = P(K) - V(K) * (YR(K,K) * V(K) + SUMP) - P1
N = N + 1
131 END DO
DVMAX = 0.0
DO N = 1, MN
DESV = ABS(DPQ(N))
IF(DESV.GT.DVMAX)DVMAX=DESV
END DO
IF(DVMAX.LE.TOL)GOTO 1000
CALL GAUSS(MN,AJ,DPQ)
MM = 1
LL = 0
DO N = 2, NBFICT
MM = MM + 1
LL = LL + 1
IF(T1(N) == 0.0)THEN
THETA(MM) = THETA(MM) + DPQ(LL)
ELSE
THETA(MM) = THETA(MM) + DPQ(LL)
LL = LL + 1
V(MM) = V(MM) + DPQ(LL)
END IF
END DO
ITER = ITER + 1
IF(ITER.GT.8)GOTO 233
GOTO 200
233 NYJ = 3.0
1000 RETURN
END

!*****
SUBROUTINE GAUSS(MN,AJ,DPQ)
!*****
DIMENSION AJ(80,80),DPQ(60)
INTEGER MN,KF,KD,K
KF = MN - 1
DO N = 1, KF
KD = N + 1
IF(AJ(N,N).EQ.0.0)THEN
AJ(N,N) = 1.0
ELSE
DPQ(N) = DPQ(N) / AJ(N,N)
END IF
DO J = KD, MN
IF(AJ(N,N).EQ.0.0)THEN
AJ(N,J) = 1.0
ELSE
AJ(N,J) = AJ(N,J) / AJ(N,N)
END IF
END DO

```

```

DO K = KD, MN
IF(AJ(K,N).EQ.0.0)GOTO 100
DO J = KD, MN
AJ(K,J) = AJ(K,J) - AJ(K,N) * AJ(N,J)
END DO
DPQ(K) = DPQ(K) - AJ(K,N) * DPQ(N)
100 END DO
END DO
IF(AJ(MN,MN) == 0.0)THEN
AJ(MN,MN) = 100.0
END IF
DPQ(MN) = DPQ(MN) / AJ(MN,MN)
N = MN - 1
140 K = N + 1
DO J = K, MN
DPQ(N) = DPQ(N) - AJ(N,J) * DPQ(J)
END DO
N = N - 1
IF(N.NE.0)GOTO 140
RETURN
END

!*****
SUBROUTINE
CONV(LAL,NB,NL,NAD,KINT,PLIM,BETA,RF,XF,YDF,N
ID,RFI,XFI,YDI,PLI2)
!*****
DIMENSION NAD(60,2),NED(60,2),NID(60,2),KINT(60)
DIMENSION
RFI(60),XFI(60),YDI(60),RF(60),XF(60),YDF(60)
DIMENSION BETA(60),PLIM(60),PLI2(60)
INTEGER NED,NID
REAL PLI2,RFI,XFI,YDI
NED = 0
DO K=1,NB
DO M=1,NL
DO J=1,2
IF(NAD(M,J).EQ.K)THEN
NED(M,J) = KINT(K)
END IF
END DO
END DO
END DO
L = 0
DO M=1,NL
IF(NED(M,1).NEQV.0)THEN
L = L + 1
NID(L,1) = NED(M,1)
NID(L,2) = NED(M,2)
RFI(L) = RF(M)
XFI(L) = XF(M)
YDI(L) = YDF(M)
END IF
END DO
L = 0
DO I=1,NL
CHI = I
IF(BETA(I) == 1 .OR. CHI == LAL)THEN
L = L + 1
PLI2(L) = PLIM(I)
END IF
END DO
RETURN
END

!*****
SUBROUTINE FUEN
!*****
DIMENSION T1(30),PG2(60),QG2(60),ALFA(60),KINT(60)

```

```

DIMENSION IE(10),IS(10),TAP(10),IN(10),REA(10)
DIMENSION IE1(10),IS1(10),TAP1(10),IN1(10),REA1(10)
INTEGER AUX5,NGFICT,NTA2,NDE2,IE1,IS1,IN1
REAL T1,TAP1,REA1
T1(1) = 0.0
DO M=2,NBFICT
IF(PG2(M).EQ.0.0)THEN
IF(QG2(M).EQ.0.0)THEN
T1(M) = 1.0
ELSE
T1(M) = 0.0
END IF
ELSE
T1(M) = 0.0
END IF
END DO
AUX5 = 0
DO M=1,NBFICT
IF(T1(M).EQ.0.0)THEN
AUX5 = AUX5 + 1
END IF
END DO
NGFICT = AUX5
NTA2 = 0
IE1 = 0
IS1 = 0
TAP1 = 0
L = 0
IF(NTAP.NEQV.0)THEN
DO N=1,NTAP
MIN1 = IE(N)
MIN2 = IS(N)
IF(ALFA(MIN1) == 1 .AND. ALFA(MIN2) == 1)THEN
NTA2=NTA2+1
NO1 = KINT(MIN1)
NO2 = KINT(MIN2)
L=L+1
IE1(L) = NO1
IS1(L) = NO2
TAP1(L) = TAP(N)
END IF
END DO
END IF
NDE2 = 0
IN1 = 0
REA1 = 0
L = 0
IF(NDEV.NEQV.0)THEN
DO N=1,NDEV
MIN1 = IN(N)
IF(ALFA(MIN1) == 1)THEN
NDE2=NDE2+1
MIN2=KINT(MIN1)
L=L+1
IN1(L) = MIN2
REA1(L) = REA(N)
END IF
END DO
END IF
RETURN
END

!*****
SUBROUTINE
DPA(NBFICT,NLFICT,NID,RFI,XFI,YDI,PMA2,PC3,PLI2,PEP,PS,T1,XSOL)
!*****
USE MSIMSL
DIMENSION
NID(60,2),RFI(60),XFI(60),YDI(60),PMA2(NBFICT),PC3(NBFICT),PLI2(60),PS(60)
DIMENSION
G(NBFICT,NBFICT),AL(60,60),T1(30),A(NLFICT+1,NBFICT)
DIMENSION
IRTYPE(NLFICT+1),BL(NLFICT+1),BU(NLFICT+1),C(NBFICT),DSOL(NLFICT+1)
DIMENSION
XSOL(NBFICT),XLB(NBFICT),XUB(NBFICT)
DOUBLE PRECISION
B1(NBFICT,NBFICT),BINV(NBFICT,NBFICT)
REAL A,BL,BU,C,DSOL,XSOL,XLB,XUB,CAVS,OBJ
INTEGER IRTYPE,LDA
DO N=1,NBFICT
DO J=1,NBFICT
G(N,J)=0.0
END DO
END DO
XSOL = 0.0
DO N=1,NLFICT
ZD=RFI(N)*RFI(N)+XFI(N)*XFI(N)
BIL=-XFI(N)/ZD
L=NID(N,1)
M=NID(N,2)
G(L,L)=G(L,L)+YDI(N)+BIL
G(M,M)=G(M,M)+YDI(N)+BIL
G(L,M)=G(L,M)-BIL
G(M,L)=G(L,M)
END DO
DO N=1,NBFICT
DO J=1,NBFICT
B1(N,J)=-G(N,J)
!La Matriz BPrima tiene como elementos
END DO
!la negativa de la matriz de admitancias de bus
END DO
DO N=1,NLFICT
L=NID(N,1)
M=NID(N,2)
B1(L,L)=B1(L,L)+YDI(N)
B1(M,M)=B1(M,M)+YDI(N)
END DO
CALL BBINV(B1,NBFICT,BINV,POR)
IF(POR == 2.5)GOTO 967
DO N=1,NLFICT
L = NID(N,1)
M = NID(N,2)
DO K=2,NBFICT
IF(T1(K) /= 0.0)THEN
AL(N,K) = 0.001
ELSE
IF((BINV(L,K)-BINV(M,K)) .GT. 1.0)THEN
BINV(L,K) = 0.3
BINV(M,K) = 0.0
END IF
IF((BINV(L,K)-BINV(M,K)) .LT. -1.0)THEN
BINV(L,K) = 0.0
BINV(M,K) = 0.3
END IF

```

```

AL(N,K) = (BINV(L,K) - BINV(M,K)) / XFI(N)
END IF
END DO
END DO
DO N=1,NLFICT
AL(N,1) = 1.0
END DO
LDA=NLFICT+1
A = 0.0
DO K=1,NBFICT
XLB(K) = 0.0
IF(T1(K) .EQ. 0.0)THEN
XUB(K) = PMA2(K)
C(K) = 0.005
ELSE
XUB(K) = PC3(K)
C(K) = 1.0
END IF
END DO
BL = 0.0
DO K=1,NBFICT
IF(T1(K) .EQ. 0.0)THEN
DO N=1,NLFICT
A(N,K) = AL(N,K)
END DO
END IF
A(NLFICT+1,K) = 1.0
END DO
DO N=1,NLFICT
BU(N)=PLI2(N)-PS(N)
IRTYPE(N) = 1
END DO
CAVS = 0.0
DO K=1,NBFICT
CAVS = CAVS + PC3(K)
END DO
BU(NLFICT+1) = CAVS + PERP
BL(NLFICT+1) = BU(NLFICT+1)
IRTYPE(NLFICT+1) = 0
CALL SSCAL ( NBFICT, 1.0, C, 1)
CALL DLPRS
(NLFICT+1,NBFICT,A,LDA,BL,BU,C,IRTYPE,XLB,XUB,
OBJ,XSOL,DSOL)
CALL SSCAL ( NLFICT+1, 1.0, DSOL, 1)
967 RETURN
END

!*****
SUBROUTINE BBINV(A,NB,AINV,POR)
!*****
REAL DET1,POR
INTEGER IPASS
DOUBLE PRECISION AINV(NB,NB),A(NB,NB)
POR = 0.0
DET1 = 1.0
DO I=2,NB
DO J=2,NB
IF(I .EQ. J)THEN
AINV(I,I) = 1.0
ELSE
AINV(I,J) = 0.0
END IF
END DO
END DO
DO IPASS=2,NB
IMX = IPASS
DO IROW=IPASS,NB
IF(ABS(A(IROW,IPASS)) .GT. ABS(A(IMX,IPASS)))THEN
IMX = IROW
END IF
END DO
IF(IMX .NE. IPASS)THEN
DO ICOL=2,NB
TEMP=AINV(IPASS,ICOL)
AINV(IPASS,ICOL) = AINV(IMX,ICOL)
AINV(IMX,ICOL) = TEMP
IF(ICOL .GE. IPASS)THEN
TEMP = A(IPASS,ICOL)
A(IPASS,ICOL) = A(IMX,ICOL)
A(IMX,ICOL) = TEMP
END IF
END DO
END IF
PIVOT = A(IPASS,IPASS)
IF(IPASS == 20)THEN
DET1 = DET1 / 1000000000000000.0
END IF
DET1 = DET1 * PIVOT
IF(DET1 .EQ. 0.0)THEN
POR = 2.5
GOTO 697
END IF
DO ICOL=2,NB
AINV(IPASS,ICOL) = AINV(IPASS,ICOL)/PIVOT
IF(ICOL .GE. IPASS)THEN
A(IPASS,ICOL) = A(IPASS,ICOL)/PIVOT
END IF
END DO
DO IROW=2,NB
IF(IROW .NE. IPASS)THEN
FACTOR = A(IROW,IPASS)
END IF
DO ICOL=2,NB
IF(IROW .NE. IPASS)THEN
AINV(IROW,ICOL) = AINV(IROW,ICOL) -
FACTOR*AINV(IPASS,ICOL)
A(IROW,ICOL) = A(IROW,ICOL) -
FACTOR*A(IPASS,ICOL)
END IF
END DO
END DO
END DO
697 RETURN
END

```

E.3 Descripción del Archivo de Salida

Sólo se tiene un archivo de salida el cual se utiliza para mostrar los datos deseados. Se incluye el número de la línea seleccionada para restaurarse, la magnitud de los voltajes en los nodos de generación, escogidos por el algoritmo genético para optimizar la función objetivo. Finalmente se incluye la potencia activa suministrada por los nodos de generación, y en caso de ser necesario, la cantidad de carga tirada.

Para determinar la potencia reactiva en nodos de generación, y el flujo en las líneas de transmisión, se hace un programa de flujos de potencia por separado, que incluya la evaluación del despacho de potencia activa, con la magnitud de voltajes de generación proporcionado por el algoritmo genético.