UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo previo a la obtención del Título de:

INGENIERO ELÉCTRICO.

TEMA:

ALGORITMO PARA OBTENER LA UBICACIÓN OPTIMA DE COMPENSADORES FLEXIBLES DE CORRIENTE ALTERNA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

AUTORES:

MARTÍN ALBERTO CÓRDOVA SUÁREZ.
FABIÁN ANDRÉS ARÉVALO ABAD.

DIRECTOR:

ING. FLAVIO A. QUIZHPI PALOMEQUE.

Cuenca, Enero de 2014

CERTIFICACIÓN

En facultad de Director del trabajo de Tesis “ALGORITMO PARA LA UBICACIÓN DE COMPENSADORES FLEXIBLES DE CORRIENTE ALTERNA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA" desarrollado por: Martín Alberto Córdova Suárez y Fabián Arévalo Abad, certifico la aprobación del presente trabajo de tesis, una vez ejecutado la supervisión y revisión de su contenido.

Cuenca, Enero 2014

ING. FLAVIO A. QUIZHPI PALOMEQUE

RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA

Los autores del trabajo de tesis “ALGORITMO PARA LA UBICACIÓN DE COMPENSADORES FLEXIBLES DE CORRIENTE ALTERNA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CAPACIDAD DE TRANSMISIÓN DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA" Martín Alberto Córdova Suárez y Fabián Arévalo Abad, en virtud de los fundamentos teóricos y científicos y sus resultados, declaran de exclusiva responsabilidad y otorgan a la Universidad Politécnica Salesiana la libertad de divulgación de este documento únicamente para propósitos académicos o investigativos.

Cuenca, Enero 2014

MARTÍN ALBERTO CÓRDOVA SUÁREZ

FABIÁN ANDRÉS ARÉVALO ABAD

DEDICATORIA

Martín Córdova

A Dios y San Martín de Porres por darme un modelo de vida.

A mis padres por apoyarme día a día no solo en mi formación académica sino también en mi formación como persona.

A mi pareja, que ha sido un pilar de apoyo que me impulsaba a continuar hasta culminar este proyecto y etapa académica en mi vida.

Fabián Arévalo

A Dios por haberme guiado por el camino correcto para alcanzar éste objetivo tan importante para mi vida, porque siempre ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar.

A mis padres y hermanos, quienes siempre me han estado pendientes de mi bienestar y que han depositando su entera confianza para este reto, siendo mi pilar fundamental de apoyo en todo momento, pero de manera especial a mi madre Isabel Abad, a quien, con mucho amor y cariño le dedico todo mi esfuerzo y trabajo

A mí siempre recordado tío Cnel. [B] Oswaldo Abad, que siempre está presente en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Martín Córdova

A Dios por permitirme alcanzar este logro en mi vida con salud y bienestar.

A mis padres, hermana y cuñado por el apoyo e interés en mi formación académica y las palabras de aliento que me impulsaba a continuar con mayor ahínco.

A mi pareja por su comprensión y palabras de apoyo.

Al Ing. Flavio Quizhpi que como Director de Tesis y amigo que con convicción y paciencia nos alentó a la realización de este proyecto.

Fabián Arévalo

A Dios y la Santísima Virgen del Roció por no abandonarme nunca y siempre ser mi guía continua.

A todos mis familiares y amigos que siempre me motivaron con palabras de aliento, para continuar con este reto muy importante para mi vida y no darme por vencido.

De manera muy especial al Ing. Flavio Quizhpi, Director de Tesis y amigo, quien con mucha paciencia y responsabilidad impartió sus conocimientos para llevar a cabo este proyecto.

A la Ing. Patricia Gavela funcionaria de la Corporación CENACE (Centro Nacional de Control de Energía), quien con su ayuda desinteresada, nos brindó información relevante, próxima, pero muy cercana a la realidad de este proyecto.

Índice general

1. FLUJOS DE POTENCIA **1**

1.1. Sistema Nacional de Transmisión Ecuatoriano . . . 1
1.1.1. Componentes de SNT . . . 2
1.1.2. Criterios de Operación del SNT . . . 5
1.1.3. Requerimiento de Carga . . . 6
1.1.4. Capacidad de Generación . . . 9
1.1.5. Costo de Generación . . . 10
1.2. Problema de Flujo de Potencia . . . 10
1.2.1. Variables del Problema . . . 11
1.2.2. Clasificación de Barras . . . 12
1.2.3. Ecuaciones de Potencia . . . 14
1.2.4. Método Iterativo para Cálculos de Flujos de Potencia . . . 17
1.3. Dispositivos FACTS . . . 23
1.3.1. Compensador Serie Controlado por Tiristores (TCSC) . . . 24
1.3.2. Compensador Estático de Voltaje (SVC) . . . 27
1.3.3. Controlador de Flujo de Potencia Unificado (UPFC) . . . 30
1.3.3.1. Ecuaciones de potencia para UPFC . . . 31
1.3.3.2. Matriz de Jacobiano para UPFC . . . 35
1.4. Restricciones en Flujo de Potencia . . . 37
1.4.1. Despacho Económico . . . 39
1.4.1.1. Metodología para Asignación de Unidades por el CENACE . . . 40

2. ALGORITMO GENÉTICO **44**

2.1. Codificación del Problema . . . 44
2.1.1. Tipos de Compensadores. . . . 45
2.1.2. Ubicación de los Compensadores. . . . 45
2.1.3. Número de Variables por Compensador . . . 47
2.1.4. Magnitudes de Compensadores . . . 47
2.2. Función de Bondad . . . 50
2.2.1. Evaluación de Bondad . . . 51
2.3. Estrategia Evolutiva . . . 52
2.4. Operadores de Selección . . . 54
2.4.1. Selección por Ruleta Determinista . . . 54
2.4.2. Selección por Torneo Determinista . . . 55
2.4.3. Selección por Torneo Aleatorio . . . 56
2.5. Operadores para Generación de Descendencia . . . 58
2.5.1. Cruce de Múltiple Punto . . . 58
2.5.2. Cruce Uniforme . . . 60
2.5.3. Cruce de Promedios Reales . . . 61
2.5.4. Operador de Mutación . . . 63
2.6. Algoritmo Genético Diferencial . . . 65
2.7. Criterio para Maximizar Carga . . . 67

3. INTERFAZ GRÁFICA GUIDE MAT-LAB 68
3.1. Funciones . . . 72
3.1.1. Flujo de potencia simple . . . 72
3.1.2. Flujo de potencia con restricciones . . . 73
3.1.3. Algoritmo Genético para Ubicación de FACTS . . . 75
3.1.4. Algoritmo para Determinar Máxima Capacidad de Carga . . . 76
3.2. Reportes . . . 77

4. SIMULACIONES 83
4.1. Flujo de potencia Simple . . . 85
4.2. Flujo de potencia con restricciones . . . 86
4.3. Algoritmo Genético para Ubicación de FACTS . . . 88
4.3.1. Simulaciones con sistema incorporando un único FACTS . . . 88
4.3.2. Simulaciones con sistema incorporando dos FACTS . . . 93
4.3.3. Simulaciones con sistema incorporando más de dos FACTS . . . 95
4.4. Algoritmo genético para determinar máxima capacidad de carga . . . 97
4.4.1. Máxima capacidad del sistema sin FACTS . . . 98
4.4.2. Máxima capacidad del sistema con FACTS . . . 99
4.4.2.1. Pruebas sobre sistema con distribución de cargas según participación anual de empresas distribuidoras. . . . 100
4.4.2.2. Pruebas sobre sistema con distribución de cargas, ajustado a la lectura del sistema SCADA del portal electrónico de Transelectric . . . 103
4.4.2.3. Pruebas sobre sistema con distribución de cargas ajustado y cambio de barras PV a PQ cuando la capacidad de generación es menor a la carga en el nodo. . . . 105

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 107

Índice de figuras

1.1. Esquema del Sistema de Transmisión a 230kV[3] 3
1.2. Promedios Mensuales de Pérdidas en Transmisión[4] 7
1.3. Participación de Empresas en Demanda de Energía (%)[4] 7
1.4. SEP Simple, con Circuito Equivalente de la Línea de Transmisión Media[5] 14
1.5. Modelamiento de un SEP Simple[5] 18
1.6. Diagrama de una Línea de Transmisión Compensada con un TCSC[20] 24
1.7. Modelo de Inyección de Potencia del TCSC[20] 25
1.8. a)Topología TCR b)Topología TSC[20] 28
1.9. Diagrama de Línea de Transmisión Compensada con un SVC[20] 28
1.10. Modelo de Inyección de Potencia del VSC[20] 28
1.11. Diagrama de Línea de Transmisión Compensada con un UPFC [1] 30
1.12. Modelo de Inyección de Potencia del UPFC[10] 31
1.13. Diagrama Vectorial de Voltajes para Compensador UPFC.[14] 34

2.1. Ejemplo de un Cromosoma Codificado para Operadores Genéticos 47
2.2. Ejemplo de un Cromosoma Codificado para Flujo de Potencia 48
2.3. Ilustración de la Operación de Selección por Ruleta 54
2.4. a).Ejemplo Cruce de 1 Punto b).Ejemplo Cruce de 2 Puntos 58
2.5. Ejemplo de una Operación de Cruce Uniforme 60
2.6. Ejemplo de Una Operación de Cruce por Promedios Aritméticos 62
2.7. Ejemplo de una Operación de Cruce por Promedios Geométricos 62
2.8. Ejemplo de una Operación de Mutación 64
2.9. Esquema Genérico de un Algoritmo Diferencial **[7]** 65

3.1. Pantalla Inicial 68
3.2. Detalle de Botones de Pantalla de inicio 69
3.3. Pantalla de Selección de Función y Configuración 69
3.4. Detalle de sección 1 de Pantalla de Selección y Configuración 70
3.5. Detalle de sección 2 de Pantalla de Selección y Configuración 71
3.6. Detalle de sección 3 de Pantalla de Selección y Configuración 71

Índice de tablas

1.1. Características Eléctricas y Físicas de Ramales 4
1.2. Compensadores Sobre el SNT 5
1.3. Límites de Operación en Perfiles de Voltajes [2] 5
1.4. Repartición de Porcentaje, Potencia y Barras para Empresas Distribuidoras 8
1.5. Distribución de Carga por Barras 9
1.6. Capacidades de Generación por Barras 9
1.7. Clasificación de las Barras[12] 13

4.1. Matriz de Barras 84
4.2. Matriz de Generadores 84
4.3. Matriz de Ramales 85
4.4. Resultados para ubicación de un FACTS, configuración por defecto 88
4.5. Resultados para ubicación de un FACTS con cambios en población 89
4.6. Resultados para ubicación de un FACTS con cambios en operadores de cruce 90
4.7. Resultados para ubicación de un FACTS con cambios en operadores de selección . . 91
4.8. Resultados para ubicación de un FACTS con cambios en estrategia de evolución . . 91
4.9. Resultados para ubicación de un FACTS con cambios en porcentaje de mutación diferencial 92
4.10. Resultados para ubicación de dos FACTS con cambios en operador de selección . . 93
4.11. Resultados para ubicación de dos FACTS con cambios en operador de cruce 94
4.12. Comparación de valores de bondad al distribuir la capacidad de un FACT en dos 95
4.13. Comparación de valores de bondad al incluir más de un FACTS de mismo tipo 96
4.14. Resultados para ubicación de dos SVC, dos TCSC y tres UPFC FACTS 96
4.15. Resultados para ubicación de un SVC, un TCSC y dos UPFC FACTS 97
4.16. Resultados para ubicación de un SVC, un TCSC y dos UPFC FACTS 97
4.17. Máxima capacidad de Carga con uno y dos SVC 100
4.18. Máxima capacidad de Carga con uno y dos TCSC 100
4.19. Máxima capacidad de Carga con uno y dos UPFC 101
4.20. Máxima capacidad de Carga Combinando TCSC y SVC 102
4.21. Máxima capacidad de Carga Combinando TCSC y UPFC 102
4.22. Máxima capacidad de Carga Combinando TCSC, SVC y UPFC 103
4.23. Resumen de Máxima Capacidad de Carga en Combinaciones de FACTS para Sistema con Distribución de Cargas Ajustada 104
4.24. Resumen de Máxima Capacidad de Carga en Combinaciones de FACTS para Sistema con Distribución de Cargas Ajustada y Cambios en Tipos de Barras 106

Índice de algoritmos

1.1. Función potBuses . . . 12
1.2. Función Ybus . . . 16
1.3. Función evalPot . . . 17
1.4. Función MaJacob . . . 21
1.5. Función NewtonCompleto . . . 22
1.6. Función modTCSC . . . 26
1.7. Función modSVC . . . 29
1.8. Función modUPFC . . . 36
1.9. Función LimitesGenerador . . . 38
1.10. Función LímitesReactivos . . . 39
1.11. Función DespachoLineal . . . 42
2.1. Función NumFactsUbicacion . . . 46
2.2. Función CromosomaPoblacionInicial . . . 49
2.3. Función ParametrizarGen3 . . . 50
2.4. Función EvalBondad . . . 52
2.5. Función ReducirPoblacion . . . 53
2.6. Función SelecRuleta . . . 55
2.7. Función SelecTorneoDet . . . 56
2.8. Función SelecTorneoAlea . . . 57
2.9. Función CruceMúltipunto . . . 59
2.10. Función CruceUniforme . . . 61
2.11. Función CruceMediasReales . . . 63
2.12. Función MutacionSimple . . . 64
2.13. Función MutacionDiferencial . . . 66
3.1. Flujo de Potencia Simple . . . 73
3.2. Flujo de Potencia con Restricciones . . . 74
3.3. Algoritmo Genético para Posición y Magnitud de FACTS . . . 75
3.4. Algoritmo Genético para Determinar Máximo Nivel de Carga del Sistema . . . 76

Nomenclatura

A_i	Alelos de padres para cruce.
B_{ij}	Suceptancia del ramal entre barras ”i” y ”j”.
B_{sh}	Suceptancia paralelo de una línea de Transmisión.
B_{SVC}	Suceptancia compensador SVC introducida a la matriz de admitancias.
$conj$	Operación para conjugada de un número.
cos	Función trigonométrica coseno.
$FACTS$	Sistema Flexible de Transmisión en Corriente Alterna.
$F_i(P_{gi})$	Es la función de costo de cada generador .
$grad$	grados.
G_{ij}	Conductancia del ramal entre barras ”i” y ”j”.
I_a	Corriente en nodo con fuente de corriente del compensador UPFC.
I_b	Corriente en nodo de complementario del compensador UPFC.
I_{SH}	Corriente paralelo de la fuente de corriente de compensador UPFC.
ite	Iteración.
I_{SVC}	Corriente de compensador SVC.
J	Matriz Jacobiana.
j	Operador imaginario.
J_{11}	Primera submatriz jacobiana.
J_{12}	Segunda submatriz jacobiana.
J_{21}	Tercera submatriz jacobiana.
J_{22}	Cuarta submatriz jacobiana.
NG	Es el número de generadores.
P	Potencia Activa.
PD_n	Potencia activa demandada en barra ”n”.
PG_n	Potencia activa generada en barra ”n”.
$p_{n(esp)}$	Potencia activa de barra ”n” esperada.

P_{SVC}	Potencia activa del compensador SVC.
P_{ijTCSC}	Potencia activa del ramal entre barras "i" y "j" con TCSC incluido.
Q	Potencia Reactiva.
QD_n	Potencia reactiva demandada en barra "n".
QG_n	Potencia reactiva generada en barra "n".
$Q_{n(esp)}$	Potencia reactiva de barra "n" esperada.
Q_{SVC}	Potencia reactiva del compensador SVC.
Q_{ijTCSC}	Potencia reactiva del ramal entre barras "i" y "j" con TCSC incluido.
r_{ij}	Resistencia del ramal entre barras "i" y "j" .
S	Potencia Aparente.
sen	Función trigonométrica seno.
S_{dem}	Potencia aparente neta demandada.
SD_n	Potencia aparente demandada en barra "n".
SEP	Sistema Eléctrico de Potencia.
S_{espn}	Potencia aparente esperada.
SG_n	Potencia aparente generada en barra "n"
S_{Gen}	Potencia aparente bornes de Generación.
S_L	Potencia aparente transmitida sobre los ramales.
SNT	Sistema Nacional de Transmisión.
S_{per}	Potencia aparente pérdida en transmisión.
S_{se}	Potencia serie de compensador UPFC.
S_{sh}	Potencia paralelo de compensador UPFC.
$STATCOM$	Compensador estático.
S_{UPFC}	Potencia del compensador UPFC.
SVC	Compensador Estático de Voltaje.
$TCSC$	Capacitor Serie Controlado por Tiristores.
TH_{SE}	Ángulo de voltaje serie de compensador UPFC.

$UPFC$	Controlador de Flujo de Potencia Unificado.
V	Voltios.
VAr	Voltamperios reactivos.
$\|V_i\|$	Módulo de voltaje en barra "i".
V_i	Voltaje en barra "i".
V_{SE}	Voltaje serie de compensador UPFC.
W	Vatios.
x_{ij}	Reactancia del ramal entre barras "i" y "j" .
X_L	Reactancia propia de la línea de Transmisión.
x_{TCSC}	Reactancia del compensador TCSC.
Y_{bus}	Matriz de admitancias.
$\|Y_{ij}\|$	Módulo de admitancia entre barras "i" y "j".
Y_{ij}	Admitancia entre barras "i" y "j".
y_{ij}	Ángulo de admitancia entre barras "i" y "j".
Y_{serie}	Admitancia serie de una línea de Transmisión.
Y_{shunt}	Admitancia propia de una línea de Transmisión.
Z_{ij}	Impedancia del ramal entre barras "i" y "j".
λ	Función de incremento de costo de generadores.
δ_i	Ángulo de voltaje en barra "i".
θ_i	Ángulo de voltaje en barra "i".
τ	Relación de conversión del transformador.
ΔY_{ij}	Diferencia de admitancia entre barras "i" y "j" introducida por el TCSC.

INTRODUCCIÓN

Por las características de la geografía ecuatoriana, el sistema eléctrico tiene sus centros de mayor generación distanciados de los puntos de mayor consumo, sumando a este hecho la presión de un constante aumento en la demanda de energía, provoca que bloques de potencia cada vez más grandes necesiten ser transmitidos a través de largas distancias desde los centros de generación, proyectos de mejora y expansión de la capacidad de generación y transmisión del sistema de eléctrico están a la orden del día y son motivo de interés para el futuro del sector eléctrico.

Los compensadores flexibles de corriente alterna ofrecen una alternativa para mejorar las condiciones en las que opera un sistema eléctrico de potencia. El presente proyecto se enfoca en el desarrollo de un algoritmo e interfaz gráfica para determinar si la ubicación optima de FACTS mejoraría la capacidad máxima de transmisión de un sistema eléctrico de potencia, para este propósito dos grupos de algoritmos son necesarios, el primero para la solución del problema de flujos de potencia y el segundo para determinar la ubicación optima de FACTS en el sistema de transmisión.

El problema de flujo de potencia es resuelto a través del método de solución iterativa de Newton Raphson, las restricciones de operación consideradas en este punto son los límites de generación y el costo a través de la asignación de unidades según una función de costo lineal.

El método elegido para determinar la ubicación óptima de los FACTS se basa en los algoritmos genéticos, que son un método heurístico inspirado en la evolución genética y la supervivencia del mejor individuo. El algoritmo genético empleado usa una codificación en números reales y una variedad de operadores programados que permiten, a través de las pruebas realizadas, determinar que combinación de operadores genéticos podría tener mejores resultados con la representación de un sistema de potencia en especial.

El algoritmo para determinar la máxima capacidad de carga hace uso del algoritmo genético para ubicación de FACTS, el mismo que a su vez para la evaluación del mejor individuo emplea la solución del problema de flujos de potencia.

Capítulo 1

FLUJOS DE POTENCIA

La importancia de los flujos de potencia radica en que permiten evaluar los parámetros más importantes de un sistema de potencia, de modo que los flujos de potencia en los ramales y pérdidas en potencia puedan ser conocidos como un parámetro cuantificable.

Los estudios de flujo de potencia permiten al operador del sistema simular el comportamiento de la energía eléctrica ante una variación de carga, para ello se suelen utilizar métodos de solución iterativa, que tienen como principal objetivo evaluar los voltajes en cada uno de los nodos del sistema. En medida de la complejidad del análisis del sistema o los objetivos a alcanzar con el estudio de flujos de potencia pueden aplicarse ciertas restricciones para reproducir características físicas o técnicas de los componentes del sistema eléctrico.

1.1. Sistema Nacional de Transmisión Ecuatoriano

La operación y mantenimiento del Sistema de Transmisión Ecuatoriano, está a cargo de la Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC EP, a través de la Unidad de Negocio TRANSELECTRIC[6].

El sector eléctrico Ecuatoriano afronta problemas comunes al campo de la producción y transmisión del energía eléctrica como es la variación e incremento constante en la demanda de energía, el sistema de transmisión nacional del Ecuador opera con tres niveles de tensión que dan una referencia para poder dividir al sistema entero, en tres de menor complejidad que conservan voltajes comunes.

Un cambio importante que ocurrió sobre el SNT es la interconexión con los países vecinos con fines de mejorar la satisfacción de la carga cuando la capacidad de generación no iguale a la demanda y se requiera de transacciones de energía o desde el punto de vista inverso en que dentro del Ecuador se disponga de capacidad suficiente para exportar energía.

Las restricciones operativas contempladas para las instalaciones del SNT o SNI están relacionadas con la demanda máxima de energía y son:

- Bajos perfiles de voltaje.
- Cargabilidad superior al 80 % en ciertos transformadores.

La situación actual del sistema de transmisión, durante los periodos de máxima demanda se encuentran operando al límite de los criterios de operación, calidad y confiabilidad, es por eso que se ha visto necesario el desarrollo y cumplimiento del Plan Maestro de Electrificación 2012 - 2021 que contempla asignación de recurso a puntos críticos del sistema de transmisión o la expansión de la capacidad de generación.

Un punto tratado en en el plan de electrificación no es solo desarrollar nuevos proyectos de generación para abastecer la demanda en crecimiento, sino además reforzar el equipamiento de transmisión con el objetivo de mejorar las condiciones de suministro de energía eléctrica a los centros de distribución cumpliendo los criterios de calidad, seguridad y confiabilidad establecidos en la normativa vigente[6].

1.1.1. Componentes de SNT

Subestaciones de Transformación

Las subestaciones de transformación enlazan los sistemas de 230/138/69 kV, la capacidad máxima instalada en los transformadores de la totalidad de las subestaciones del SNT es de 8.521 MVA, de los cuales 917 MVA corresponden a las reservas de los transformadores monofásicos [2, 6].

En este documento las barras de interés corresponden a las del sistema de 230 kV y el objetivo del estudio esta enfocado a las potencias sobre los ramales, por lo que los centros de transformación o conexión con los sistemas de menor voltaje a 138 y 69 kV no son considerados, sin embargo las subestaciones son utilizadas como nodos de conexión.

El Sistema de Transmisión Ecuatoriano a una tensión de 230kV cuenta con los nodos de conexión o subestaciones de Santo Domingo, Baba, Quevedo, Sam Gregorio, Pasculaes, Prosperina, Trinitaria, Esclusas, Milagro, Dos Cerritos, Zhoray, Sinincay, Molino, Riobamba, Totoras, Riobamba, Santa Rosa, Pomasqui. Las barras de Jamondino en el norte y Zorrito en el sur se omiten del esquema unifilar, por ser solo de conexión con otra barra al interior del sistema de transmisión con los países vecinos.

La figura 1.1 muestra como están relacionadas las conexiones entre las barras del sistema de transmisión a 230kV.

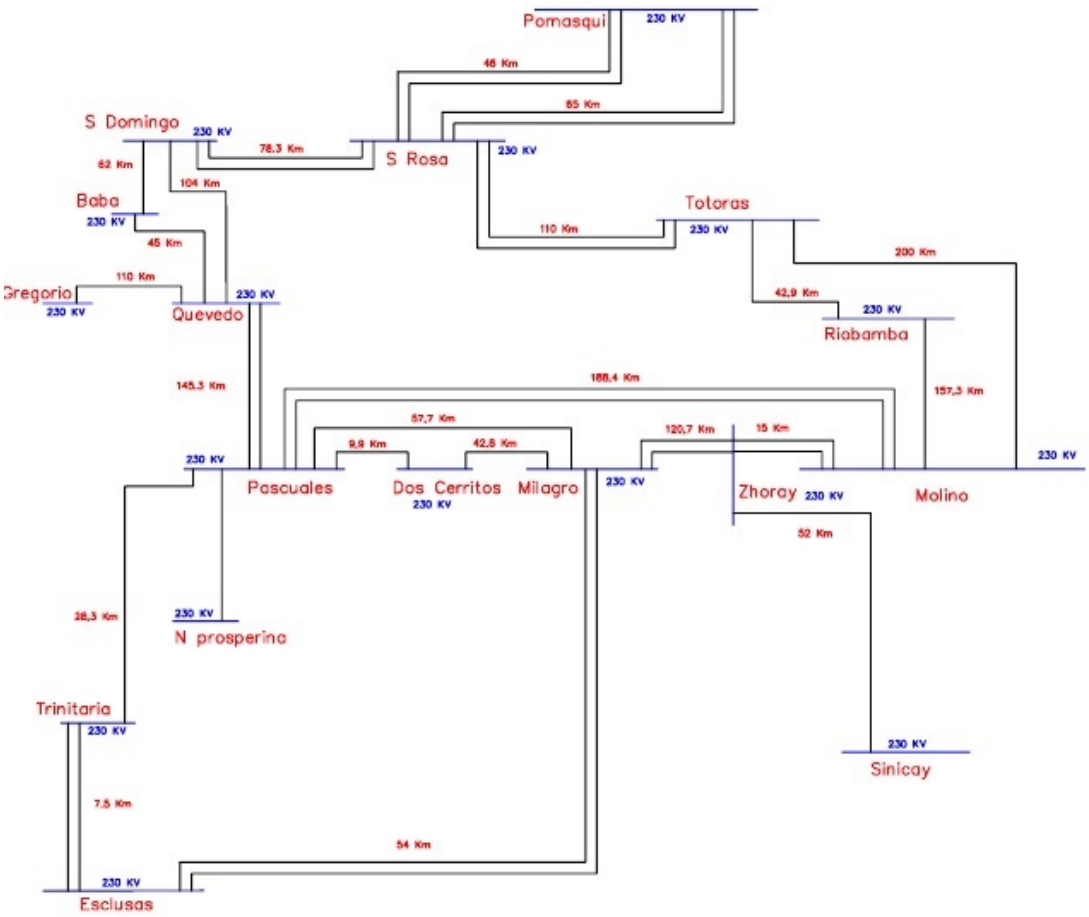


Figura 1.1: Esquema del Sistema de Transmisión a 230kV[3]

Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión son los elementos que conectan los nodos del sistema, al igual que las barras o subestaciones se encuentran claramente divididas en tres niveles de voltaje, siendo el mayor de 230 kV.

Las líneas de transmisión de 230kV por su nivel de voltaje tienen como principal objetivo el vincular los centros de abastecimiento de energía más grandes del país, con los centros de carga más importantes en Quito y Guayaquil, principalmente. Adicionalmente, también ayudan a equilibrar los flujos de potencia alrededor de otros centros de consumo importantes. Las líneas de transmisión de otros niveles de tensión a 138kV y 69kV se extienden de manera radial desde el anillo de 230 kV hasta los centros de menor carga.

La configuración de Barras en el SNI, según la Regulación No. CONELEC – 006/00, es la siguiente:

- Las Subestaciones de 230 kV tienen 2 barras, las mismas que están debidamente energizadas por medio del acoplador de 230 kV.

- Las Subestaciones de 138 kV y 69 kV, operan con la barra principal (BP) normalmente energizada y la barra de transferencia (BT) que esta desenergizada y opera para fines de transferencia.

Un resumen informativo de las características físicas más importantes de las líneas de transmisión a 230kV se muestra en la tabla 1.1, se considera un límite térmico del 100 % que será el nivel de carga máximo que corresponde a la corriente nominal que es capaz de transportar la línea, las suceptancias propias generadas por las líneas de transmisión son despreciadas por ser líneas relativamente cortas.

Ramales 230 Kv	Distancia kM	Límite Term. %	Resistencia R	Reactancia XL	Corriente Nominal kA
S.Domingo - Baba	62,2	100	3,675087	29,39995	0,88611
Baba - Quevedo	43,2	100	2,552472	20,41926	0,88611
S.Domingo - Quevedo	105	100	6,203925	49,63014	0,88611
Quevedo - S.Gregorio	113,56	100	6,709692	53,67617	0,88611
Quevedo - S.Gregorio	113,56	100	6,709692	53,67617	0,88611
Quevedo - Pasculaes	145,25	100	8,582096	68,65503	0,88611
Quevedo - Pasculaes	145,25	100	8,582096	68,65503	0,88611
Pascuales - Prosperina	11,72	100	0,6924762	5,539669	0,88611
Prosperina - Trinitaria	19,27	100	1,138568	9,108313	0,88611
Trinitaria - Esclusas	7,3	100	0,2899998	2,279994	1,081
Esclusas - Milagro	54	100	3,19269	25,5236	0,88611
Esclusas - Milagro	54	100	3,19269	25,5236	0,88611
Pascuales - Dos Cerritos	10	100	0,59085	4,72668	0,88611
Dos Cerritos - Milagro	42,8	100	2,528838	20,23019	0,88611
Pascuales - Milagro	52,7	100	3,11378	24,9096	0,88611
Milagro - Zhoray	120,74	100	7,00292	56,0958	1,081
Milagro - Zhoray	120,74	100	7,00292	56,0958	1,081
Zhoray - Sinincay	52	100	2,6	25,74	1,118
Zhoray - Molino	15	100	0,87	6,969	0,88611
Zhoray - Molino	15	100	0,87	6,969	0,88611
Pascuales - Molino	188,43	100	11,13339	89,06483	0,88611
Pascuales - Molino	188,43	100	11,13339	89,06483	0,88611
Molino - Riobamba	157,32	100	9,341646	77,19881	0,8585
Molino - Totoras	200,2	100	11,88786	98,24054	0,8585
Riobamba - Totoras	42,88	100	2,54621	21,04173	0,8585
Totoras - S.Rosa	110,09	100	6,537133	54,02248	0,8585
Totoras - S.Rosa	110,09	100	6,537133	54,02248	0,8585
S.Rosa - S.Domingo	78,34	100	4,651821	38,44238	0,8585
S.Rosa - S.Domingo	78,34	100	4,651821	38,44238	0,8585
S.Rosa - Pomasqui	45,9	100	2,514659	22,79633	0,8334
S.Rosa - Pomasqui	45,9	100	2,514659	22,79633	0,8334

Tabla 1.1: Características Eléctricas y Físicas de Ramales

Compensadores Instalados

Los compensadores considerados para esta sección son los bancos de condensadores, ubicados cerca de los centros de carga más grandes, entre ellos destacan los compensadores de las barras Pascuales y Santa Rosa que están vinculados con los centros de distribución de Quito y Guayaquil.

Barras	Capacidad MVAr	Caract.
S.Domingo	24	C
Quevedo	36	C
Prosperina	12	C
Pascuales	102	C
Dos Cerritos	24	C
Milagro	18	C
Loja	12	C
Esclusas	12	C
S.Rosa	81	C

Tabla 1.2: Compensadores Sobre el SNT

1.1.2. Criterios de Operación del SNT

Entre los criterios usados para la estabilidad de sistema de transmisión se encuentran los Perfiles de voltaje y cargabilidad de sus componentes.

Perfiles de Voltaje

De acuerdo a la regulación No. CONELEC 004/02 “Transacciones de potencia reactiva en el Mercado Eléctrico Mayorista”, las bandas de voltaje permitidas en las barras del SNT son las presentadas en la tabla 1.3.Para más información sobre perfiles de voltaje en condiciones de demanda máxima ver [2].

230 kV		138 kV		69 kV	
Lim. Min.	Lim. Max.	Lim. Min.	Lim. Max	Lim. Min.	Lim. Max.
0.95 p.u.	1.07 p.u.	0.93 p.u.	1.05 p.u	0.97 p.u.	1.03 p.u.
218.5 kV	246.1 kV	128.3 kV	144.9 kV	66.9 kV	71.1 kV

Tabla 1.3: Límites de Operación en Perfiles de Voltajes [2]

Cargabilidad de Componentes

La cargabilidad de las líneas, transformadores y compensadores está determinada por la utilización que se hace del elemento, con respecto a la capacidad nominal de dicho elemento, en el caso de las líneas no se deberá exceder el 100 % de la capacidad. Un elemento empieza a tener restricciones de cargabilidad cuando excede el 80 % de su capacidad, por lo que en este punto se deberían considerar expansiones en el sistema, para información sobre niveles de carga en elementos de SNT ver en [6].

1.1.3. Requerimiento de Carga

Los nodos del sistema de transmisión con nivel de tensión de 230kV, forman múltiples conexiones no solo entre ellos, sino que también con los sistemas de menor voltaje a 138kV y 69kV, este hecho, hace que el modelo de simulación solo incluya la malla de 230kV que se pretende utilizar. Este modelo no puede tener la misma exactitud que el modelo real a menos que se utilice por completo toda la información del SNT, lo que excede los límites del estudio propuesto.

Las simplificaciones que contempla el esquema del sistema de potencia son:

- Agrupación de generadores afines a una barra de 230kV.
- Agrupación de cargas afines a una barra de 230kV.
- Agrupación de compensadores afines a una barra de 230kV.

En los tres casos de agrupación, el conflicto de ubicación de un elemento relacionado con más de una barra de 230kV, se resuelve según la zona en la que se encuentra el generador, el centro de carga más próximo, la capacidad de la subestación de la barra de 230KV más cercana o simplemente, como en el caso de algunas centrales de generación o consumo que tienen distintas locaciones, asignando un porcentaje de generación o carga a cada barra .

La asignación de demandas para los consumidores, que en este caso pasan a ser las distribuidoras, representa un problema natural de la carga y es la variabilidad de sus magnitudes, tanto a lo largo de un mismo día, como el de un período anual. Además se destaca la influencia del porcentaje variable de incremento anual. Para establecer un valor de carga para cada consumidor se considera, el objetivo final de la simulación que es el determinar el nivel máximo de carga del sistema, sin violar parámetros de operación, por lo que las cargas son establecidas en base a las estadísticas del informe anual de CELEC sobre porcentajes de participación de las empresas distribuidoras y la máxima demanda de potencia registrada durante el último periodo.

En cuanto a la maximización de la demanda de potencia, según el informe anual publicado por el CENACE, la demanda de energía del país durante el año 2012 estuvo en los $1652,21$GWh, con una demanda máxima de potencia registrada en el mes de diciembre de $3206,73$MW ,en los bornes de generación. La potencia máxima registrada, es la que se tiene en bornes de generación y para relacionarla con los centros de consumo deberían considerarse las pérdidas en el sistema. Para efecto de definir un porcentaje estimado de pérdidas anual se utiliza la figura 1.2, que contiene los valores mensuales promedios de pérdidas para todo el Sistema de Transmisión.

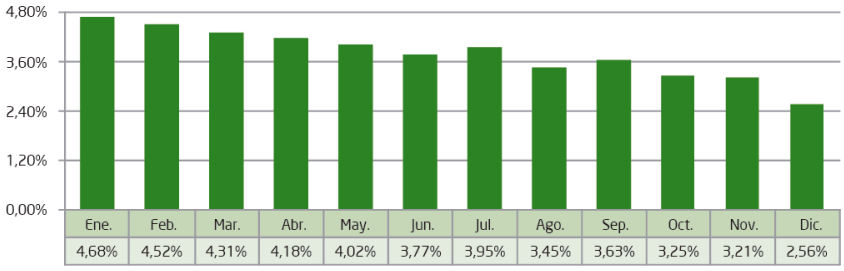


Figura 1.2: Promedios Mensuales de Pérdidas en Transmisión[4]

Las pérdidas mostradas en la gráfica demuestran que la gestión de generadores hace que en los meses de mayor demanda de potencia en bornes de generación no se provoque un aumento sustancial en pérdidas, haciendo que su porcentaje respecto a la potencia total generada disminuya, este hecho se usa para definir el cálculo de pérdidas anual del sistema como un promedio de pérdidas mensuales, ya que si se desea usar un escenario de máxima carga, tampoco, se puede despreciar la volatilidad de estos parámetros por alguna circunstancia de falla y elegir el mínimo porcentaje para la máxima carga.

La nueva potencia en los centros de carga será la potencia máxima en bornes de generación $3206,73\text{MW}$, restada el $3{,}80\,\%$, que es el promedio de pérdidas de todos los meses quedando la nueva potencia máxima estimada para consumidores de 3084,874 MW

Establecida la potencia a distribuirse entre los centros de consumo, resta por asignar un porcentaje de participación de la demanda a cada consumidor.

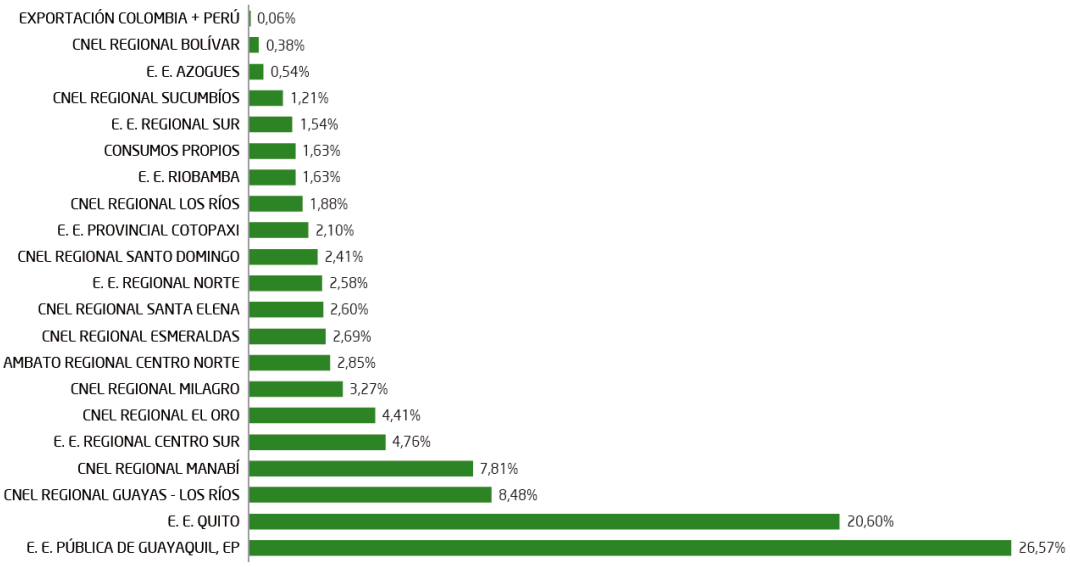


Figura 1.3: Participación de Empresas en Demanda de Energía (%)[4]

La figura 1.3 muestra los porcentajes de participación en la demanda, es decir los porcentajes de consumo de energía. Entre estos porcentajes se encuentran también especificados los correspon-

dientes a exportaciones y consumos propios, el primero es un porcentaje muy pequeño y solo se presenta durante un corto período, por otra parte el porcentaje de consumos propios representa la demanda combinada de los autoconsumidores, que se encuentran muy esparcidos y no representan una carga puntual sobre una barra específica.

Reemplazando el porcentaje de participación de cada empresa de distribución sobre el valor de demanda máxima de potencia, se tiene la tabla 1.4, es oportuno también incluir las barras vinculadas a cada centro de carga.

Consumidor	**%**	**MW**	**Barra**
Exporta Colombia	0,06	1,850	Pomasqui
CNEL Regional Bolivar	0,38	11,722	Riobamba
E.E. Azogues	0,54	16,658	Sinincay
CNEL Regional Sucumbios	1,21	37,326	Totoras
E.E. Regional Sur	1,54	47,507	Molino
Consumos Propios	1,63	50,283	—
E.E Riobamba	1,63	50,283	Riobamba
CNEL Regional Los Rios	1,88	57,995	Milagro
E.E Provincial Cotopaxi	2,1	64,782	S.Rosa-Totoras
CNEL Regional Santo Domingo	2,41	74,345	S.Domingo
E.E. Regional Norte	2,58	79,589	Pomasqui
CNEL Regional Santa Elena	2,60	80,206	Pascuales
CNEL Regional esmeraldas	2,69	82,983	S. Domingo
E.E. Ambato Regional Centro Norte	2,85	87,918	Totoras
CNEL Regional Milagro	3,27	100,875	Milagro
CNEL Regional El Oro	4,41	136,042	Milagro
E.E. Regional Centro Sur	4,76	146,840	Sinincay-Molino
CNEL Regional Manabi	7,81	240,928	Quevedo-S.Gregorio
CNEL Regional Guayas - Los Ríos	8,48	261,597	Milagro-Quevedo Dos Cerritos-Pascuales
E.E. Quito	20,60	635,484	S.Rosa-Pomasqui-Totoras
E.E. República de Guayaquil EP	26,57	819,651	Trinitaria-Pascuales Prosperina-Esclusas

Tabla 1.4: Repartición de Porcentaje, Potencia y Barras para Empresas Distribuidoras

Una segunda versión de la tabla 1.4, que incluya todas las potencias demandadas sobre una barra es más útil para motivos de simulación, la tabla 1.5 muestra esta asignación de carga agrupada sobre las barras. Para asignar la carga en los casos de las distribuidoras asociadas a más de una barra, se emplea una asignación porcentual de carga según la capacidad de los transformadores, ubicados entre el centro de carga y cada barra correspondiente al nivel de 230kV. Los consumos internos y demanda de exportación son distribuidos entre todas las otras barras de consumo, ya sea porque las exportaciones no son un centro de carga constante o que los autoconsumidores están ubicados en distintas locaciones.

La tabla 1.5 también incluye la potencia reactiva por cada barra, el factor de potencia desde el que se parte para calcular la potencia reactiva a través del triangulo de potencias, es obtenida de los datos de un flujo de potencia para todo el sistema con una demanda determinada.

Barra	MW	Factor Potencia	MVAr
Riobamba	67,492	0,958	20,203
Sinincay	109,152	0.954	34,302
Totoras	162,643	0,938	60,104
Molino	110,084	0,931	43,161
Milagro	363,942	0,965	98,905
Esclusas	204,93	0.986	34,656
S.Rosa	641,931	0,971	158,056
S.Domingo	162,816	0,965	44,247
Pomasqui	114,244	0,959	33,762
Pascuales	441,57	0,966	118,183
Quevedo	199,183	0,939	72,953
S.Gregorio	100	0,917	43,499
Dos Cerritos	60,798	0,958	18,199
Trninitaria	139,807	0,95	45,952
Prosperina	205,599	0,965	55,874

Tabla 1.5: Distribución de Carga por Barras

1.1.4. Capacidad de Generación

Los parámetros básicos de la capacidad de un generador, son los límites de las potencias activas y reactivas, por la información disponible del sistema se sabe que a una misma barra están vinculados varias centrales generadoras que a su vez disponen de varios generadores cada una y para poder simplificar a un solo generador equivalente por barra es suficiente sumar las capacidades individuales, en este punto no se debe perder de vista que el objetivo del documento no es estudiar a fondo los flujos de potencia ni las distribuciones de potencia o la asignación de reactivos y activos a cada unidad en particular.

Barras 230 Kv	Gen MW	Lim Inf Reactivos MVAr	Lim Sup Reactivos MVAr
Santo Domingo	136,419	-17,395	34,107
Baba	42,12	-46,8	46,8
Quevedo	290,344	-167,495	200,81
Pascuales	829,162	-138,502	362,499
Trinitaria	260,825	-44,4195	128,84
Esclusas	21	-2,625	10,5
Milagro	380,068	-248,163	300,941
Zhoray	170	-200	200
Sinincay	88,524	-102,44	102,44
Molino	1151,024	-588,3053	688,4404
Totoras	382,728	-266,322	289,482
Riobamba	10,2237	-9,118	10,5256
Santa Rosa	287,737	-73,563	172,625
Pomasqui	30,06	-13,95	24,25

Tabla 1.6: Capacidades de Generación por Barras

La tabla 1.6 resume las capacidades de los generadores sobre una misma barra de 230kV, no se incluye la lista de todos los generadores por ser muy extensa. Como característica del grupo de información con el que se trabaja, se destaca la ausencia de un valor mínimo de potencia producida por los generadores y esta ausencia es justificable por el tipo de asignación de unidades que se hacen, dando como resultado que las unidades de costos mayores, simplemente no generen en el lugar que estén despachando su potencia mínima.

1.1.5. Costo de Generación

Luego de un análisis detenido de los costos de generación y tomando las limitaciones en cuanto al volumen de información de costos de producción disponibles, los cuales son difundidos mayormente solo para las centrales más representativas y el hecho que en cada barra no se puede hacer un incremento de potencia puntual de una central especifica por estar incluidas en una unidad de generación equivalente, se opto por asignar un precio de producción común para todos los generadores equivalentes ubicados sobre las barras.

El concepto de asignar un costo de generación común, es fomentado también porque el tipo de función de costo que maneja CENACE y el tipo de asignación de unidades que realiza, hace que las unidades de menor costo despachen al máximo la capacidad nominal, esto sin duda causaría que en determinado punto se llegue a saturar una sola línea de transmisión si se asigna un costo promedio al generador equivalente de una barra, cuando en la realidad puede desplazarse cargas a otras centrales aún a costa del precio de generación, este comportamiento se trata de reproducir a través de un incremento equilibrado de generación en todas las barras sin inferencia del costo de producción.

El precio elegido como referencia para el costo de producción, es el máximo costo marginal diario que corresponde a la máxima potencia demandada durante el mes de diciembre de 2012, se dice que este costo es referencial, porque el costo marginal depende de la carga que se abastezca y si se aumentan a potencias más allá de las registradas, no se sabría este nuevo costo de generación.

$$Costo\ marginal\ Máximo\ Diciembre\ 2012 = 8{,}05\ ctv.USD/kWh$$

1.2. Problema de Flujo de Potencia

Haciendo referencia hacia antes de los años 40s, los sistemas eléctricos eran muy pequeños y eran predominantemente radiales, por ello los estudios que en ese entonces se realizaban, eran relativamente sencillos y no requerían de métodos muy complejos para determinar el comportamiento de las variables de los sistemas de potencia, sin embargo con el crecimiento de la demanda se hicieron más notables las ventajas de la interconexión .

Con la interconexión de sistemas de potencia, fue posible un crecimiento más rápido al tiempo que se cubrían mayores distancias y se aprovechaban sitios estratégicos para la generación de energía, este avance deja tras de sí la búsqueda de métodos para la solución del problema de flujos de potencia más robustos.

Ahora en la actualidad los sistemas se han vuelto cada vez más complejos y es gracias a la aparición y evolución de ordenadores digitales que es posible simular los flujos de potencia, con el fin de prever su comportamiento y desarrollar criterios para su operación o mejoramiento.

1.2.1. Variables del Problema

El problema de flujo de potencia y consecuentemente la variables a usarse en él, se plantean bajo el criterio de igualdad entre potencia generada y potencia demandada, debe recalcarse que la potencia demandada no es solo la solicitada en los puntos de carga, sino que también incluye la potencia que se pierde por la acción de transportar la energía por las líneas de transmisión, de modo que la igualdad a satisfacer es la que se muestra en la ecuación:

$$SGen = (Sdem + Sper) \tag{1.1}$$

En los problemas de flujo de potencia tradicionales, las variables de potencia demandada y entregada por los generadores, por lo general vienen establecidas en el sistema por sus componentes activos (P) y reactivos (Q), mientras que, las potencias de pérdidas se obtienen implícitamente a través de la magnitud y ángulo de los voltajes en los nodos o barras, de modo que las variables del problema de flujo de potencia son las siguientes:

$$P \rightarrow potencia\ real\ [W]$$

$$Q \rightarrow potencia\ reactiva\ [VAr]$$

$$\mid V \mid \rightarrow voltaje\ en\ barra\ [v]$$

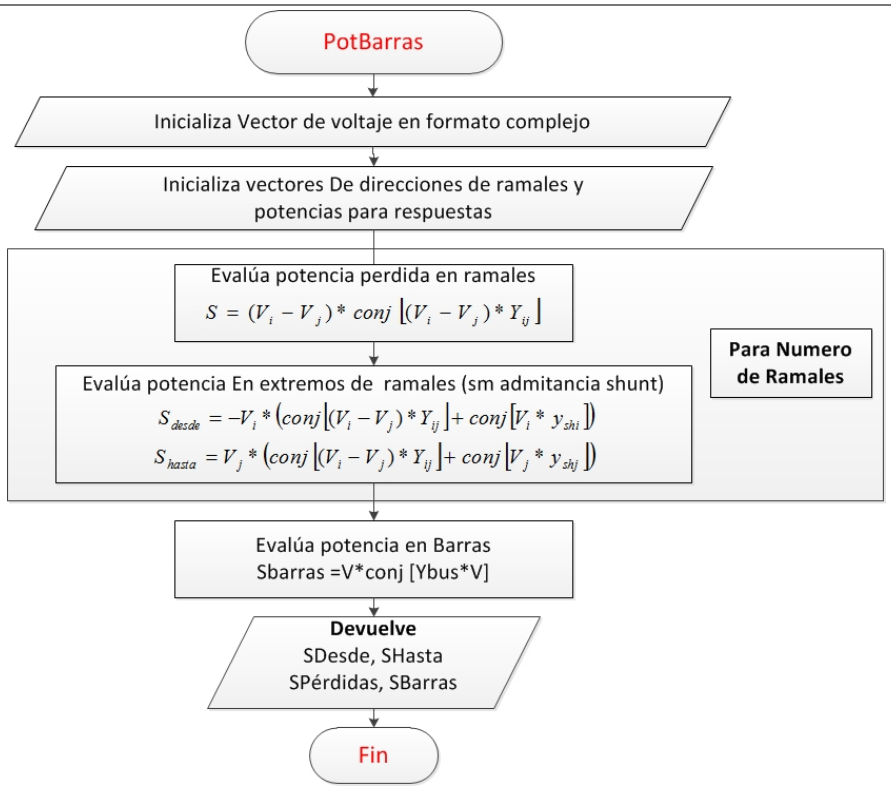
$$\delta \rightarrow ángulo\ del\ voltaje\ [grad]$$

Algoritmo para evaluación de potencia en función de voltajes de nodos

El método de resolución de flujo de potencia retornará como resultado dos vectores, uno de las magnitudes de voltaje y otro de sus respectivos ángulos, estos vectores tal como están, no muestran las potencias que se están transmitiendo en los ramales o las que se pueden apreciar en cada barra, para ello se introduce una función que dependiendo de los voltajes, retorne las potencia en las barras.

La función “potBarras” admite como datos de ingreso la matriz de admitancias, la matriz de ramales, los voltajes de barras y ángulos de voltajes, la función retorna los vectores de la potencia que se inyecta en la barra de origen y destino para cada ramal, la potencia perdida y potencia en las barras.

Algoritmo 1.1 Función potBuses



Nota:

Los vectores de voltaje, antes del cálculo de potencias deben ser transformados a su equivalente en números complejos, para reducir los cálculos de potencia a sus potencias aparentes.

Es necesario ingresar la Ybus como dato y no calcularla dentro de la función principalmente porque puede haber sido modificada por algún compensador y al calcularla de nuevo no consideraría ese cambio.

En las expresiones S_{desde} y S_{hasta}, 'Y_{ij}' denota el valor de la matriz de admitancia del ramal correspondiente, mientras que 'y_{sh}' representa la admitacia paralela propia de ese ramal.

1.2.2. Clasificación de Barras

La barras se pueden clasificar por los elementos conectados a la misma y la característica principal, es un aporte de potencia activa al sistema o un consumidor importante, se tienen principalmente tres tipos de barras que son:

Bus de Referencia o Compensador(slack o swing)

Generalmente es la barra con mayor capacidad de generación asociada, en términos de solución de flujos de potencia será la barra que soporte los cambios en los flujos de potencia, es decir, la que aportara más o menos energía dependiendo de los requerimientos en el sistema. Como característica

para este tipo de bus se tiene que no tendrá ecuaciones de potencia activa o reactiva por lo que no tiene variables desconocidas de voltaje o ángulo.

Bus PQ (bus de carga)

Se clasifican así, a todas las barra que no tengan un generador que sea capaz de imponer su voltaje de generación en su nodo, esto incluye nodos que sirvan solo de paso o conexión, tengan conectadas cargas capacitivas o inductivas pequeños generadores cuyo voltaje de generación sea impuesto por un generador cercano de mayor potencia, en este caso la capacidad aportada del generador será considerada como una potencia fija. Este tipo de barras necesitan de las ecuaciones de potencia activa y reactiva con los voltajes y ángulos como incógnitas.

Bus PV(Bus de generación)

Comprenden a las barras que tienen conectadas generadores, cuyo nivel de generación sea lo suficiente como para hacer que el voltaje del nodo sea impuesto por el generador. Este tipo de barras necesitan solo de la modelación de la ecuación de potencia activa con solamente el ángulo de los voltajes como incógnitas ya que la magnitud está dada por el propio generador.

En la tabla 1.7, se muestra un resumen de la clasificación de las barras:

Tipo de Bus	**Variables conocidas o especificadas**						**Incógnitas obtenidas en el proceso de solución.**			
	P_D	Q_D	P_G	Q_G	$\|V\|$	δ	P_G	Q_G	$\|V\|$	δ
Tipo de Bus										
Referencia	•	•			•	•	•	•		
Bus PQ	•	•	•	•					•	•
Bus PV	•	•	•		•			•		•

Tabla 1.7: Clasificación de las Barras[12]

En el algoritmo desarrollado para flujos de potencia se utiliza un vector de tipo, contenido en la matriz de barras, este vector se utilizara como referencia para los tipos de barras, en este vector un valor de uno “1” significara que esa barra es de tipo PQ, un valor de dos “2” que esa barra es de tipo PV y un valor de tres “3” que esa barra sera la considerada como de Referencia.

La primera utilidad del vector de tipo de Barras es la detección de más de un tipo de barras de referencia, en tal caso el programa arrojara un mensaje de error indicando esa falla en los datos de ingreso.

1.2.3. Ecuaciones de Potencia

Para el planteamiento de las ecuaciones de la potencia, se puede partir de un modelo simple de dos barras. En la figura1.4se presenta un SEP simple, constituido por dos unidades generadoras, dos barras que se encuentran vinculadas a través de una línea de transmisión y dos cargas que tendrán que ser abastecidas.

Ahora bien para el modelamiento de la línea de transmisión se toma la representación de una línea de mediana longitud en configuración π,con la inductancia Z_{serie} y dos admitancias Y_{shunt} en cada nodo.

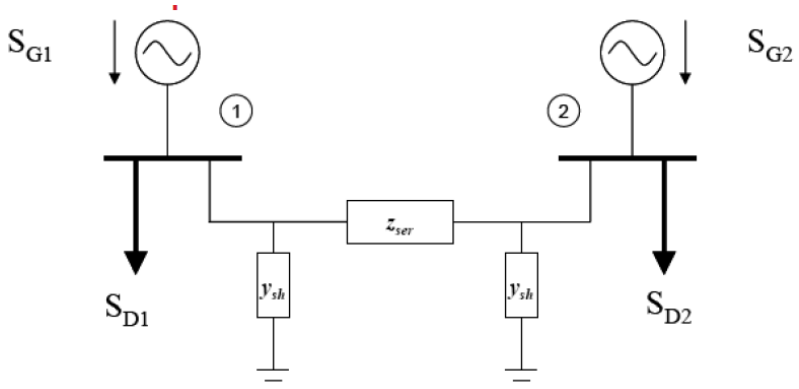


Figura 1.4: SEP Simple, con Circuito Equivalente de la Línea de Transmisión Media[5]

Se inicia formulando las ecuaciones de las corrientes entre las barras.

$$I_1 = V_1 Y_{shunt} + (V_1 - V_2) Y_{Serie} \tag{1.2}$$

$$I_2 = V_2 Y_{shunt} + (V_2 - V_1) Y_{Serie} \tag{1.3}$$

Desarrollando y factorizando las ecuaciones 1.2 y 1.3 de corrientes entre las barras, se obtienen ecuaciones que muestran una tendencia que puede ser expresada de forma matricial.

$$I_1 = V_{1*}(Y_{shunt} + Y_{Serie}) + -V_{2*}(-Y_{Serie}) \tag{1.4}$$

$$I_2 = -V_1 * (Y_{Serie}) + V_{2*}(Y_{shunt} + Y_{Serie}) \tag{1.5}$$

Expresando de manera matricial las corrientes de las ecuaciones 1.4 y 1.5 se obtiene una mejor visión de cómo están distribuidas las admitancias entre los nodos, lo que se conocerá como matriz de admitancias.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

En la que los componentes diagonales de la matriz de admitancias, con la suma de las admitancias serie y shunt ligadas al nodo de cálculo y los componentes fuera de la diagonal de la matriz de admitancias, corresponden a la impedancia serie negativa, entre los nodos que corresponda su posición en la matriz.

$$Y_{11} = Y_{22} = Y_{shunt} + Y_{Serie} \tag{1.6}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -Y_{Serie} \tag{1.7}$$

Con la corriente calculada, resta por insertarla en la ecuación básica de potencia de cada nodo, esta relaciona el voltaje de nodo y la conjugada de la corriente, para este cambio se emplea una conjugada de toda la expresión de potencia de modo que los elementos dentro de la corriente no se tengan que alterar y se obtenga la expresión mostrada en1.8.

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix}^* = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}^* * \left(\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \right) \tag{1.8}$$

Esta ecuación matricial1.8 se puede traducir a una forma lineal para cada nodo como se muestra en 1.9 y 1.10.

$$S_1^* = P_1 - jQ_1 = Y_{11}V_1V_1^* + Y_{12}V_2V_1^* \tag{1.9}$$

$$S_2^* = P_2 - jQ_2 = Y_{21}V_1V_2^* + Y_{22}V_2V_2^* \tag{1.10}$$

El desarrollo seguido aplica para un sistema de dos barras o nodos, sin embargo para extenderlo a un análisis de n nodos se puede emplear una sumatoria que expresada en forma polar, está dada por:

$$P_i - jQ_i = \sum_{j=1}^{n} \mid V_i \mid\mid Y_{ij} \mid\mid V_j \mid e^{j(\delta_j - \delta_i + y_{ij})} \tag{1.11}$$

Separando las partes real e imaginaria con ayuda de la identidad de Euler para exponenciales y números complejos, se tiene:

$$P_i = \sum_{j=1}^{n} \mid V_i \mid\mid Y_{ij} \mid\mid V_j \mid cos(\delta_j - \delta_i + y_{ij}) \tag{1.12}$$

$$Q_i = -\sum_{j=1}^{n} \mid V_i \mid\mid Y_{ij} \mid\mid V_j \mid sen(\delta_j - \delta_i + y_{ij}) \tag{1.13}$$

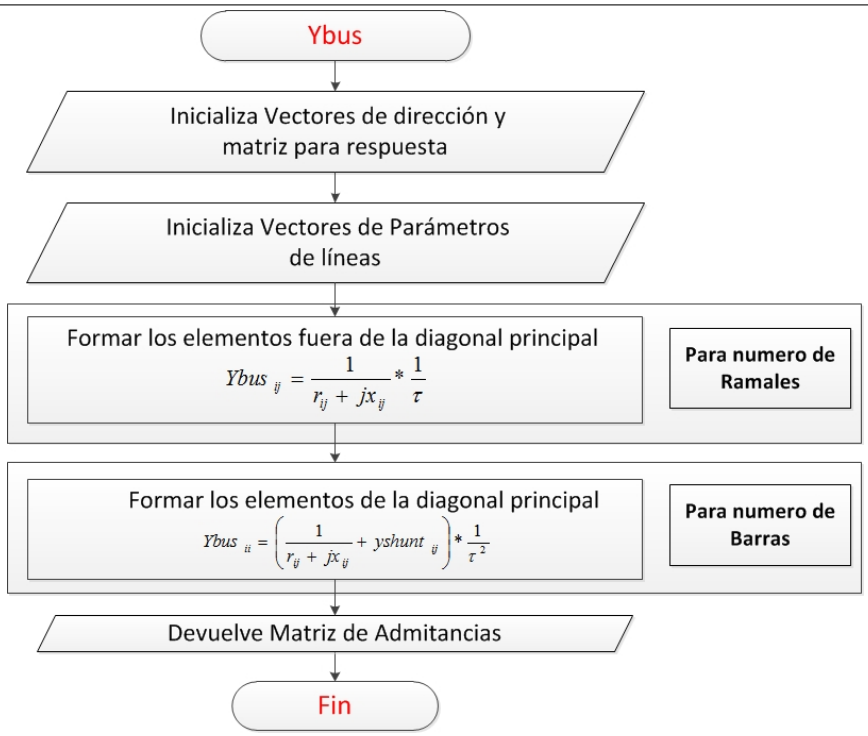
Algoritmo de Matriz de Admitancias

En primera instancia se debe crear la matriz de admitancias que se utilizará en futuro durante

todo el cálculo de los flujos de potencia, para ello se utiliza la función "yBus", que es una función que a partir de la matriz de información de los ramales del sistema retorna una matriz de admitancias para el sistema tratado.

Las variables de utilidad contenidas en la matriz de ramales son los vectores que contienen las direcciones de las barras de origen y destino, los parámetros de resistencia, reactancia y admitancias shunt de los ramales.

Algoritmo 1.2 Función Ybus



Nota:

El literal τ representa el desfase que introduce el transformador en la matriz de admitancias, este valor es angular y para entrar en la ecuación debe convertirse en una expresión tipo compleja.

La representación del desfase del transformador debe cumplir la condición tal que al ser cero no afecte la admitancia.

Algoritmos de Ecuaciones de Potencia

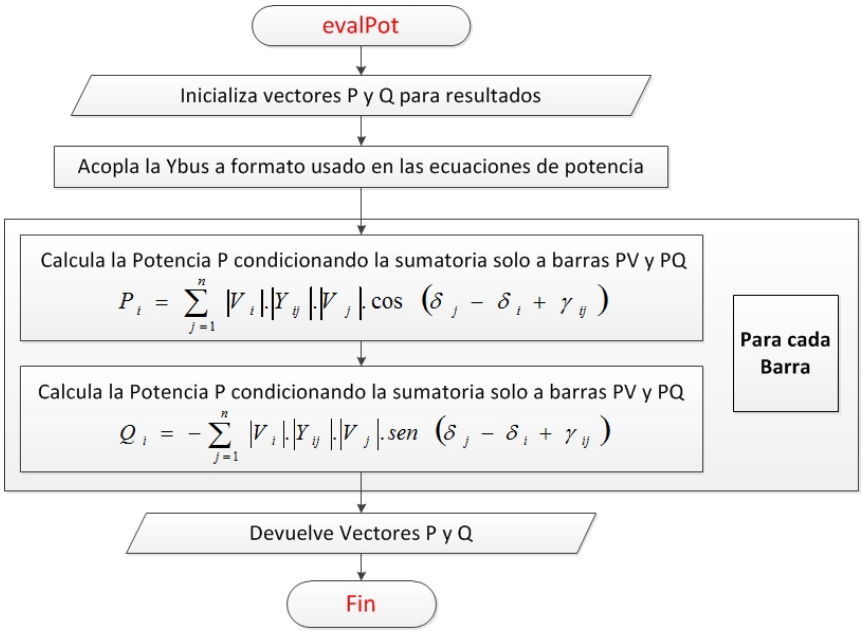
La función empleada para este algoritmo se denominara "EvalPot", que calculará las potencias presentes en las barras en base a los parámetros de ingreso. La función "evalPot" excluye las potencias activas y reactivas de la barra clasificada como referencia y la potencia reactiva de las barras de Voltaje Controlado.

Las expresiones utilizadas son las ecuaciones de potencia 1.12 y 1.13, utilizan como datos de ingreso,

la matriz de admitancias obtenida con la función “yBus”, las magnitudes y ángulos de los voltajes en las barras.

Debe considerarse que, debido a la complejidad de los problemas de flujo de potencia se utilizan métodos de cálculo iterativos para encontrar una solución al problema de flujo, entonces las variables de las ecuaciones de potencia pueden ir cambiando en cada instancia del problema, más concretamente los voltajes en las barras. Durante la primera iteración los voltajes pueden ser aleatorios aunque se tiende a utilizar valores de arranque con voltajes uno por unidad a cero grados.

Algoritmo 1.3 Función evalPot



Nota:

El acoplamiento de datos principalmente consiste en separar el módulo y ángulo de cada elemento de la matriz de admitancias para que se ajusten a las expresiones usadas.
El condicionamiento de las sumatorias se realiza tomando como referencia el vector de tipo de barras.

1.2.4. Método Iterativo para Cálculos de Flujos de Potencia

Newton–Raphson Aplicado al Problema de Flujos de Potencia

Es un método iterativo, es uno de los más usados y efectivos. El método de Newton-Raphson no trabaja sobre un intervalo sino que basa su fórmula en un proceso iterativo derivado de las series de Taylor.

En 1.14 se presentará la forma genérica de solución, el primer vector representa un vector de desajuste, la matriz compuesta por los diferenciales de las funciones es denominado jacobiano y

finalmente el último vector, representa un vector de correcciones de las variables del sistema.

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(X_1^k, X_2^k, ...X_n^k) \\ y_2 - f_2(X_1^k, X_2^k, ...X_n^k) \\ ..... \\ y_2 - f_2(X_1^k, X_2^k, ...X_n^k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}|_k & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}|_k & .. & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}|_k \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1}|_k & \frac{\partial f_2}{\partial x_2}|_k & .. & \frac{\partial f_2}{\partial x_n}|_k \\ .. & .. & .. & .. \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1}|_k & \frac{\partial f_3}{\partial x_2}|_k & .. & \frac{\partial f_3}{\partial x_n}|_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_1^k \\ \Delta X_2^k \\ .. \\ \Delta X_n^k \end{bmatrix} \tag{1.14}$$

Reemplazando la forma genérica de la ecuación 1.14 para que se ajuste con la nomenclatura y las variables del flujo de potencia se obtiene la siguiente expresión.

$$\begin{bmatrix} P_{1(esp)} - P_1 \\ P_{2(esp)} - P_2 \\ \vdots \\ P_{n(esp)} - P_n \\ Q_{1(esp)} - Q_1 \\ Q_{2(esp)} - Q_2 \\ \vdots \\ Q_{m(esp)} - Q_m \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{cccc|cccc} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial V_1} & \frac{\partial P_1}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial P_1}{\partial V_m} \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_2}{\partial V_1} & \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial P_2}{\partial V_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial V_1} & \frac{\partial P_n}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial P_n}{\partial V_m} \\ -- & -- & -- & -- & -- & -- & -- & -- \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_1}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_1}{\partial V_m} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_1} & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial \delta_n} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_1} & \frac{\partial Q_m}{\partial V_2} & \cdots & \frac{\partial Q_m}{\partial V_m} \end{array}\right] * \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \Delta\delta_2 \\ \vdots \\ \Delta\delta_n \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_m \end{bmatrix} \tag{1.15}$$

En la expresión 1.15, el vector de potencias especificadas es el equivalente al valor independiente de una función cualquiera, en el flujo de potencia corresponde a las potencias fijas que están siendo generadas o consumidas en un nodo determinado, estos valores no incluyen los de la barra de referencia o slack, para mostrar estas potencias se tomará de nuevo el ejemplo de dos barras de la figura 1.5, en el que las ecuaciones de potencia se deducen de una resta simple de potencia demandada y generada en cada nodo.

$$S_{esp1} = S_{G1} - S_{D1} = (P_{G1} - P_{D1}) + j(Q_{G1} - Q_{D1}) \tag{1.16}$$

$$S_{esp2} = S_{G2} - S_{D2} = (P_{G2} - P_{D2}) + j(Q_{G2} - Q_{D2}) \tag{1.17}$$

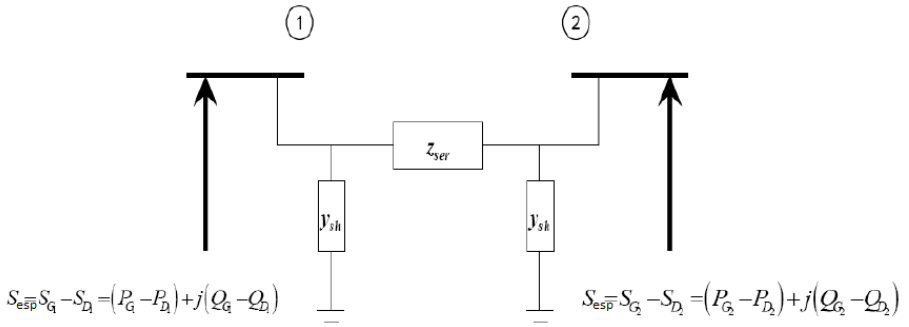


Figura 1.5: Modelamiento de un SEP Simple[5]

Continuando con el análisis de la ecuación 1.15, el vector de potencias en cada barra está determinado por las ecuaciones de potencia 1.12 y 1.13, determinadas anteriormente, de modo que la resta de estos vectores da una variación de potencia que es la utilizada para el método de solución.

$$f_{pi}(\mid V \mid, \delta) = P_i(especificada) - P_i(calculada) = \Delta P_i = 0 \tag{1.18}$$

$$f_{qi}(\mid V \mid, \delta) = Q_i(especificada) - Q_i(calculada) = \Delta Q_i = 0 \tag{1.19}$$

$$\Delta P_i = P_i^{especificada} - \sum_{k=1}^{n} \mid V_i \mid\mid Y_{ik} \mid\mid V_k \mid cos(\delta_k - \delta_i + \theta_{ik}) \tag{1.20}$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{especificada} - \left[- \sum_{k=1}^{n} \mid V_i \mid\mid Y_{ik} \mid\mid V_k \mid sen(\delta_k - \delta_i + \theta_{ik}) \right] \tag{1.21}$$

Para el cálculo de la matriz Jacobiana, es necesario subdividir la matriz en cuatro cuadrantes, por conveniencia de entendimiento y programación.

$$J = \begin{bmatrix} [J_{11}] & . & [J_{12}] \\ .. & . & .. \\ [J_{21}] & . & [J_{22}] \end{bmatrix} \tag{1.22}$$

En la ecuación 1.22, cada submatriz formada puede ser representada a un grupo de potencias derivadas para las variables de ángulo o magnitud, como se muestra en la expresión 1.23.

$$J = \begin{bmatrix} \left[\frac{\partial P}{\partial \delta}\right] & . & \left[\frac{\partial P}{\partial V}\right] \\ .. & . & .. \\ \left[\frac{\partial P}{\partial \delta}\right] & . & \left[\frac{\partial Q}{\partial V}\right] \end{bmatrix} \tag{1.23}$$

Finalmente regresando al último elemento de la ecuación1.15, es un vector resultado de la resta del valor inicial de las variables desconocidas y el valor respuesta de esa iteración, con esta consideración y despejando las variables de interés de la respuesta, la expresión para realizar las iteraciones es la que se ve a continuación.

$$\begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_n \\ V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1^{(ite-1)} \\ \delta_2^{(ite-1)} \\ \vdots \\ \delta_n^{(ite-1)} \\ V_1^{(ite-1)} \\ V_2^{(ite-1)} \\ \vdots \\ V_m^{(ite-1)} \end{bmatrix} + [J]^{-1} * \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} \tag{1.24}$$

Algoritmo Para la Evaluación de Matriz Jacobiana

Tomando la expresión 1.24, los parámetros de potencias y voltajes a la derecha de la igualdad han sido definidos por otras funciones o s**o**n resultado directo de la misma ecuación 1.24 en anteriores iteraciones a excepción de la matriz Jacobiana, para ello se introduce la función "MaJacob"

La función "MaJacob" evalúa los componentes de la matriz jacobina, a partir de las derivadas de las ecuaciones de potencia con dos situaciones impuestas por condicionales, para cuando la potencia a derivar corresponde con la variable de la barra origen o de lo contrario se derive respecto a la variable de la barra de destino, las dos condiciones se adjuntan a las ecuaciones derivadas de la potencia para generar los elementos fuera y dentro de la diagonal de cada submatriz.

Los elementos de la diagonal y fuera de la diagonal de la matriz J11 respectivamente se forman con:

$$[J_{11}]\mid_{j=i}=\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}=\sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{n}\mid V_i\mid *\mid Y_{ik}\mid *\mid V_k\mid *sen(\delta_k-\delta_i+y_{ik}) \tag{1.25}$$

$$[J_{11}]\mid_{j\neq i}=\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}=-\mid V_i\mid *\mid Y_{ik}\mid *\mid V_k\mid *sen(\delta_k-\delta_i+y_{ik}) \tag{1.26}$$

Los elementos de la diagonal y fuera de la diagonal de la matriz J12 respectivamente se forman con:

$$[J_{12}]\mid_{j=i}=\frac{\partial P_i}{\partial V_j}=2*\mid V_i\mid *\mid Y_{ik}\mid *cos(y_{ik})+\sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{n}*\mid V_{ik}\mid *\mid V_k\mid *cos(\delta_k-\delta_i+y_{ik}) \tag{1.27}$$

$$[J_{12}]\mid_{\substack{j=k\\i\neq j}}=\frac{\partial P_i}{\partial V_j}=\mid V_i\mid *\mid Y_{ik}\mid *cos(\delta_k-\delta_i+y_{ik}) \tag{1.28}$$

Los elementos de la diagonal y fuera de la diagonal de la matriz J21 respectivamente se forman con:

$$[J_{21}]\mid_{j=i}=\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}=\sum_{\substack{k=1\\k\neq j}}^{n}\mid V_i\mid *\mid Y_{ik}\mid *\mid V_k\mid *cos(\delta_k-\delta_i+y_{ik})*(-1) \tag{1.29}$$

$$[J_{21}]\mid_{j\neq i}=\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j}=-\mid V_i\mid *\mid Y_{ik}\mid *\mid V_k\mid *cos(\delta_k-\delta_i+y_{ik})*(-1) \tag{1.30}$$

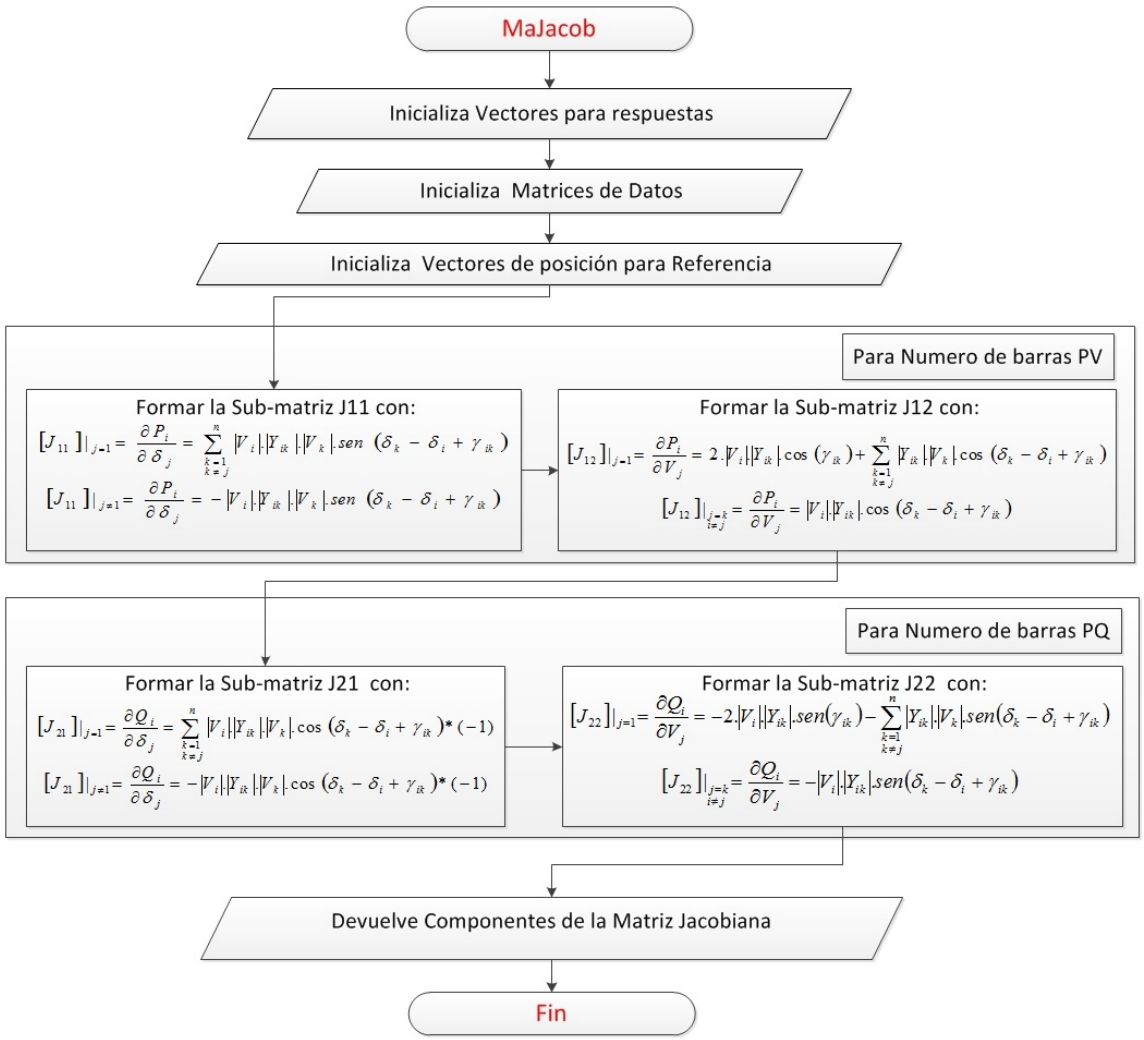
Los elementos de la diagonal y fuera de la diagonal de la matriz J22 respectivamente se forman con:

$$[J_{22}] \mid_{j=i} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = -2 * \mid V_i \mid * \mid Y_{ik} \mid * sen(y_{ik}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n} * \mid V_{ik} \mid * \mid V_k \mid * sen(\delta_k - \delta_i + y_{ik}) \tag{1.31}$$

$$[J_{22}] \mid_{\substack{j=k \\ i \neq j}} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = - \mid V_i \mid * \mid Y_{ik} \mid * sen(\delta_k - \delta_i + y_{ik}) \tag{1.32}$$

La función "MaJacob" recibe los voltajes en los nodos, la matriz de admitancias y un vector de tipos de barras y retorna los componentes de la matriz Jacobiana $J11,\ J12,\ J21,\ J22$.

Algoritmo 1.4 Función MaJacob



Nota:

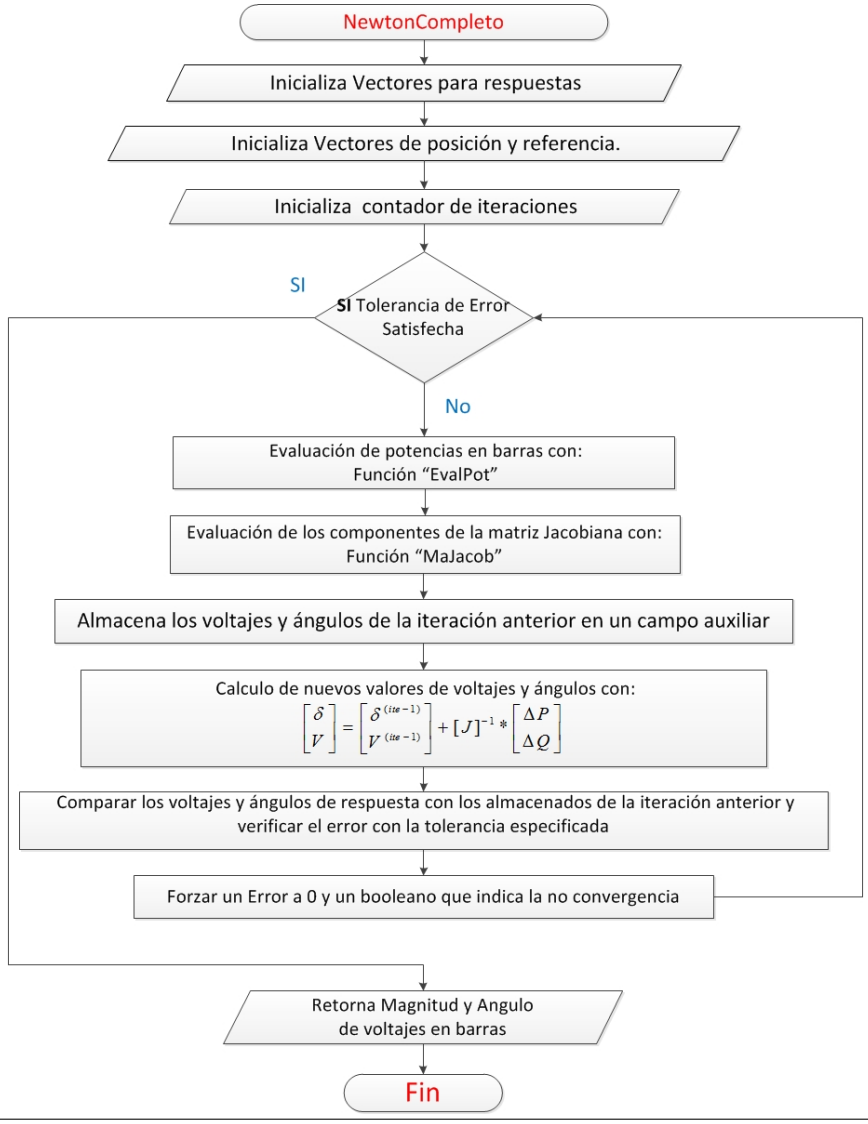
Los resultados de esta función dependen de los voltajes de barras y cambiaran ligeramente en cada iteración mientras el método converge a un resultado.

La función retorna los cuatro componentes de la matriz jacobiana por separado y no en una sola matriz general en el caso que se quiera modificar o agregar el método de solución desacoplado de Newton para flujos de potencia.

Algoritmo de Método Iterativo Newton-Raphson

La función "NewtonCompleto" en si es la representación de la ecuación 1.24, internamente manda a llamar a otras funciones para el cálculo de las potencias en barras y matriz jacobiana para calcular los voltajes en las barras de interés.

Algoritmo 1.5 Función NewtonCompleto



Nota:

Se fuerza el error a cero en el método para asegurar que siempre se obtenga un resultado de la función ya que no se puede detener el algoritmo y mandar un mensaje de error, porque posteriormente otros algoritmos o funciones dependerán de este y detenerlo frente a una no convergencia, sería inconveniente.

1.3. Dispositivos FACTS

Los FACTS por sus siglas en ingles de ¨Flexible Alternating Current Trasnmition System¨ son dispositivos que mediante el accionamiento de elementos semiconductores de potencia, permiten mejorar la capacidad de transferencia de potencia entre un punto de consumo y uno de generación, para este fin las variables del sistema influenciadas por los compensadores flexibles son, los voltajes de los nodos, las impedancias serie de las líneas o los ángulos de fase. En cualquier caso se traduce en un control de flujos de potencia activa y reactiva, aunque la de mayor interés suele ser la disminución de la reactiva.

Característicamente los FACTS presentan ventajas sobre los métodos tradiciones de control de reactivos en sistemas de potencia, por la capacidad de intermitente en períodos de tiempo cortos y repetitivos que son dependientes principalmente de la variabilidad de la demanda del sistema [22, 8].

Los compensadores flexibles se han clasificado por su topología, que guarda íntima relación con el resultado que se obtiene, en:

- **Controladores Serie.-**Influencian las impedancias de la línea de transmisión entre nodos, ejemplo TCSC.
- **Controladores Shunt (Paralelo).-**Control de Voltaje y/o Ángulo de Voltaje en el nodo a través de la inyección de potencia reactiva, ejemplo SVC, STATCOM.
- **Controladores Shunt-Serie Combinados.**-Control Simultáneo o individual de impedancias de línea, voltajes o ángulos de voltaje, ejemplo UPFC, IPFC.

Las prestaciones que los dispositivos FACTS brindan, tanto en la aspecto económico y operación, son:

- Los dispositivos FACTS tienen como principal función extender la capacidad de transmisión de los bloques de potencia de un sistema de transmisión, a través de la supresión del componente complejo de la potencia y dejando sólo a la potencia activa o real para ser transmitida, la medida en que se suprima la potencia reactiva dependerá del tipo de línea, el compensador que se aplique y el tipo de control que se le efectué.
- En determinadas circunstancias los compensadores también pueden llegar a disminuir las pérdidas producidas en los conductores por concepto de transmisión, aunque se debe resaltar

que la función principal de los FACTS es el de extender la capacidad de transmisión del sistema.

- Los compensadores flexibles además de ofrecer una solución efectiva cuando se trata de estabilizar sistemas de potencia con líneas muy largas, en las que los estabilizadores no puedan satisfacer los requerimientos, también pueden ser usados como elementos de protección para evitar sobrecargas o fallas a los nodos que están relacionados. Ofrecen apoyo a una de los criterios de operación fundamentales que es el voltaje en nodos del sistema[13, 21].

1.3.1. Compensador Serie Controlado por Tiristores (TCSC)

Este dispositivo es muy utilizado para el control de flujo de potencia en las líneas de transmisión a través de una compensación en serie.

La función que desempeña un TCSC, es modificar la impedancia de la línea, insertando capacitores o inductancias en serie con el circuito para modificar el flujo de potencia. La compensación capacitiva es la más empleada, debido a que ayuda a contrarrestar los efectos inductivos naturales de las líneas de transmisión.

La ventaja que ofrecen los TCSC frente a los estabilizadores convencionales, es que estos segundos utilizan dispositivos con accionamientos mecánicos, que al pasar el tiempo y el uso tienden a desgastarse y sufrir averías, mientras que los TCSC al utilizar dispositivos de accionamiento estáticos a base de tiristores no tienen este problema debido al esfuerzo mecánico[21].

Para la modelación de un TCSC en una línea de transmisión, se toma el modelo PI simplificado de la línea y en serie a la impedancia de línea, se coloca una reactancia variable X_{TCSC}, que representa la capacidad inductiva o capacitiva que tiene el compensador sobre la línea como se ve en la figura 1.6.

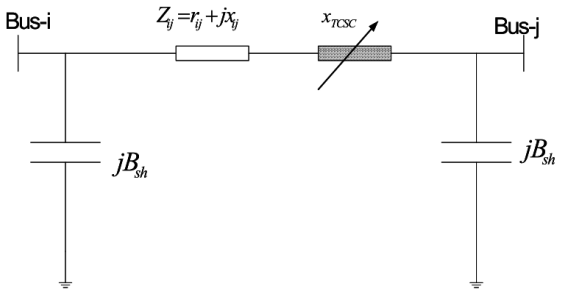


Figura 1.6: Diagrama de una Línea de Transmisión Compensada con un TCSC[20]

Durante el régimen estacionario, el compensador puede cambiar libremente entre valores de reactancia según su control, por ello en la tabla [20, 10], para evitar la sobre compensación de la línea se recomiendan límites para la oscilación de reactancia, dado por la función 1.33.

$$-0{,}8\,X_L \;\leq\; X_{TCSC} \;\leqslant\; 0{,}2\,X_L \;\; p.u. \tag{1.33}$$

Los límites propuestos varían entre autores, pero se mantiene una tendencia de factor capacitivo mayor al 50 % de reactancia de la línea y factor inductivo menor al 25 % de la inductancia de la línea.

Para poder ser utilizado en un flujo de potencia, el modelo debe ser en una impedancia de línea con la reactancia del compensador incorporada, de modo que se obtenga el esquema mostrado en la figura 1.7, en esta figura las variaciones de reactancia que introduce el compensador se expresan a través de la función de variación (1.34)

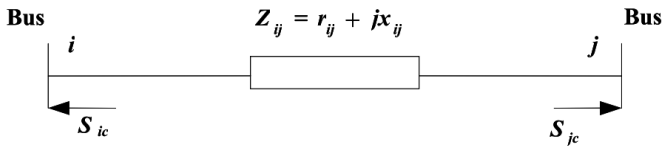


Figura 1.7: Modelo de Inyección de Potencia del TCSC[20]

$$\Delta y_{ij} = \; y'_j - y_{ij} \; = \left(G'_{ij} + jB'_{ij}\right) - \left(G_{ij} + jB_{ij}\right) \tag{1.34}$$

En donde

$$G_{ij} + jB_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} \tag{1.35}$$

$$G_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \;\; , \;\; B_{ij} = \frac{-x_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2} \tag{1.36}$$

$$G'_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + \left(x_{ij} + x_{TCSC}\right)^2} \;\; , \;\; B'_{ij} = \frac{-\left(x_{ij} + x_{TCSC}\right)}{r_{ij}^2 + \left(x_{ij} + x_{TCSC}\right)^2} \tag{1.37}$$

En la función (1.34) se expone que de hecho hay una variación de admitancias por la presencia del compensador, por lo que la matriz de admitancias también se verá afectada en la media que indica 1.38

$$Y'_{BUS} = Y_{BUS} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \Delta y_{ij} & 0 & ... & 0 & -\Delta y_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\Delta y_{ij} & 0 & ... & 0 & \Delta y_{ij} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 \\ & Col-i & & & & Col-j & \end{bmatrix} \begin{matrix} \\ \\ Fila-i \\ \\ \\ \\ Fila-j \\ \\ \end{matrix} \tag{1.38}$$

En término de flujos de potencia entre barras, las ecuaciones que denotan la potencia con la adición del compensador, se pueden escribir a partir las ecuaciones (1.12,1.13), para el flujo de potencia activa y reactiva, aplicando la variación de admitancia producida por el compensador serie de modo que se obtienen[11, 14] :

$$P_{ij_{TCSC}} = V_i^2 G'_{ij} - V_i V_j \left[G'_{ij} \, Cos\left(\delta_{ij}\right) - B'_{ij} \, Sen\left(\delta_{ij}\right) \right] \tag{1.39}$$

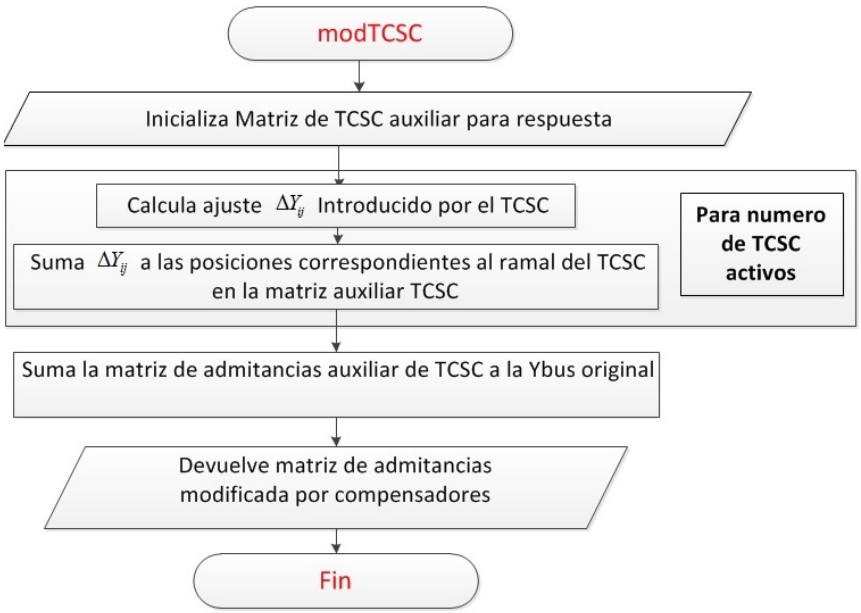
$$Q_{ij_{TCSC}} = -V_i^2 \left(B'_{ij} + B_{sh} \right) + V_i V_j \left[G'_{ij} \, Sin\left(\delta_{ij}\right) - B'_{ij} \, Cos\left(\delta_{ij}\right) \right] \tag{1.40}$$

Algoritmo para TCSC

Para el caso de los algoritmos de los compensadores, son necesarias dos consideraciones para su modelamiento y simulación, el modelamiento se traduce en definir las variaciones que introducen los compensadores y para la simulación debe considerarse, si este valor estará sujeto a cambios según el método de solución de flujos de potencia, según evoluciona el método iterativo.

La función "modTCSC" ajusta la matriz de admitancias tal cual lo presentado en la sección superior, en una magnitud en función de la misma admitancia serie del ramal pudiendo tener un comportamiento inductivo o capacitivo.

Algoritmo 1.6 Función modTCSC



Nota:

El algoritmo de modificaciones introducidas por TCSC recibe, una matriz de información de

TCSC, la matriz de admitancias del sistema sin TCSC, un vector de ubicación de TCSC y las dimensiones de la matriz de admitancias.

La segunda condición que se mencionó anteriormente se relaciona con el lugar que se le dará al compensador en el programa para cálculo de flujo de potencia, este lugar deberá ir acorde con las variables que modifique el compensador.

En este caso el TCSC cambia la admitancia serie de un ramal del sistema, por tanto su ubicación deberá ir luego de que se calcule la matriz de admitancias sin compensadores y al no depender de ningún parámetro que cambie durante las iteraciones como el voltaje, no es necesario ubicarlo dentro del bucle del método iterativo.

Para evitar que la función "modTCSC" sea llamada sin TCSC activos, se coloca un condicional que permita arrancar la función solo ante la comprobación de compensadores activos, este condicional se utiliza para los tres tipos de compensadores tratados en este documento y utilizan una columna para estado de operación en cada compensador que marca con uno la operación y con cero la no operación de un compensador en un ramal o barra.

1.3.2. Compensador Estático de Voltaje (SVC)

El objetivo principal de los SVC es el de control de voltaje en los puntos a considerarse críticos del sistema mediante la inyección de potencia reactiva.

El SVC puede comportarse como un banco de capacitancias o inductancias conectado al bus, esto permite tener un control del flujo de potencia reactiva desde el compensador y así controlar los niveles de voltaje en la barra.

Las ventajas que ofrecen frente a los estabilizadores convencionales, además de las características mecánicas, son la rapidez en la reacción y la capacidad de responder dinámicamente con los cambios en los flujos de potencia[10].

Estos compensadores tienen principalmente dos topologías que cumplen con la función de control de reactivos en el nodo y son: [17]

Reactancia controlada por Tiristores TCR

Corresponde a una configuración de un condensador en paralelo con una reactancia de control variable a través de un par de tiristores conectados en anti paralelo, de aquí su nombre ya esta configuración permite que la magnitud de potencia reactiva inyectada al nodo desde el capacitor sea limitada en mayor o menor medida por el inductor de control variable, Figura 1.8.a.

Compensador Conmutado por Tiristores TSC

Para esta configuración se consideran que todos los ramales del compensador flexible están

conectados al nodo de referencia a través de tiristores en conexión anti paralelo, esta conexión permite el control directo de la potencia reactiva inyectada, mediante la operación de los tiristores, Figura1.8.b.

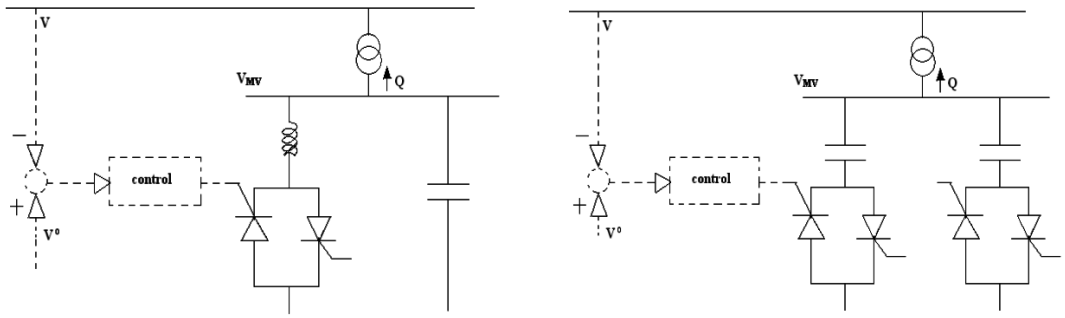


Figura 1.8: a)Topología TCR b)Topología TSC[20]

Para la modelación del SVC, se toma una capacitancia variable en conexión Shunt respecto a la barra que se quiera controlar, el otro extremo de la capacitancia variable se conecta al nodo de referencia del sistema y forma una estructura radial como se muestra en la figura 1.9.

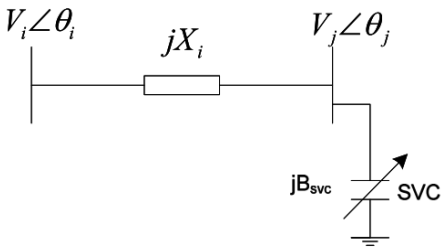


Figura 1.9: Diagrama de Línea de Transmisión Compensada con un SVC[20]

La corriente inyectada por la capacitancia variable I_{SVC} en el nodo i puede ser expresada como:

$$I_{SVC} = jB_{SVC}\, V_j \tag{1.41}$$

La figura 1.10, muestra el equivalente a una fuente de corriente desde entre el nodo referencia cero y el de cálculo.

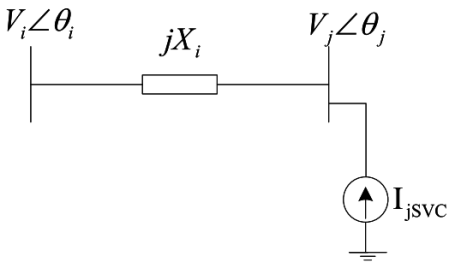


Figura 1.10: Modelo de Inyección de Potencia del VSC[20]

Para estos FACTS el riesgo de sobre compensación es menor, ya que las condiciones de igualdad en las ecuaciones de potencia equilibran los valores de potencia .

La incidencia del SVC sobre la matriz de admitancias se ve representada únicamente sobre la barra en la cual esta acoplado ya que del otro extremo se encuentra conectado al punto de referencia del sistema, pero incluso así afecta en una pequeña proporción a la matriz de admitancias como lo muestra la figura 1.42.

$$Y'_{BUS} = Y_{BUS} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{SVC} & ... & 0 & 0 & 0 \\ ... & ... & ... & ... & ... & ... & ... \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & ... & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{1.42}$$

Para la ecuación de flujo de potencia para el SVC, se considera una alternativa en la modelación que es inyectar directamente la potencia aportada por el compensador sobre la barra de acople, como lo demuestra la expresión 1.43.

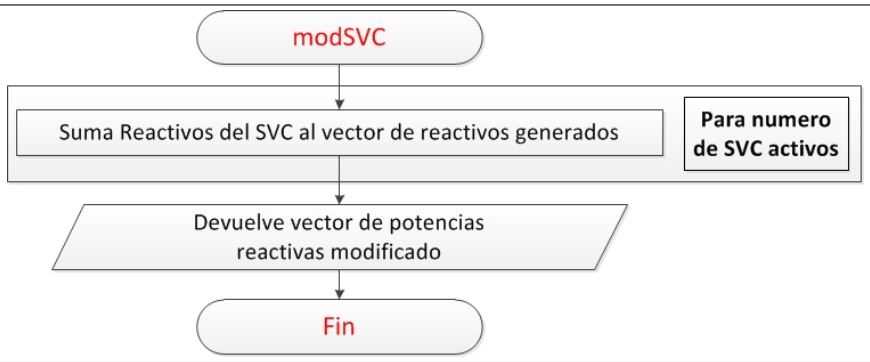
$$Q_{SVC} = Q_i = -jB_{SVC}V_i \tag{1.43}$$

Algoritmo para SVC

La función “modSVC” utiliza un modelo de SVC en el que considera al compensador como una fuente de potencia reactiva acoplada directamente sobre el nodo, la compensación reactiva puede ser de naturaleza capacitiva o inductiva, la magnitud en la que afecta el SVC sobre el sistema viene dado en valores por unidad

La función “modSVC” recibe una matriz de información sobre los SVC, un vector de potencias reactivas, un vector de posición de los SVC activos.

Algoritmo 1.7 Función modSVC



Nota:

Al sumar la capacidad del compensador a la potencia brindada por los generadores, se está considerando como que, los valores positivos del compensador corresponden a un comportamiento de tipo capacitivo, es decir que el compensador se comporta como un generador de reactivos.

El modelamiento utilizado considera al compensador como una fuente constante de energía reactiva que no depende del voltaje de la barra por lo que al igual que el TCSC, necesita ser calculado una vez, cada que se realicen cambios en los SVC o se corra un nuevo flujo de potencia.
La ubicación de los compensadores SVC y TCSC comparten restricciones de ubicación similares y se los puede juntar en un punto en particular del algoritmo de flujo de potencia como se aprecia en el algoritmo 3.1.

1.3.3. Controlador de Flujo de Potencia Unificado (UPFC)

De manera general el UPFC puede proporcionar control simultáneo a todos los parámetros básicos del sistema de potencia, esto incluye, el ángulo de voltaje, magnitud de voltaje y la magnitud de la corriente. Esto se logra con la combinación de dos compensadores una en serie (similar a un SSSC) y otro en paralelo (similar a un STATCOM) que se vinculan a la línea de transmisión a través de transformadores serie y paralelo respectivamente[15, 18].

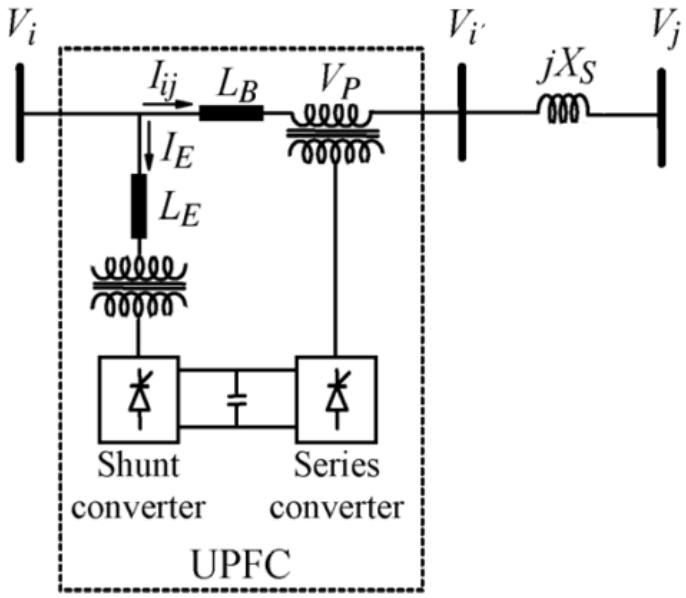


Figura 1.11: Diagrama de Línea de Transmisión Compensada con un UPFC [1]

En términos más específicos, los UPFC se comprenden de dos transformadores, uno de excitación en serie a la línea y otro elevador en paralelo a la línea de transmisión, los UPFC también cuentan con convertidores de voltaje trifásico, basados en dispositivos de conmutación de potencia que tienen como característica funcional el poder cambiar libremente las magnitudes y ángulos de voltaje con lo que se logra un control sobre las potencias activas y reactivas, por último entre los

inversores se encuentra un capacitor que sirve de enlace entre ellos[21][1], Figura 1.11.

Para la modelación se consideran principalmente los flujos de corrientes y voltajes en el nodo de acoplamiento serie y shunt con la línea de transmisión.

La capacidad de los UPFC se ve limitada por factores de seguridad en aislamientos y costos, confinando los valores que puedan tomar a los mostrados en [10], por factores prácticos y económicos se limitan los valores de voltaje del nodo de acoplamiento serie y corrientes shunt por [10] (1.441.45)

$$V_{SEmax} = 0{,}3p.u. \tag{1.44}$$

$$I_{SHmax} = 0{,}15p.u. \tag{1.45}$$

1.3.3.1. Ecuaciones de potencia para UPFC

En primera instancia se presentara un modelo de inyección de potencia tanto para la barra "i" como en la barra "j", la representación esquemática se muestra en la figura 1.12.

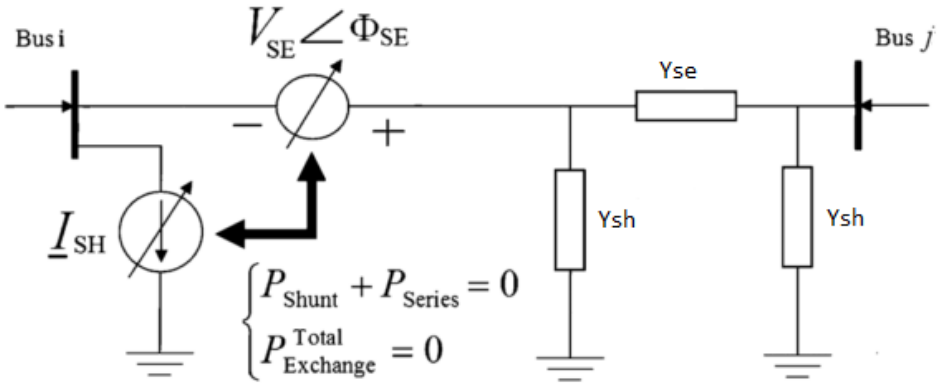


Figura 1.12: Modelo de Inyección de Potencia del UPFC[10]

El modelo de flujo de potencia, para el cálculo de las funciones de flujos de potencia para este compensador, se iniciará asumiendo que en el punto de conexión serie del compensador se crea un nodo con un voltaje que es equivalente al voltaje de la barra inicial más el voltaje en magnitud y ángulo que aporta el compensador[14].

Otra característica de este compensador es el cumplimiento de la condición de igualdad en las potencias que son extraídas del nodo "i" a través de la fuente de corriente y las potencias que son inyectadas por la fuente de voltaje serie, ya que el UPFC no tiene la capacidad de generación de energía y despreciando las perdidas. En conmutación las pérdidas son reducidas a cero por lo que no se pierde ni genera energía.

El modelamiento de la potencia de las barras con este compensador se realiza de igual manera, que con el ejemplo de dos barras en secciones anteriores, pero con la diferencia que se considera un nodo intermedio, introducido por el compensador.

Desarrollo de ecuación de potencia en el nodo de origen del compensador.

$$I_i = I_q + I_a + I_b \tag{1.46}$$

$$I_a = (V_i^{'} - V_j).Y_{se} \tag{1.47}$$

$$I_b = V_i^{'}.Y_{sh} \tag{1.48}$$

Reemplazando las ecuaciones 1.47 y 1.48 en 1.46 se obtiene:

$$I_i = -Y_{se}.V_j + V_i^{'}.Y_{se} + V_i^{'}.Y_{sh} + I_{SH}$$

En Donde:

$$V_i^{'} = V_i + V_{se}$$

Entonces reemplazando el voltaje alternativo de la barras "i" en la ecuación de corriente:

$$I_i = -Y_{se}.V_j + Y_{se}.(V_i + V_{se}) + Y_{sh}.(V_i + V_{se}) + I_{SH}$$

$$I_i = -Y_{se}.V_j + Y_{se}.V_i + Y_{se}.V_{se} + Y_{sh}.V_i + Y_{sh}.V_{se} + I_{SH}$$

Se desarrolla la expresión hasta obtener una corriente con valores agrupados en función de los voltajes.

$$I_i = V_i.(Y_{se} + Y_{sh}) + V_{se}.(Y_{se} + Y_{sh}) - V_j.Y_{se} + I_{SH} \tag{1.49}$$

Introduciendo el valor de la corriente de la ecuación 1.49 en la de potencia del nodo y desarrollando la función con las consideraciones tomadas al formar la matriz de admitancias se obtiene la potencia aparente del nodo de origen en el que está ubicado el compensador:

$$S_i^* = V_i^*.I_i$$

$$S_i^* = V_i^* \left[V_i.(Y_{se} + Y_{sh}) + V_{se}.(Y_{se} + Y_{sh}) - V_j.Y_{se} + I_{SH}\right]$$

$$S_i^* = V_i^*.V_i.(Y_{se} + Y_{sh}) + V_i^*.V_{se}.(Y_{se} + Y_{sh}) - V_i^*.V_j.Y_{se} + V_i^*.I_{SH}$$

$$S_i^* = V_i^2.V_{ii}.e^{j(-\theta_i+\theta_i+\gamma_{ii})} + V_i.V_{se}.e^{j(-\theta_i+\theta_{se}+\gamma_{ii})} + V_i.V_j.e^{j(-\theta_i+\theta_i+\gamma_{ii})} + V_i.I_{SH}.e^{j(-\theta_i+\gamma_{SH})} \tag{1.50}$$

Desarrollo de la Ecuación de Potencia en el Nodo de Destino del Compensador.
Determinación de las corriente en el nodo con respecto al otro introducido por el compensador.

$$I_a^{'} = (V_j - V_i^{'}).Y_{se}$$

$$I_b^{'} = V_j^{'}.Y_{sh}$$

$$I_j = Y_{se}.V_j - V_i.Y_{se} - V_{se}.Y_{se} + V_j.Y_{sh}$$

$$I_j = V_j(Y_{se} + Y_{sh}) - V_i.Y_{se} - V_{se}.Y_{se}$$

Reemplazando la corriente en la ecuación de potencia como se lo hizo para la ecuación de potencia del nodo "i" se obtiene la ecuación de potencia para el nodo "j":

$$S_j^* = V_j^*.I_j$$

$$S_j^* = V_j^*.V_j.Y_{jj} - V_j^*.V_i.Y_{ij} - V_j^*.V_{se}.Y_{ij}$$

$$S_j^* = V_j^2.V_{jj}.e^{j(-\theta_j+\theta_j+\gamma_{jj})} + V_i.V_j.Y_{ij}.e^{j(-\theta_j+\theta_j+\gamma_{jj})} + V_j.V_{se}.Y_{ij}.e^{j(-\theta_i+\theta_i+\gamma_{ii})} \quad (1.51)$$

Las dos ecuaciones de potencia de 1.50 y 1.51, guardan gran similitud con las ecuaciones 1.9 y 1.10 de flujo entre dos barras sin UPFC, de hecho los de los elementos de las ecuaciones concuerdan, tomando esto en cuenta es fácil poner a las ecuaciones de potencia de dos barras con un compensador UPFC entre ellas como las ecuaciones estándar a las que se le suman la variación introducida por el compensador:

$$S_{UPFC}^* = S^* + S'^* \quad (1.52)$$

En donde:
S^*contempla las ecuaciones de potencia ordinarias para el problema de flujos de potencia.

$$S_i'^* = V_i.V_{se}.e^{j(-\theta_i+\theta_{se}+\gamma_{ii})} + V_i.I_{SH}.e^{j(-\theta_i+\gamma_{SH})} \quad (1.53)$$

$$S_j' = V_j.V_{se}.Y_{ij}.e^{j(-\theta_i+\theta_i+\gamma_{ii})} \quad (1.54)$$

Las variaciones que produce la fuente de voltaje en serie de compensador se pueden entender de mejor manera observando la figura 1.13 de vectores de voltaje y corriente entre las barras.

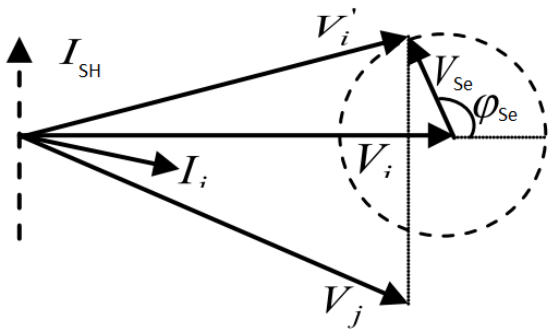


Figura 1.13: Diagrama Vectorial de Voltajes para Compensador UPFC.[14]

Determinación de corriente SH en nodo "i"

Como se mencionó anteriormente se parte de la condición de igualdad entre la potencia SH de la fuente variable en el nodo de origen y la potencia SE en el nodo intermedio inmediatamente luego del compensador, por ello primero se deben determinar cada una de estas potencias.

$$S_{sh}^{*} = V_i^{*}.I_{SH}$$

$$S_{se}^{*} = V_{se}^{*}\left[V_i(Y_{se}+Y_{sh}) + V_{se}(Y_{se}+Y_{sh}) - V_j.V_{se}^{*}.Y_{se}\right]$$

$$S_{se}^{*} = V_{se}^{*}.V_i.Y_{ii} + V_{se}^{*}.V_{se}.Y_{ii} - V_{se}^{*}.V_j.Y_{ij}$$

Entonces:

$$S_{se}^{*} = -S_{sh}^{*}$$

$$V_{se}^{*}.V_i.Y_{ii} + V_{se}^{*}.V_{se}.Y_{ii} - V_{se}^{*}.V_j.Y_{ij} = -V_i^{*}.I_{SH}$$

$$I_{SH} = \frac{V_{se}.V_i.Y_{ii}.e^{j(\theta_i-\theta_{se}+\gamma_{ii})} + V_{se}^{2}.Y_{ii}.e^{j(\gamma_{ii})} + V_{se}.V_j.(-Y_{ij}).e^{j(\theta_j-\theta_{se}+\gamma_{ij})}}{(-V_i.e^{j(-\theta_i)})}$$

Corriente variable del nodo de origen en función del voltaje y ángulo de la fuente serie, reduciendo las variables de control del UPFC a la magnitud y ángulo de voltaje de la fuente variable en serie al compensador.

$$I_{SH} = -V_{se}.Y_{ii}.e^{j(2\theta_i-\theta_{se}+\gamma_{ii})} - \frac{V_{se}^{2}}{V_i}.Y_{ii}.e^{j(\theta_i+\gamma_{ii})} - \frac{V_{se}.V_j}{V_i}(-Y_{ii}).e^{j(\theta_j-\theta_{se}+\gamma_{ij}+\theta_i)}$$

1.3.3.2. Matriz de Jacobiano para UPFC

Con el precedente de las ecuaciones de potencia para el UPFC, se puede tomar las mismas consideraciones y formar una matriz jacobiana con solo las ecuaciones de potencia de las diferencias que introducen los compensadores en el sistema.

Entonces solo se debe considerar las derivadas de las ecuaciones 1.53 y 1.54 respecto a las variables del sistema y más concretamente a las variables de los nodos que tienen contacto con el compensador.

Elementos la submatriz $J11_{UPFC}$ agregados por la ecuación de potencia 1.53:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = -V_{se}.V_i.Y_{ii}.sen(\theta_{se} - \theta_i + \gamma_{ii}) + V_i.I_{SH}\left[sen(\theta_{SH} - \theta_i)\right] \quad , \quad \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} = 0$$

Elementos de la submatriz $J12_{UPFC}$ agregados por la ecuación de potencia 1.53:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = +V_{se}.V_i.Y_{ii}.cos(\theta_{se} - \theta_i + \gamma_{ii}) + V_i.I_{SH}\left[cos(\theta_{SH} - \theta_i)\right] \quad , \quad \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} = 0$$

Elementos de la submatriz $J21_{UPFC}$ agregados por la ecuación de potencia 1.53:

$$\frac{\partial P_i}{\partial V_i} = V_{se}.Y_{ii}.cos(\theta_{se} - \theta_i + \gamma_{ii}) + I_{SH}.cos(\theta_{SH} - \theta_i) \quad , \quad \frac{\partial P_i}{\partial V_j} = 0$$

Elementos de la submatriz $J22_{UPFC}$ agregados por la ecuación de potencia 1.53:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial V_i} = -V_{se}.Y_{ii}.sen(\theta_{se} - \theta_i + \gamma_{ii}) - I_{SH}.sen(\theta_{SH} - \theta_i) \quad , \quad \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} = 0$$

De la misma manera se procede con los elementos de la submatriz $J11_{UPFC}$ agregados por la ecuación de potencia 1.54 :

$$\frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} = V_j.V_{se}.Y_{ij}\left[sen(\theta_{se} - \theta_j + \gamma_{ij})\right] \quad , \quad \frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} = 0$$

Elementos de la submatriz $J12_{UPFC}$ agregados por la ecuación de potencia 1.54 :

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \theta_j} = -V_j.V_{se}.Y_{ij}\left[cos(\theta_{se} - \theta_j + \gamma_{ij})\right] \quad , \quad \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} = 0$$

Elementos de la submatriz $J21_{UPFC}$ agregados por la ecuación de potencia 1.54 :

$$\frac{\partial P_j}{\partial V_j} = V_{se}.Y_{ij}\left[cos(\theta_{se} - \theta_j + \gamma_{ij})\right] \quad , \quad \frac{\partial P_j}{\partial V_i} = 0$$

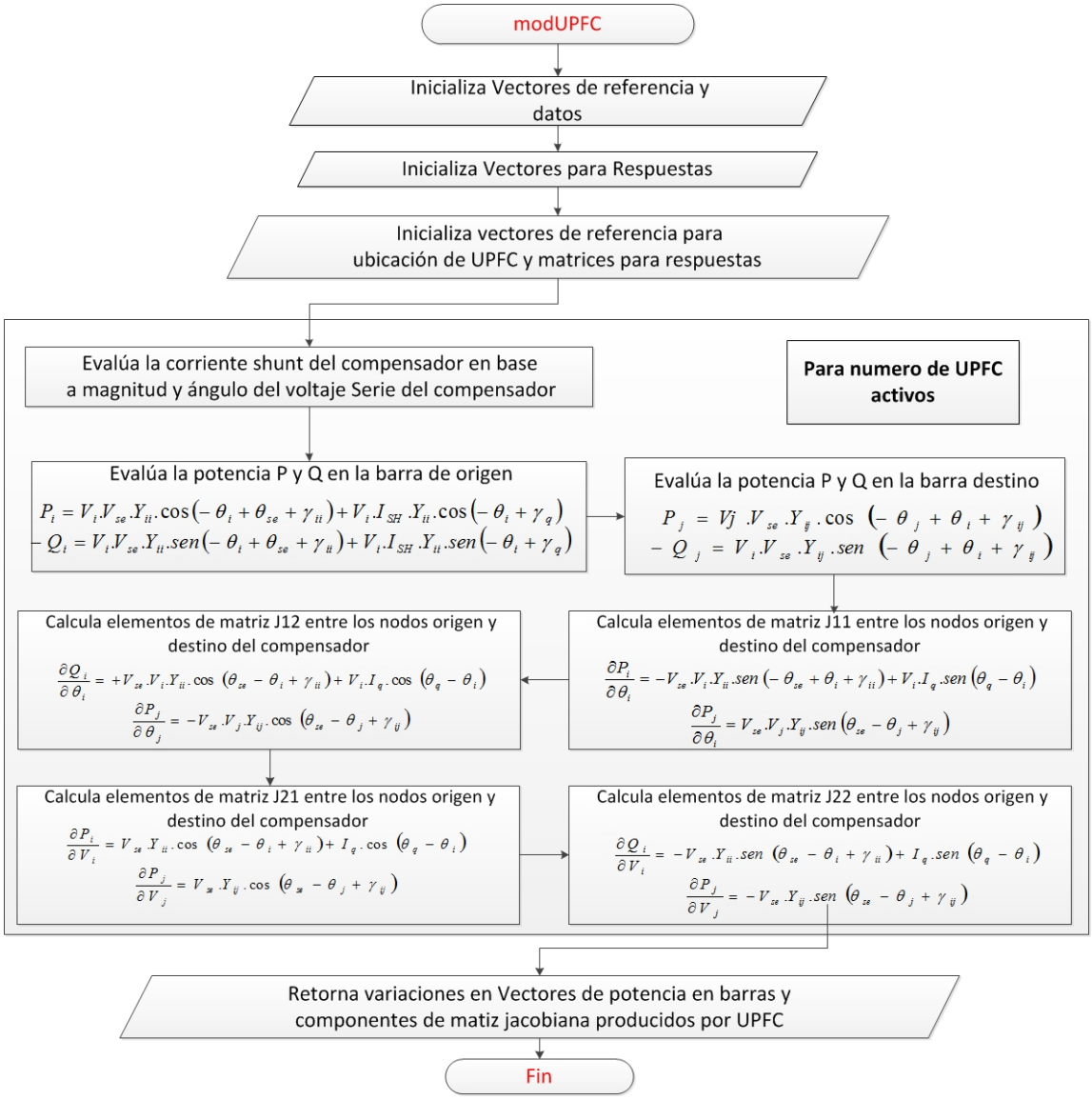
Elementos de la submatriz $J22_{UPFC}$ agregados por la ecuación de potencia 1.54 :

$$\frac{\partial Q_j}{\partial V_j} = -V_{se}.Y_{ij}\left[sen(\theta_{se} - \theta_j + \gamma_{ij})\right] \quad , \quad \frac{\partial Q_j}{\partial V_i} = 0$$

Algoritmo para UPFC

La función "modUPFC" básicamente se la puede considerar como una versión más condicionada de la funciones "EvalPot" y "MaJacob" en un mismo algoritmo, tiene como objetivo calcular las variaciones que se introducen en las ecuaciones de potencias y en la matriz jacobiana de un sistema sin compensadores, dichas variaciones son las que introducen los UPFC.

Algoritmo 1.8 Función modUPFC



Nota:

Para la ubicación de la "modUPFC", que calcula las variaciones introducidas por el UPFC, debe considerarse que el modelamiento toma los voltajes en los extremos del ramal y estos al variar ligeramente en cada iteración hacen que los cambios introducidos por el UPFC varíen y deban ser calculados en cada iteración.

Para calcular las variaciones de potencia y Jacobiana del UPFC, se crea una sección dentro del código de la función "NewtonCompleto" luego de evaluar la potencia en nodos y la Jacobiana respectivamente, de este modo los vectores y matrices que retorne la función "modUPFC" tendrán con que ser sumados.

Para evitar que se trate de calcular innecesariamente estas variaciones, un condicional que sirve como detector de UPFC activos es necesario.

1.4. Restricciones en Flujo de Potencia

El método de solución del problema de flujo de potencia tratado en la sección anterior no considera ninguna restricción en los límites de los generadores ni en los criterios de operación como voltajes y potencias sobre líneas que se obtienen como resultados del problema de flujo.

Para realizar un flujo de potencia más real, son necesarias las siguientes desigualdades que representan los límites físicos y de operación que tienen los componentes del sistema:

$$PG_{min} < PG < PG_{max} \tag{1.55}$$

$$QG_{min} < QG < QG_{max} \tag{1.56}$$

$$V_{min} < V < V_{max} \tag{1.57}$$

$$SL < SL_{max} \tag{1.58}$$

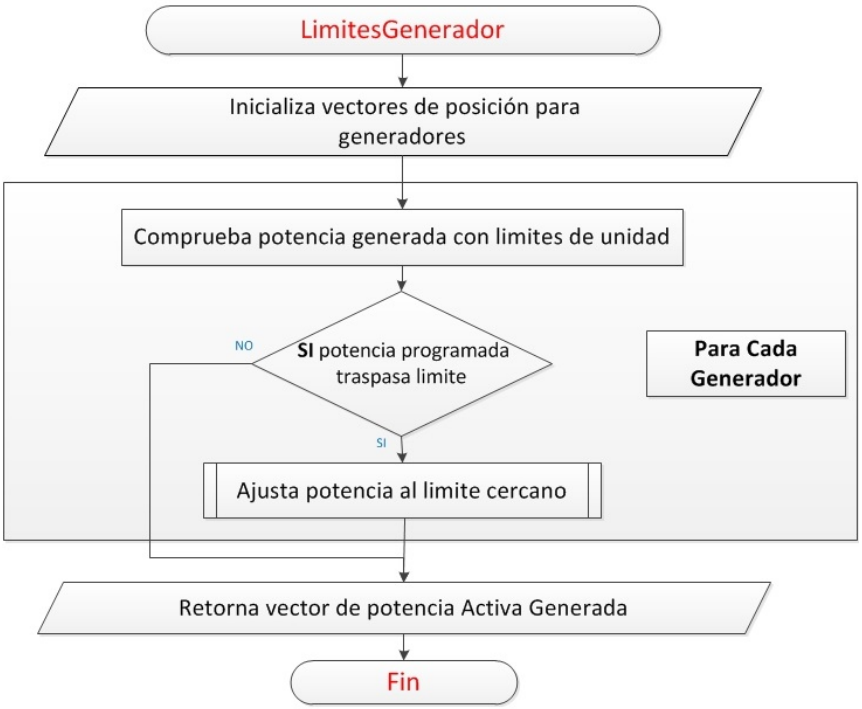
La cantidad de desigualdades a emplearse en el problema dependerá del análisis que se pretenda hacer del problema, en el caso de esta sección los problemas a tratar serán los límites en los generadores, tanto para potencia activa como reactiva. Se implementarán tres algoritmos adicionales al flujo de potencia con los que se pretende; comprobar la configuración inicial del problema en cuando a límites de generación, limitar la potencia reactiva y limitar la potencia activa.

Las desigualdades con las variables de voltaje y potencia sobre los ramales no serán considerados en esta sección ni capítulo ya que se convertirán en el criterio de evaluación para la mejor opción durante el algoritmo de optimización tratado en el siguiente capítulo.

Algoritmo para Comprobar Límites de Generación Inicial

Por características técnicas y físicas los generadores deben operar generando al menos con un mínimo de potencia activa y reactiva.

Algoritmo 1.9 Función LimitesGenerador



Nota:

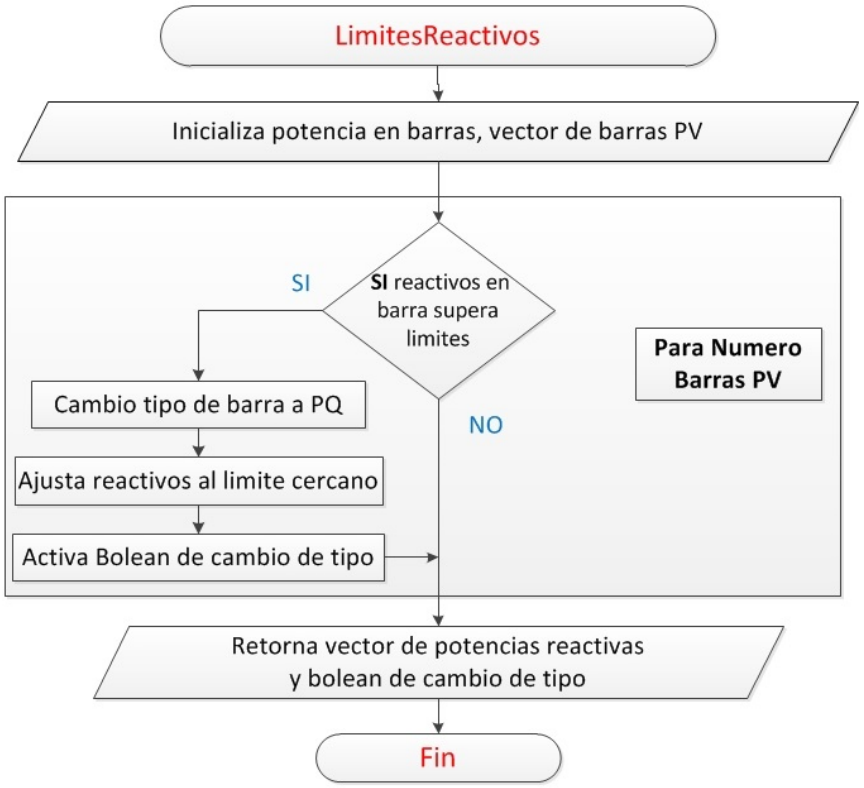
La comprobación de los límites de generación antes de iniciar el método iterativo para la solución del flujo de potencia se utilizó bajo la premisa de que podría evitar posibles divergencias del método provocadas por una configuración de matrices incorrecta.

Algoritmo para Limitar la Generación de Potencia Reactiva

Para el algoritmo de limitación en capacidad de reactivos generada se emplea el método mencionado en [23], para manejar los límites de generación de reactivos en las unidades, el criterio básico utilizado, es el de verificar en cada convergencia de flujo los límites de potencia reactiva en las barras y en el caso de traspasar algún límite mínimo o máximo, cambiar el tipo de barra de voltaje controlado a una de carga y asignar la capacidad máxima o mínima de ese generador a lo que puede considerarse un generador de reactivos en paralelo a esa barra.

Es evidente que luego de un cambio debe correrse un nuevo flujo de potencia, con los cambios en los tipos de barras y esta vez las barras que, en un inicio eran de voltaje controlado pierden la capacidad de mantener su voltaje estable y empiezan a variar como lo hacen las barras de carga.

Algoritmo 1.10 Función LímitesReactivos



Nota:

El bolean de cambio de tipo, retorna un cero si no ha habido cambios respecto al vector original de ingreso o de lo contrario, un 1, este bolean es uno de los criterios de salida del bucle de iteraciones implementado en el flujo de potencia.

La comprobación de la potencia reactiva se realiza para cada barra que este catalogada como de voltaje controlado cuando se ejecuta la función.

1.4.1. Despacho Económico

A medida que los consumos de energía y consecuentemente los costos relacionados a ella son más altos, es necesario incluir restricciones adicionales en el flujo de potencia que permitan encontrar soluciones que cumplan con características de bajos costos.

Uno de los criterios para la solución del problema de despacho económico utiliza los incrementos en costo que tendrá un generador al aumentar la potencia entregada al sistema, para esto se utilizan como referencias las funciones de costo incremental que son obtenidas al derivar las funciones de costo de cada unidad de generación en función de la potencia. Para cumplir con el criterio de despacho lo que se busca es que, los valores para incremento de costo en primer lugar lleguen a igualarse y luego crezcan lo más equilibradamente posible, repartiendo la potencia faltante en el

sistema según el costo de generación que tenga cada unidad.

Al criterio básico de despacho económico se le aumentan las restricciones de operación de los generadores o de límites de las líneas de transmisión que pasan a ser constantes invariables en la solución del problema y tienen que ser cumplidas.

Función de costo cuadrática:

$$F(P) = a + bP + cP^2 \tag{1.59}$$

Derivada de una función de costo cuadrática:

$$\frac{\partial F(P)}{\partial P} = b + 2cP \tag{1.60}$$

La aplicación simultanea de un problema de flujo de potencia y despacho de carga o asignación de unidades, se la conoce como flujo optimo de potencia, en estos problemas las restricciones económicas implicadas giran en torno a una función objetivo, que en problemas de despacho económico generalmente se busca minimizar su valor. La función objetivo es conformada por expresiones que representan el costo de generación de las unidades.

La función Objetivo a ser minimizada es:

$$F = \sum_{i=1}^{NG} F_i(P_{gi}) \tag{1.61}$$

Entre los métodos de solución de un Flujo Optimo de Potencia que hace mención el autor en [16], están entre otros los basados en el método de Newton, Factores de Penalización, Gradiente Negativo, dichos métodos tienen en común una función de costo cuadrática como la mostrada en la ecuación 1.59.

1.4.1.1. Metodología para Asignación de Unidades por el CENACE

En Ecuador el ente encargado de la asignación de unidades de generación térmica e hidroeléctrica es el CENACE, para ello ha compilado la información de las unidades de generación en cuanto se refiere a costos de generación para establecer las curvas que relacionan el costo y la producción de energía para satisfacer el criterio de despacho económico.

El CENACE no cuenta con un modelo que relacione todas las centrales de generación con respecto a un referente global en especial, ya sea porque las características de operación de una central térmica difieren de una hidroeléctrica o entre las mismas centrales hidroeléctricas la categorización de central de paso, de regulación semanal, de regulación mensual o regulación anual, se encuentran dependientes del caudal de ingreso y a su vez de la época del año.

Para el despacho económico propiamente dicho el CENACE usa curvas de costo lineales de la

forma:

$$F(P) = a + b * P \tag{1.62}$$

En la expresión 1.62 de costo, P equivale a la potencia y al derivar esta expresión para obtener la función de incremento de costo respecto a la potencia se obtiene:

$$\frac{\partial F(P)}{\partial P} = \lambda = b \tag{1.63}$$

En donde lambda es el incremento de costo y es igual al segundo índice de la función de costo. Esta expresión al ser una constante y no depender de la potencia generada hace que los métodos comunes para flujo óptimo de potencia que utilizan el criterio de igualdad entre los incrementos de costo en generación no sean de mucha utilidad.

En su lugar para el algoritmo, se plantea el método propuesto en [19], utilizando la competencia de costos entre generadoras y la que menor costo de generación posea, entrara al mercado a entregar energía hasta alcanzar su capacidad máxima o los criterios que el CENACE decida, satisfecha la máxima cota de generación de esta central. La siguiente con costo de generación más bajo que quede entre los competidores, será la elegida para entregar y despachar potencia sucesivamente hasta cumplir con la carga solicitada.

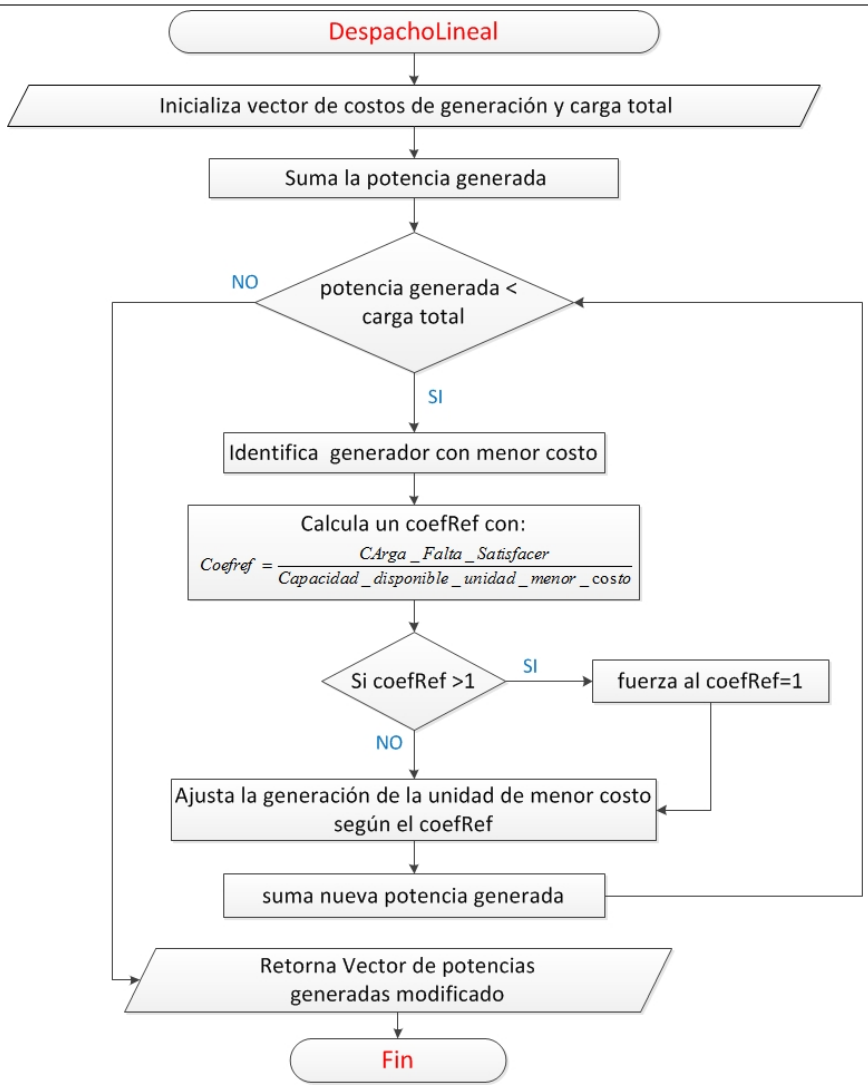
Algoritmo para Asignación de Generadores

En el algoritmo para despacho de una función de costo lineal, se sigue persiguiendo el criterio de minimizar los costos incrementales y aumentando el nivel de generación de esa unidad hasta alcanzar los límites de operación o satisfacer la carga, en caso de que se alcancen los límites, el siguiente generador con costo ascendente se designara para entregar potencia.

Los incrementos en potencia generada hasta los límites se deben a que la derivada de su función de costo no podrán llegar a ser iguales, a menos que todos los generadores tengan igual costo de generación, porque al no depender de la potencia la función de costo incremental siempre será una constante.

El algoritmo da prioridad a la asignación de potencias dadas por el usuario, aun sea esta una con mayor costo operativo, esta decisión es respetada salvo que se viole el límite de operación en cuanto a potencia suministrada y esta sea rebajada hasta su límite máximo por la función de límites de generación.

Algoritmo 1.11 Función DespachoLineal



Notas:

El coeficiente de referencia coefRef es un valor auxiliar introducido para determinar, que tanto la unidad de menor costo incremente su nivel de generación, por lo que este coeficiente no puede ser mayor a la unidad, ya que implica que la unidad genera más allá de sus límites. Este método de utilizar un coeficiente como referencia, es respuesta para solucionar el supuesto que dos unidades compartan el mismo costo de generación, el coeficiente actúara repartiendo equitativamente la carga faltante entre los generadores de menor costo según su capacidad disponible.

Como ejemplo se supone el caso que tres generadores posean igual costo incremental con capacidades de 2, 2, 3 unidades de potencia y se requieran satisfacer 4 unidades, la carga se distribuirá 1.14, 1.14 y 1.71 unidades de carga respectivamente. Se realiza esto con visión a evitar la saturación de una sola línea de transmisión ya que más adelante uno de los puntos de análisis será el de la capacidad de las líneas de transmisión.

Luego de ajustar al máximo la capacidad de generación de una unidad se ajusta el costo de generación a cinco veces mayor de modo que no se considere de nuevo durante la búsqueda de la unidad de menor costo

El despacho puede cambiar levemente al incluir las perdidas en las líneas, para tomar en cuenta las perdidas, la función de despacho lineal se ubicara dentro de otro bucle que a su vez, contenga la solución del problema de flujo de potencia, las condiciones de salida de este bucle de despacho son los cambios que se observen en la potencia de la barra de referencia entre iteraciones. Con este antecedente el dato de número de iteraciones por solución de flujo con restricciones cambia a ser en la mayoría de los casos una iteración ya que la respuesta publicada esta en función del último problema de flujo de potencia resuelto.

Capítulo 2

ALGORITMO GENÉTICO

Los Algoritmos Genéticos utilizados como métodos de búsqueda y optimización de parámetros, tratan de imitar el proceso de selección natural que se lleva a cabo dentro del proceso evolutivo de un organismo vivo y encontrar la mejor solución al problema planteado a través de la supervivencia de los individuos que muestren una mejor aptitud para adaptarse al problema planteado.

En los métodos evolutivos la información genética de los individuos es pasada a la descendencia a través de operadores de cruce, en la naturaleza los individuos que logran adaptarse al entorno de mejor manera suelen sobrevivir y por ende tener más posibilidades de reproducirse y transmitir a su descendencia sus características de adaptación, este segundo proceso se simula en los algoritmos genéticos con operadores de selección del mejor individuo y evaluación de la adaptación.

Dentro de un algoritmo genético las posibles soluciones a los problemas están codificadas como individuos o cromosomas, cada posible solución estará asociada a un valor de bondad o adaptación a la solución del problema, y será este valor el que determine la selección de los mejores individuos. Los cromosomas a su vez están compuestos por parámetros individuales llamados alelos, que a su vez se pueden agrupar en genes.

2.1. Codificación del Problema

Las bases para la codificación del problema parten del principio de codificar cualquier solución potencial para el problema en modo de una cadena de valores denominada cromosoma.

A los parámetros que forma un cromosoma se lo llama genotipo, mientras que un cromosoma en particular con ciertos valores asignados a dichos parámetros se lo llama fenotipo, cada fenotipo es una solución potencial al problema y tienen un valor de bondad asociado.

En los problema de algoritmos genéticos clásicos, la codificación de los cromosomas se lo hacia de forma binaria y se mantenía esta estructura para trabajar con los operadores genéticos que producían descendencia, sin embargo luego se implementaron codificaciones que usaban números reales que permitían disminuir el largo de las cadenas de códigos binarios a unos más cortos formados por

números reales y hasta permiten un uso más libre de valores decimales.

Para la codificación del problema de flujo de potencia se ha considerado un cromosoma compuesto por tres genes o grupos de alelos que tienen las siguientes restricciones para su codificación.

1. Tipos de compensadores.
2. Ubicación de los compensadores.
3. número de variables por Compensador
4. Rango de Magnitudes para compensadores

2.1.1. Tipos de Compensadores.

El campo del cromosoma que define el tipo de compensadores a utilizarse, es el que se llamara Gen1 y toma valores enteros positivos desde el uno al tres para definir el tipo de compensadores que el usuario desee utilizar.

No hay mayores restricciones para este gen más que los valores que representan a cada compensador, en el código de programación para generar esta sección del cromosoma se usa como parámetros de entrada el número de compensadores de cada tipo y se generara un vector con orden ascendente del tipo de compensadores programados.

2.1.2. Ubicación de los Compensadores.

En la segunda sección del cromosoma se ubica la posición de cada compensador, como característica inicial la longitud del gen2 es la misma que la del gen1 y las posiciones de compensadores sobre ramales y barras utilizan vectores de referencia distintos.

El problema principal de la formación de este gen son los conflictos generados al tener dos o más compensadores en una misma barra o ramal. Esta circunstancia de conflicto genera dos posibilidades a considerar, la primera es que dos compensadores de distinto tipo puedan compartir una barra o ramal y la segunda opción es que no lo puedan hacer. Aunque en muchos ejercicios pueda ser que las dos posibilidades de restricción de ubicación no sea motivo de análisis debido a que los resultados tiendan a ser muy dispersos entre barras o ramales, al menos la comprobación de un solo tipo de FACTS por ramal o barra es imprescindible.

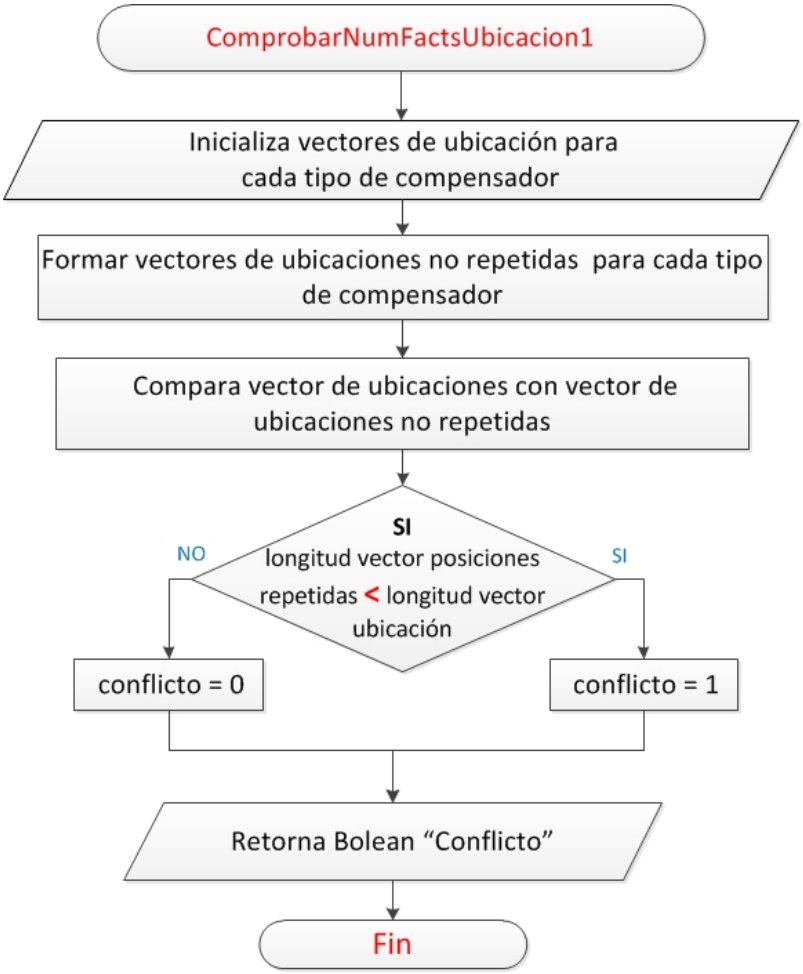
Algoritmo para Comprobación de Ubicación de Compensadores

El código para la comprobación de la ubicación de compensadores son en realidad dos funciones, cada una de ellas comprueba una de las restricciones de ubicación y para seleccionar entre ellas se introducirá un parámetro configurable de seleccion que podrá ser cambiado por el usuario.

Las dos funciones para comprobación de ubicación trabajan de manera similar emitiendo un bolean llamado conflicto, que de no haber inconvenientes con la comprobación de ubicación, su valor normal es 0, la diferencia entre las dos funciones se da en la forma de agrupar el vector de ubicación de los compensadores.

El principio de comprobación de ubicaciones de estas funciones es comparar la longitud de la cadena de caracteres no repetidos del gen2 (posiciones de compensadores) con el número total de compensadores que se tengan, de modo que si es menor quiere decir que hubo una posición repetida por lo tanto un conflicto.

Algoritmo 2.1 Función NumFactsUbicacion



Nota:

Las funciones que comprueban la ubicación de los compensadores son invocadas luego de generar un individuo ya sea en la población original o en una operación de cruce o mutación.

El comando utilizado para obtener el vector con las ubicaciones de compensadores que no se repitan es el "unique", que una función propia de matlab.

2.1.3. Número de Variables por Compensador

Este problema es introducido exclusivamente por el compensador UPFC, que a diferencia de los otros compensadores utiliza dos parámetros de configuración que son el voltaje y ángulo de modificación que producirá el compensador sobre los valores de las barras a las que está ligado el ramal del compensador.

La doble variable de control del UPFC es motivo de un trato especial a lo largo de todo el algoritmo genético y requiere una constante comprobación de ubicación con respecto al vector del gen1, para facilitar esta comparación reiterativa a lo largo del código de programación. Se opto por colocar las variables del UPFC por grupos del mismo tipo, es decir que si se tuviera más de un UPFC se colocarán primero todas las variables de voltaje y luego todos los ángulos, esto permite ubicar más fácilmente dentro de un bucle las variables referidas a un número fijo de UPFC.

2.1.4. Magnitudes de Compensadores

Durante la asignación de magnitudes en el gen3 de variables de control para los FACTS surge el problema de manejar la heterogeneidad entre rangos de compensadores o yendo más allá, simular el caso del algoritmo ya en ejecución y se quiera cambiar los rangos de los compensadores sin que se necesite cambiar el código del algoritmo.

Como método de solución para este conflicto se opta por utilizar un número real entre cero y uno que represente el porcentaje de la capacidad máxima que tomara el compensador. Como manera de ejemplo si el valor de la magnitud se encuentra en cero y el rango del compensador va de -0.5 a 05, el valor real de ese alelo en el flujo de potencia equivaldrá a -0.5, de similar manera para el mismo caso, si el valor del alelo en gen3 es 0.5, en el flujo de potencia equivaldrá a una magnitud de cero.

La implementación de esta solución involucra que se cree otra función, que tome los rangos de los compensadores y convierta los valores del gen3 entre cero y uno a los reales de las magnitudes de los compensadores, este nuevo vector gen3 con magnitudes ajustadas se llamara evalGen3.

Figura 2.1: Ejemplo de un Cromosoma Codificado para Operadores Genéticos

La figura 2.1, muestra un cromosoma codificado de la manera que se lo hace en el algoritmo, en el fenotipo mostrado se distinguen las tres secciones o genes que lo forman, la dirección de lectura para la información del cromosoma es de izquierda a derecha y los alelos de cada gen se corresponden entre sí según su posición.

La lectura del cromosoma de la figura 2.1 indica lo siguiente:

- Gen1

  -Tres compensadores

  -Dos compensadores de tipo 1 (SVC)

  -Un compensador de tipo 3 (UPFC)

- Gen2

  -Posición del primer SVC en la Barra 4

  -Posición del segundo SVC en la Barra 5

  -Posición del UPFC en el Ramal 9

- Gen3

  -La magnitud del primer SVC es 0.47 del rango

  -La magnitud del segundo SVC es 0.82 del rango

  -La magnitud del UPFC es 0.89 del en magnitud de voltaje y 0.91 del rango en angulo de voltaje.

Luego de ajustar los valores del gen3 con los rangos de cada compensador con el fin de obtener un cromosoma con la totalidad de valores que se puedan utilizar en el flujo de potencia se obtiene el cromosoma de la figura2.2, los rangos utilizados para los SVC fueron entre -0.5 a 0.5, y para el UPFC en voltaje, -0.2 a 0.2 p.u. y en ángulo de voltaje -20 a 20 grados.

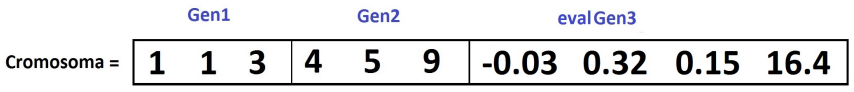


Figura 2.2: Ejemplo de un Cromosoma Codificado para Flujo de Potencia

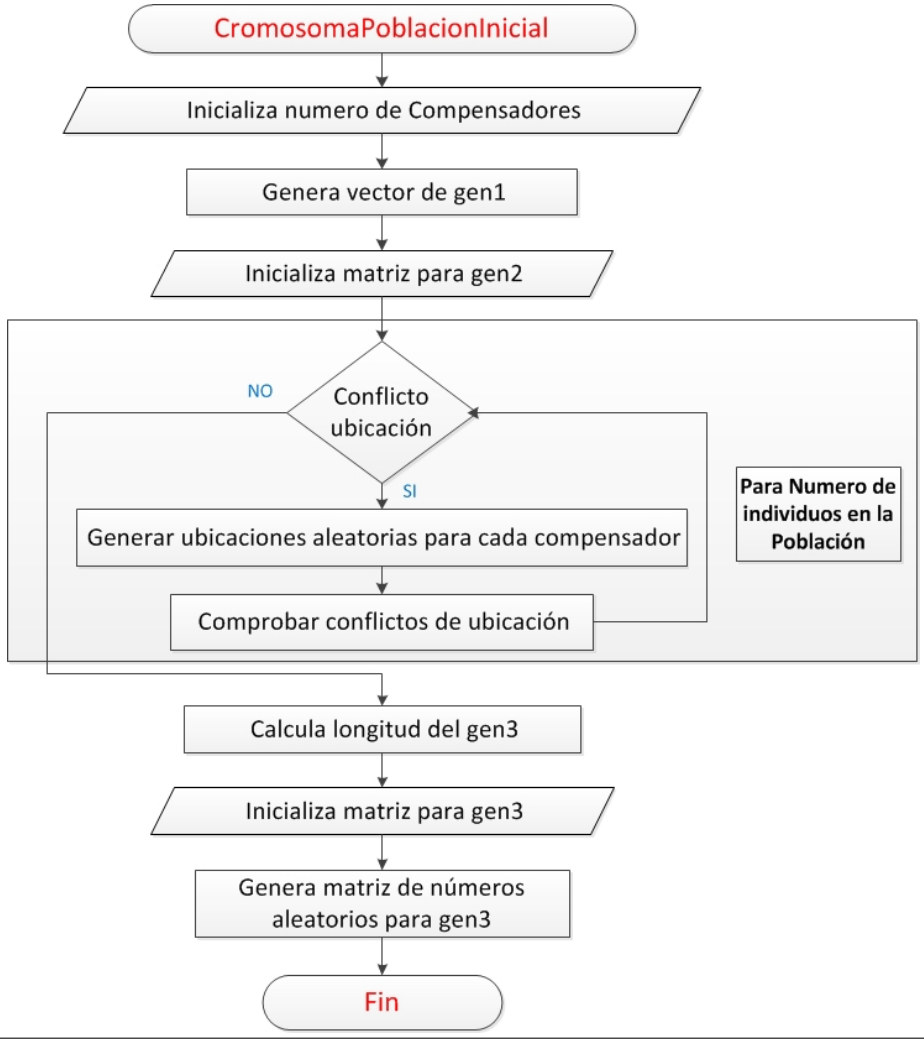
Como se observa en la figura 2.2, la adaptación de los rangos a la tercera parte del cromosoma deja atrás lo problemas por la variación de rangos que puede darse en los compensadores, ya que solo se requiere cambiar la referencia de los rangos para que los valores se adapten a su nueva magnitud, además se obtiene una característica de robustez adicional, que será útil a futuro para hacer al algoritmo genético compatible con rangos que incluyan números negativos.

Algoritmo para Generar Población Inicial

El algoritmo para formar la población inicial de individuos debe considerar todas las restricciones mencionadas para formación del código de los cromosomas, en este caso el método para codificar

el cromosoma de cada individuo utiliza la generación de números aleatorios para dos secciones bien definidas, la ubicación de los compensadores y las magnitudes de las variables de control.

Algoritmo 2.2 Función CromosomaPoblacionInicial



Nota:

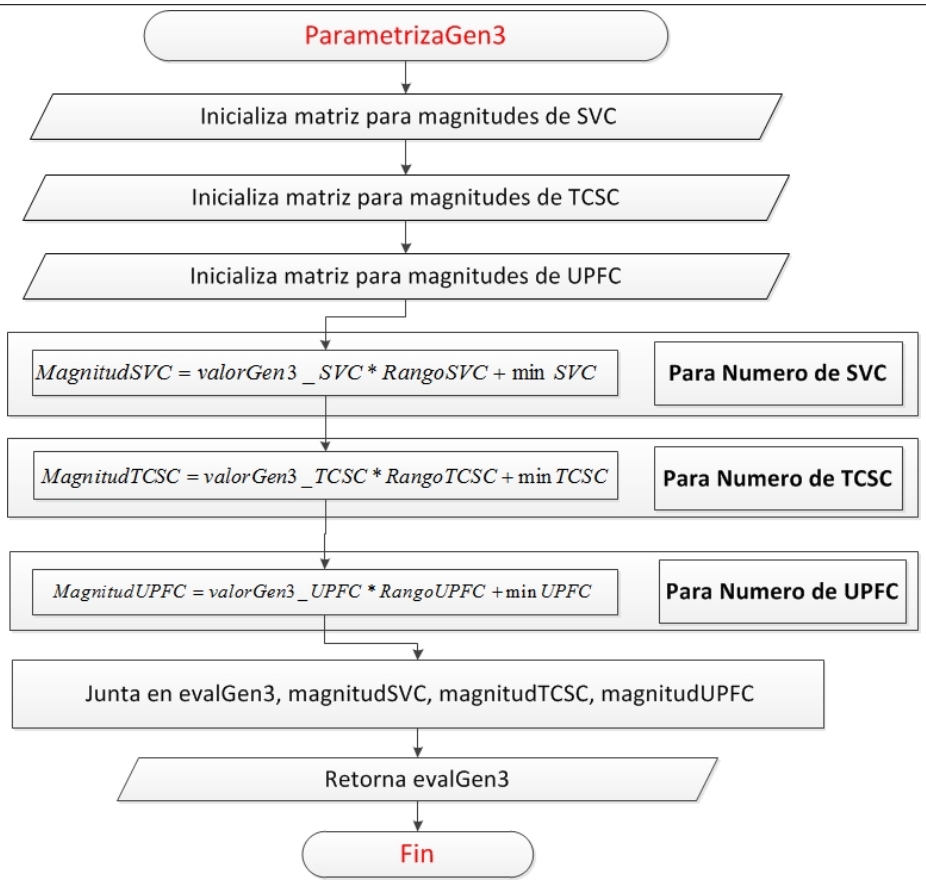
Para la generación de las posiciones de compensadores se utiliza la orden “randperm” de matlab que genera una permutación aleatoria de números enteros, mientras que para las magnitudes de compensadores en el gen3 se utiliza el comando “rand”, que entrega un arreglo de números dobles entre cero y uno.

La generación de números aleatorios con la función de permutación implícitamente cumple la primera restricción de ubicación que indica que se pueden tener dos compensadores de distinto tipo sobre el mismo ramal por lo que la comprobación del tipo de ubicación solo se lo hace para el segundo tipo de restricción que limita a que ningún ramal o barra tenga más de un compensador cualquiera fuere su tipo.

Algoritmo para Parametrizar Gen3

La parametrización del gen3 se hace a través de una función por la característica que tiene al ser llamado para cambiar el gen3 de la primera población y de cada generación de descendencia.

Algoritmo 2.3 Función ParametrizarGen3



Nota:

El cálculo que se hace equivale a pasar de un valor porcentual a un equivalente numérico, multiplicando el valor porcentual por el rango y sumando el valor mínimo que del compensador, para dar un punto de referencia a la magnitud resultante.

2.2. Función de Bondad

La función de bondad o Fitness en ingles, es el método de evaluación para la aptitud de un individuo, actúa tomando la información de cada individuo de la población y lo evalúa en el problema de optimización, posteriormente toma los resultados obtenidos y les asigna un valor de bondad proporcional, a que tan buen ajuste tengan dichos resultados en la solución del problema.

En cada problema de optimización los objetivos a alcanzar pueden interpretarse de distinta manera, o incluso en un mismo problema puede darse prioridad a un parámetro de búsqueda en especifico, por lo que la función de bondad al igual que la codificación no está establecida de la misma manera

para todos los casos de optimización y en cada problema debe plantearse un método de evaluación y asignación de bondad acorde a las características de optimización que se pretendan alcanzar.

2.2.1. Evaluación de Bondad

En el presente documento el problema a resolver que se plantea es la optimización de posición y magnitud de compensadores flexibles, optándose por tomar una función de bondad pura, la misma que toma el valor de bondad a partir de la naturaleza propia del problema sin mayores adaptaciones.

Por el mero hecho de estar tratando con sistemas de potencia y flujos sobre las líneas de transmisión, el método de evaluación serán los flujos de potencia y la asignación de la bondad se evaluara a través de nociones de operación de voltaje en las barras y límites operativos sobre las líneas, esto quiere decir que la evaluación del ajuste de cada individuo dependerá de dos magnitudes.

Para estimar la bondad del voltaje primero se define el voltaje ideal de operación del sistema o voltaje nominal de operación y se lo compara con el voltaje en cada barra del sistema a través de una operación de sustracción, debido a que los valores obtenidos son muy pequeños y al aproximarse más al voltaje objetivo tienden a hacerse más pequeños, la función bondad de los voltajes se calculará a través de la suma de los valores inversos absolutos de cada comparación, así se logra tomar provecho de que a cuanto más se aproximen los voltajes de las barras al objetivo, mayor será la bondad resultante.

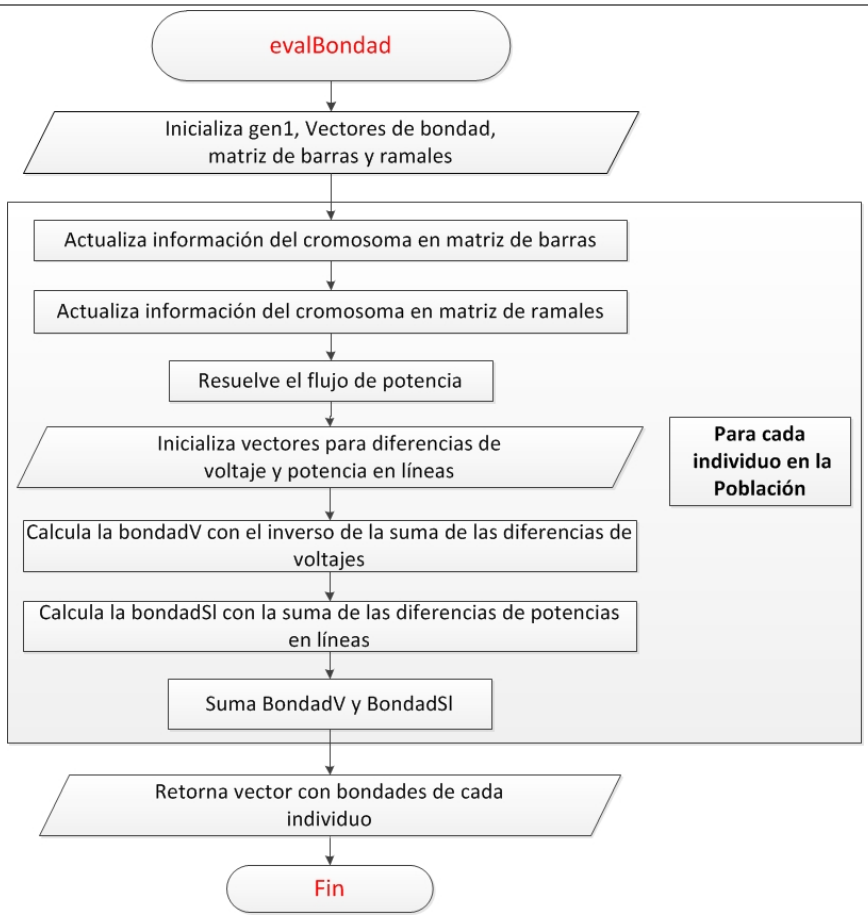
En el caso del valor de bondad producto de las potencias sobre los ramales se utilizara un principio similar al utilizado en los voltajes, que es el de comparar en este caso los límites de potencia de cada ramal con las potencias que circulan en cada uno de ellos y a través de una operación de resta, definir un coeficiente por cada línea, en este caso la sumatoria ya no requerirá de números absolutos puesto que los números negativos serán considerados como violaciones en límites de potencia y contribuirán a la reducción del valor de la bondad, tampoco se usara la operación inversa por ser cantidades ya considerables y que de por si son proporcionales al objetivo que se pretende alcanzar, que es una mayor diferencia entre potencia sobre ramal y límite máximo de mejor ajuste.

Para un análisis futuro se puede considerar la idea de introducir un factor de multiplicación a este valor de bondad para que tenga mayor predominancia en comparación con el valor de bondad del voltaje o viceversa.

Algoritmo para Evaluación de Bondad

La función de bondad es de las más importantes en el algoritmo genético y depende de cómo se utilice para asignar un valor de bondad al evaluar cada individuo, incluso puede cambiar el rumbo que tome el algoritmo genético en la busqueda de una solucion.

Algoritmo 2.4 Función EvalBondad



Nota:

Para evaluar la bondad se reciben la matriz de la población y se evalúa cada individuo o cada línea, para ello una sección de decodificación es necesaria aparte de la que parametriza el gen3.

2.3. Estrategia Evolutiva

Las bases de las estrategias evolutivas fueron apuntadas en 1973 por Rechenberg en la obra "Evolutionsstrategie: Optimierung Technisher Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution " (Rechenberg,1973).

Estrategia $(\mu + \lambda) - ES$

En esta estrategia de evolución un total de μ padres generan un número λ de descendientes y para reducir de nuevo la población al tamaño establecido, se utiliza una selección de individuos en función del valor de ajuste o bondad que tengan.

Como resultado se obtiene una población de individuos que pueden incluir a los padres e hijos que participaron en el último cruce, para que sean padres de la siguiente generación.

Estrategia $(\mu\ ,\ \lambda) - ES$

Para este caso un total de μ padres generan un número λ de descendientes y a diferencia del método anterior los padres de la siguiente generación son seleccionados de entre un grupo exclusivo de descendientes, los padres de la anterior generación ya no entran en competencia durante la reducción de la población al tamaño establecido.

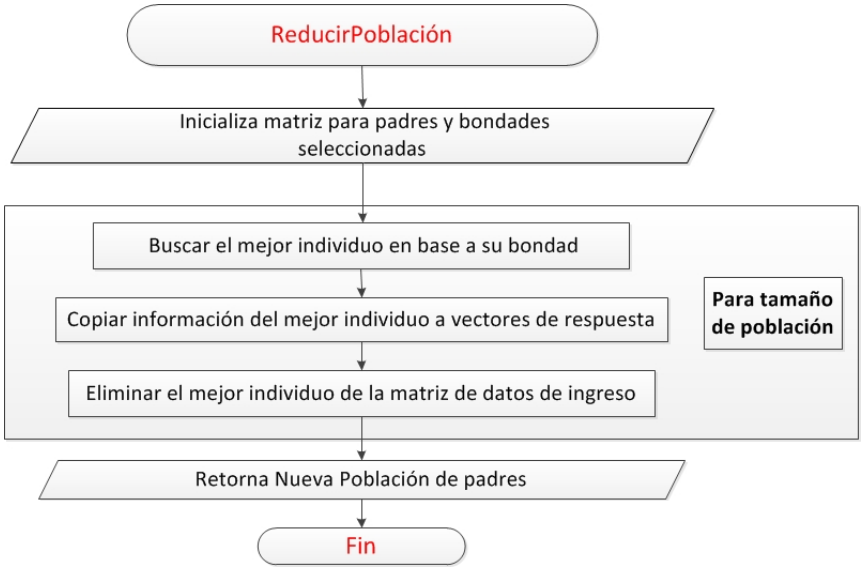
Esta estrategia tiene el inconveniente que la solución más viable en cierto punto pueda ser eliminada y no obtengan mejores individuos en generaciones futuras, lo que lleva a que el método apunte a una buena solución.

Para compensar la falta de esta estrategia se puede utilizar el concepto de elitismo, el mismo que toma al mejor individuo de la generación anterior y lo transfiere directamente al grupo de padres de la siguiente generación, esta opción asegura que el resultado del método siempre aumente su valor de bondad según pasan las generaciones.

Algoritmo para Reducción de Población

Según la estrategia evolutiva que se elija se pueden tener más o menos individuos candidatos a padres en la siguiente generación pero entre los conceptos del algoritmo genético no se considera un aumento del número de la población inicial por lo que hay que reducirla a este tamaño.

Algoritmo 2.5 Función ReducirPoblacion



Nota:

El proceso seguido es equivalente a una eliminación sistemática del mejor sujeto, claro que antes se copia su información en la matriz respuesta para padres de la siguiente generación, el proceso termina cuando se cumple una cota de población mínima, la función no es invocada a menos que antes se haya comprobado que el número de individuos es mayor a la población programada como referencia.

2.4. Operadores de Selección

Los algoritmos de selección son los encargados de escoger las parejas de individuos que van a ser los padres de las siguiente generación, estos operadores genéticos al tratar de imitar la selección natural, suelen estar encaminados a brindar mayores oportunidades de cruce a los individuos con mejor ajuste de bondad, aunque tampoco se deja de lado el azar que puede tener lugar durante la evolución de una colonia.

Los métodos de selección pueden ser distinguidos en dos grandes grupos diferenciados por el método de selección que puede ser probabilista o determinista, en el primer caso la selección de los padres y posterior emparejamiento se hace de manera aleatoria de entre un conjunto de posibles padres, en el segundo método de selección se utiliza la medida de la bondad de un individuo para ayudar a definir la mejor opción para padres o al menos darle mayores posibilidades de cruce y que pueda transmitir las bondades de su ajuste a la siguiente generación.

Entre los mucho métodos de selección que se pueden encontrar para algoritmos genéticos, se escogieron algunos de los más básicos y difundidos mostrados en la literatura de [9], como son; Selección por Ruleta, Selección por Torneo Determinista y Selección por Torneo Aleatorio.

2.4.1. Selección por Ruleta Determinista

El método de selección debe su nombre a que simula el girar de una ruleta en la que la aguja que indica al ganador se representa a través de un número aleatorio generado para cada operación de selección, y las casillas de las opciones se distribuyen con los especímenes de la población, las casillas se distribuyen en función del porcentaje de la participación de la bondad del cada individuo referenciada respecto a una bondad sumatoria de toda la población. Dar mayores oportunidades de cruce a los individuos más aptos no significa llegar a eliminar a los menos adaptados, es recomendable mantener la diversidad en la población, al menos durante las primeras generaciones.

Como ejemplo para ilustrar esta operación observar la figura 2.3, que muestra un grupo de 5 individuos con bondades asignadas a cada uno de ellos, en la parte derecha de la figura se observa como la asignación de la ruleta favorece al individuo 5 que tiene una mejor aptitud y por el contrario desfavorece al primero, cuando se genere el número aleatorio de selección pero sin llegar a eliminar la posibilitad que este segundo sea el elegido.

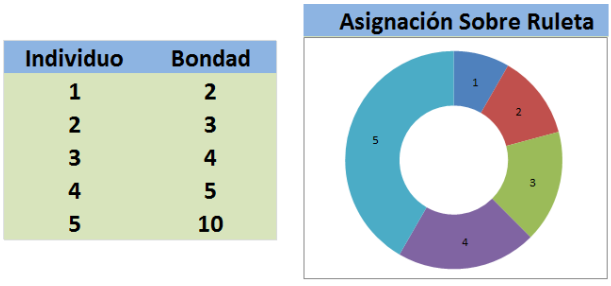
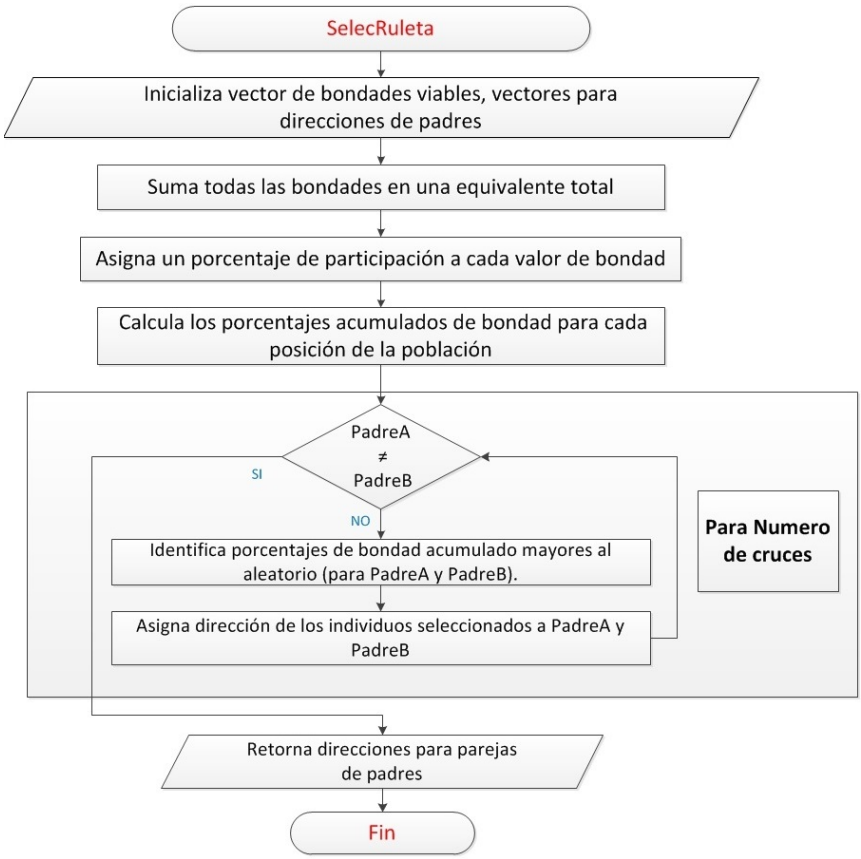


Figura 2.3: Ilustración de la Operación de Selección por Ruleta

Los inconvenientes que se pueden presentar en este método es que da la posibilidad latente a que individuos menos aptos puedan reproducirse en múltiples ocasiones produciendo un estancamiento en la evolución del método.

Algoritmo para Selección por Ruleta Determinista

Algoritmo 2.6 Función SelecRuleta



Nota:

La identificación del individuo seleccionado se hace a través del vector de porcentajes de bondad acumulados, este vector toma los porcentajes de todos los individuos y los va sumando según avanzan las posiciones hasta llegar al último individuo que ajustará la unidad o lo que equivale el 100 %, este vector permite identificar al individuo seleccionado utilizando un valor entre 0 y 1 bajo el criterio de que el sujeto seleccionado será el primero que tenga el porcentaje de bondad acumulado mayor al valor de selección.

2.4.2. Selección por Torneo Determinista

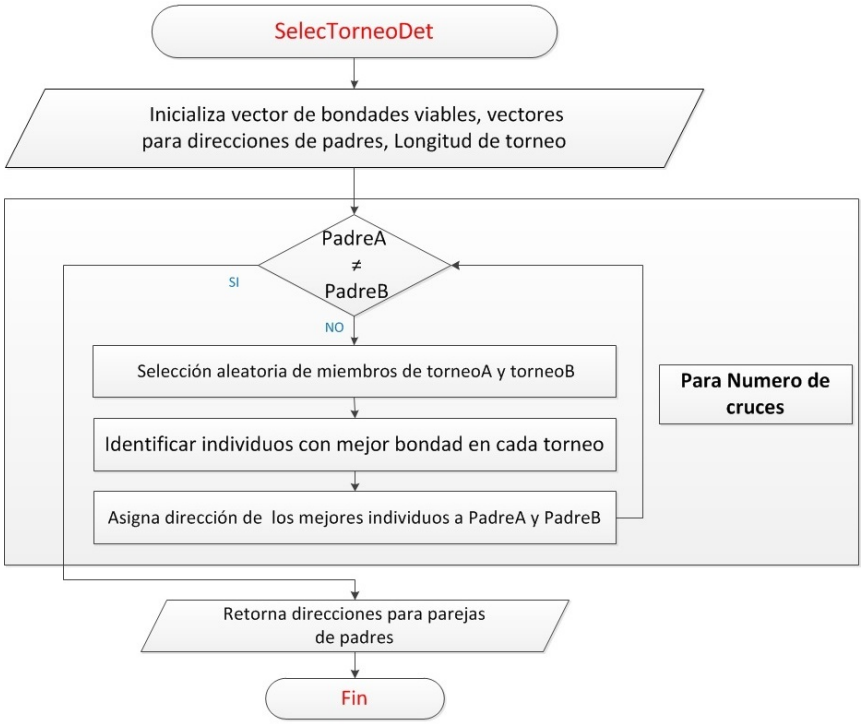
En este método de selección su nombre provoca una idea bastante intuitiva de la forma de selección que se emplea y es la de simular un torneo por la supervivencia del más apto. Con el valor de bondad asignado como regla de medición este método otorga la posibilidad de cruce al mejor

individuo de un grupo seleccionado aleatoriamente.

Este método es similar al de selección por ruleta en cuanto utiliza el valor de la bondad para definir al mejor individuo, pero en contraste con el otro método este tiene mayor control en cuanto a las presión de selección que se puede ejercer sobre el método al poder cambiar libremente el número de miembros que son elegidos para participar en cada torneo, un mayor número de individuos por torneo significa una mayor presión de selección ya que los individuos menos aptos tienen menos posibilidades de sobresalir, a menos que sea entre un grupo de bajas prestaciones de bondad.

Algoritmo para Selección por Torneo Determinista

Algoritmo 2.7 Función SelecTorneoDet



Nota:

Los vectores para direcciones de padres están formados por los números correspondientes a la posición del individuo sobre la matriz de las bondades viables, esta última establece el vínculo entre las direcciones de padres seleccionados con la información de los individuos.

Los torneos se generan para cada padre y se toma como opción válida siempre y cuando los padres ganadores sean diferentes, es decir no puede seleccionarse un individuo como pareja de cruce de si mismo.

2.4.3. Selección por Torneo Aleatorio

La similitud con el método de torneo determinista se mantiene en la selección de un número determinado para formar parte de un torneo, la diferencia radica en que el ganador del torneo se

decide ya no por un criterio de mejor bondad o adaptación sino por otro número aleatorio.

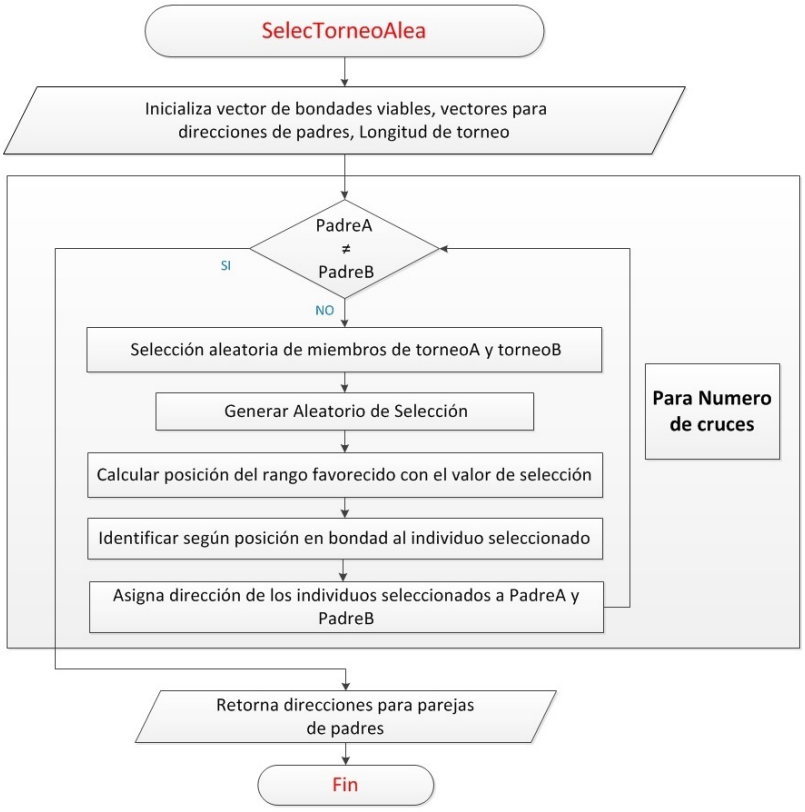
De similar manera la presión que se ejerce sobre la selección va en función del tamaño del torneo, brindando mayor presión de selección y menos probabilidades de cruce a individuos menos aptos cuando el tamaño del torneo se hace más grande.

Algoritmo para Selección por Torneo Aleatorio

Para el caso aleatorio el ganador del torneo se determina con otro número aleatorio, para seleccionar los individuos se divide a la unidad en el número de secciones equivalentes al número de participantes del torneo otorgando a cada miembro un rango equivalente, el ganador se determina según el rango en que se encuentre el aleatorio de selección generado.

La asignación de rangos tienen una condición más y es que se lo hace de modo ascendente con la bondad de cada individuo, es decir que los rangos más bajos tendrán asociadas bondades más bajas y mientras más alto sea el valor de selección aleatoria de mejor bondad será el individuo seleccionado.

Algoritmo 2.8 Función SelecTorneoAlea



Nota:

La identificación del individuo según la posición en la bondad, desplaza en orden a las peores bondades hasta llegar a la que equivale al rango favorecido y toma su dirección en el vector de bondades para copiarlo como la dirección de uno de los padres.

2.5. Operadores para Generación de Descendencia

El concepto de cruce aplicado a los algoritmos genéticos parte de la idea que si dos individuos correctamente adaptados a un medio generan un individuo que combine sus prestaciones de adaptación, este individuo descendiente podría tener las mismas cualidades de adaptación que los padres o incluso combinarlas y obtener una mejor adaptación al medio.

Las operaciones de cruce en los algoritmos genéticos son el medio principal para generar descendencia y los métodos y opciones que se tienen son muy variados. Aunque los métodos de cruce originalmente fueron pensados para cruces con cromosomas binarios, muchos también pueden ser utilizados para operaciones de cruce con números enteros como los mostrados a continuación:

* Cruce Múltiple Punto
* Cruce Uniforme
* Cruce de Promedios Reales

2.5.1. Cruce de Múltiple Punto

En la literatura vista en [9], no se trata este método como múltiple punto, sino como método de cruce de un punto y de dos puntos por separado porque los métodos de reproducción que tienen puntos de cruce como referencia tienen el mismo principio de operación, ya sea para un punto de cruce o más. Se ha creído conveniente presentarlo como un solo tipo de cruce con múltiples variantes en cuanto al número de puntos de cruce que pueda tener y los límites superiores e inferiores en que los puntos de cruce puedan ubicarse.

Los métodos de cruce por puntos genera dos hijos como descendencia y no tienen conflictos con la operación de números decimales o negativos ya que solo equivalen a configurar otro individuo respetando las posiciones originales de la configuración de los cromosomas.

Como ejemplos se muestran las figuras 2.4.a) y b), en la primera se ilustra un caso de cruce de un punto con el punto de cruce entre el alelo 4 y 5, los hijos producto de esta combinación mantienen muchas características intactas de los padres al menos al inicio o al fin de la cadena de código.

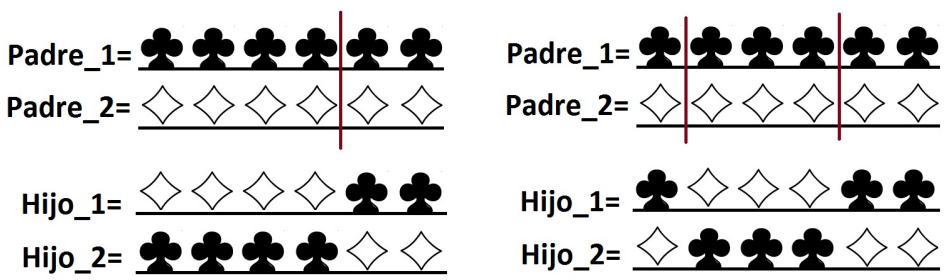


Figura 2.4: a).Ejemplo Cruce de 1 Punto b).Ejemplo Cruce de 2 Puntos

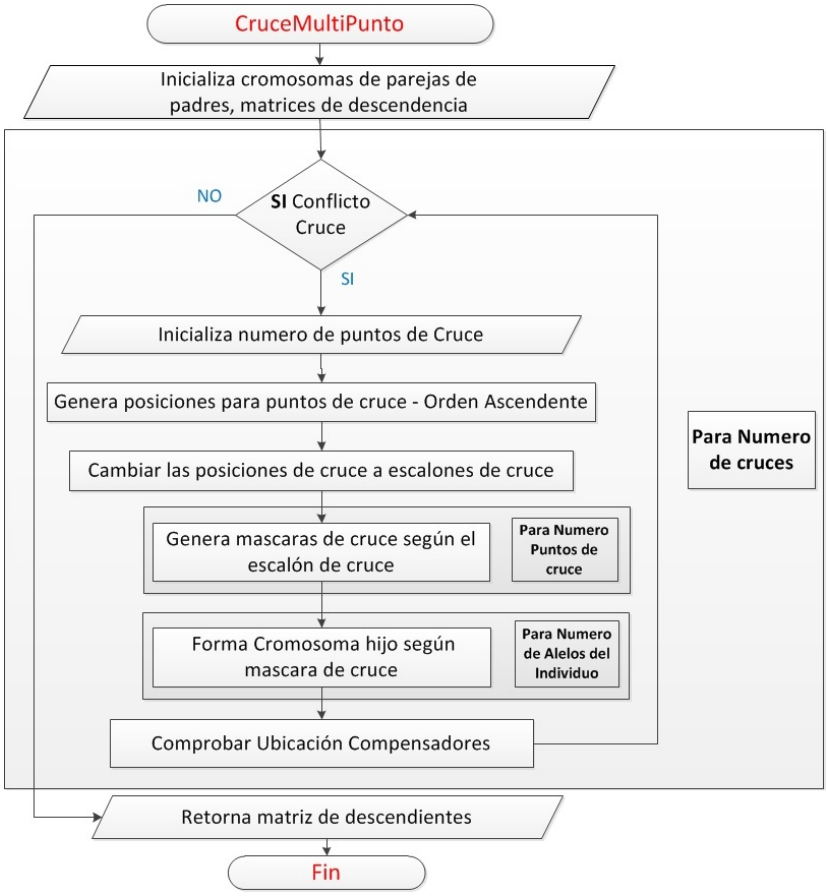
En la figura 2.4.b), se ilustra un cruce de dos puntos, en contraste con el cruce de un solo punto en este se ve como el intercambio de información entre padres es menos uniforme y a simple vista da más posibilidades de que se combinen características del inicio del cromosoma del padre1 con características iniciales del padre2, restara por comprobar a través de los resultados que se obtengan cual es la mejor decisión de si elegir mayor cantidad de puntos de cruce o no para el problema de flujos de potencia propuesto.

Desde este punto se puede hacer una observación en cuanto a que el tipo de cruce no hace que se generen nuevas posibilidades en cuanto a las magnitudes de los compensadores o sus posiciones, este método de cruce prácticamente se límita a reordenar las magnitudes de los cromosomas originales de modo que se encuentre la mejor respuesta adaptada al problema, pero por si no es capaz de producir nuevas magnitudes para los componentes de cromosoma.

Algoritmo para Cruce Multipunto

La función introducida para los cruces que tienen puntos de corte como referencia es una genérica llamada “CruceMultipunto”, esta función puede adoptar cruces con la cantidad de puntos de corte que el cromosoma lo permita, un caso especifico son los de cruce de un punto y cruce de dos puntos tratados como ejemplos en las figuras 2.4.a) y .b).

Algoritmo 2.9 Función CruceMúltipunto



Nota:

Para la formación de la descendencia se usa un método concebido en el cruce uniforme que usa una máscara o vector de direcciones para determinar cómo se distribuirán los alelos de los padres entre los hijos, este método y consecuentemente la función en sí, es una mejora de algoritmos antecesores, que fueron desarrollados para este proyecto considerando uno y dos puntos de cruce por individual.

Los puntos de cruce que se obtienen luego de generarlos son posiciones a lo largo del cromosoma y para poder ser utilizados en un bucle se ajustan para que indiquen cuantos alelos se recorren entre cada punto de cruce, a estas nuevas expresiones se le nombraron como escalones de cruce.

2.5.2. Cruce Uniforme

El método de cruce uniforme usa una máscara de números binarios aleatorios que indicaran la forma de repartir la información contenida en los cromosomas de los padres hacia los hijos.

La máscara de números binarios estará formada por la misma cantidad de alelos que los cromosomas de cada padre, cada alelo en cada posición indicara con un uno, que el HijoA tendrá el valor del PadreA en ese alelo o de lo contrario con un valor de cero en la máscara que adoptara en la magnitud del alelo del PadreB. Para el caso del segundo HijoB que se produzca, se realizarán las operaciones inversas y complementarias en la asignación de magnitudes para los alelos.

La figura 2.5, ilustra la formación de los descendientes de dos padres a través del proceso de cruce uniforme, como se puede observar el hijo1 es complementario a componentes de información genérica con respecto al hijo2.

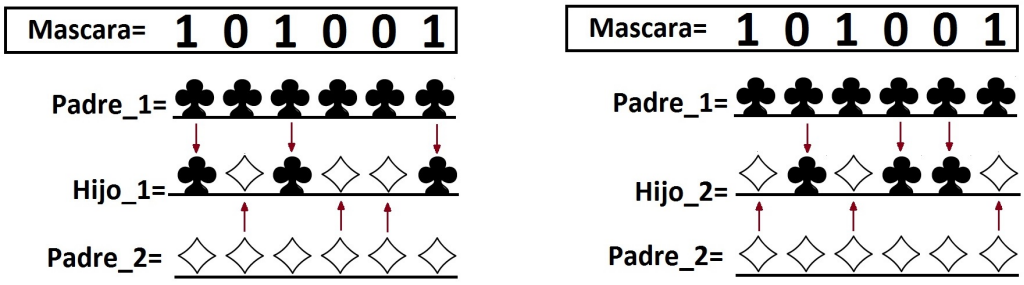
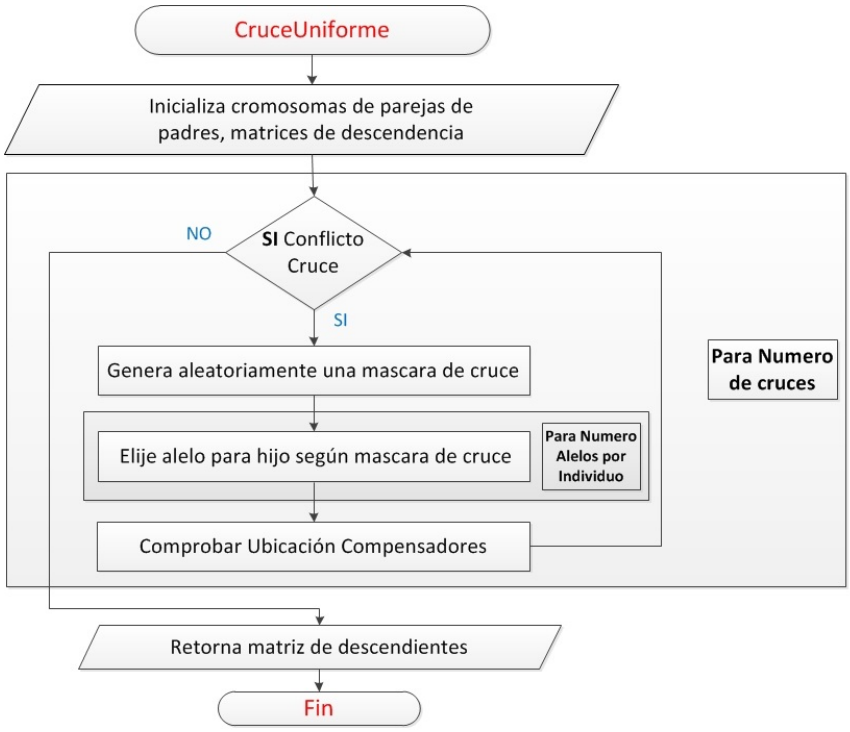


Figura 2.5: Ejemplo de una Operación de Cruce Uniforme

El cruce uniforme a primera vista podría considerarse como un método muy similar al presentado en el cruce de multipunto con un número de puntos de cruce elevados, salvo que el cruce uniforme al utilizar la máscara de números binarios aleatorios generados para cada operación de cruce.

Algoritmo para Cruce Uniforme

Algoritmo 2.10 Función CruceUniforme



Nota:

La máscara de cruce utiliza valores 1 y 2 que directamente diseccionan la posición de los padres cuando se forma la descendencia al elegir entre al padre.

2.5.3. Cruce de Promedios Reales

El cruce por medias reales utiliza la misma información de padres entregada por los operadores de selección para generar un solo individuo por cruce, por tanto para cumplir con una cota de descendencia se requerirán el doble de cruces que los métodos mostrados anteriormente, además de la desventaja del número de cruces requeridos este método de reproducción es exclusivo para números reales y muestran cierta vulnerabilidad para trabajar números negativos.

La principal ventaja de estos métodos es que a primera vista muestran una mejora al producir cierta variación sobre los valores que componen el código del cromosoma.

Promedio Aritmético

Este tipo de promedio toma los alelos de la misma posición en los cromosomas de los padres para someterlos a la expresión del promedio aritmético:

$$u = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^{n} A_i \tag{2.1}$$

En la figura 2.6 se ilustra un cruce por promedio aritmético.

Padre_1=	5	4	6	7	2	2
Padre_2=	4	2	4	5	6	9
Hijo =	4.5	3	5	6	4	5.5

Figura 2.6: Ejemplo de Una Operación de Cruce por Promedios Aritméticos

Promedio Geométrico

Este tipo de promedio también toma los alelos de la misma posición en los cromosomas de los padres para someterlos esta vez a la expresión del promedio geométrico:

$$u' = \left(\prod_{i=1}^{n} A_i \right)^{\frac{1}{n}} \tag{2.2}$$

En la figura 2.7, se muestra un ejemplo de cruce por promedios geométricos con los mismos padres utilizados para el ejemplo de media aritmética, se pueden comparar los hijos obtenidos y es fácil intuir la susceptibilidad de estos métodos frente a números negativos, en el primer caso se tendrán expresiones que varíen demasiado y en el segundo caso expresiones complejas.

Padre_1=	5	4	6	7	2	2
Padre_2=	4	2	4	5	6	9
Hijo =	4.47	2.82	4.89	5.91	3.46	4.24

Figura 2.7: Ejemplo de una Operación de Cruce por Promedios Geométricos

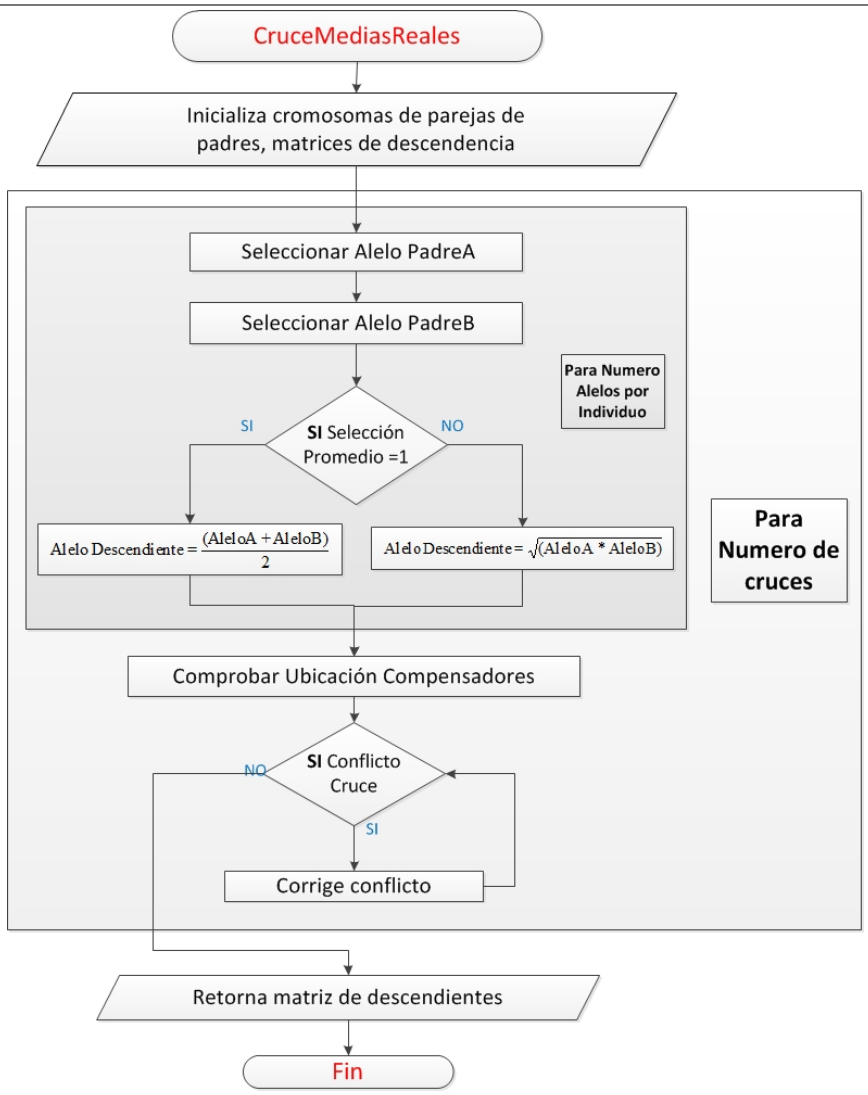
La desventaja del estos métodos frente a los números negativos es superada en el algoritmo al parametrizar las magnitudes de control de compensadores que ya se mencionó durante la construcción del código de cromosoma.

Algoritmo para Cruce de Promedios Reales

Los dos tipos de promedios son incluidos en un mismo algoritmo y la selección del método de promedio se lo hace a través de dos condicionales que evalúan el valor de la variable de tipo de media que con un valor uno corresponde a la media aritmética y dos para la media geométrica.

La aplicación directa de este algoritmo sobre el segundo segmento del cromosoma que contiene las posiciones de los compensadores necesitara de un ajuste adicional ya que las posiciones deben ser números enteros y el método de cruce puede producir decimales.

Algoritmo 2.11 Función CruceMediasReales



Nota:

En los dos tipos de promedios es inevitable encontrarse eventualmente con un problema de incompatibilidad en cuanto a la posición de los compensadores, y al no poder escoger otro punto de cruce o mascara para que satisfaga la restricción de ubicación, se opta por incrementar el código para que actué incrementando o reduciendo en una unidad la posición en conflicto.

2.5.4. Operador de Mutación

Otro aspecto importante que se observa en la evolución de una especie son los pequeños desequilibrios que la descendencia pueda adquirir en su código de información a través de factores externos que no hayan sido heredados desde sus padres, eventualmente estas variaciones pueden hacer que el hijo obtenga características que lo ayuden a subsistir en el medio de una mejor manera. Estas variaciones adquiridas se las simula con operadores de mutación que aleatoriamente alteran elementos de la cadena de un cromosoma.

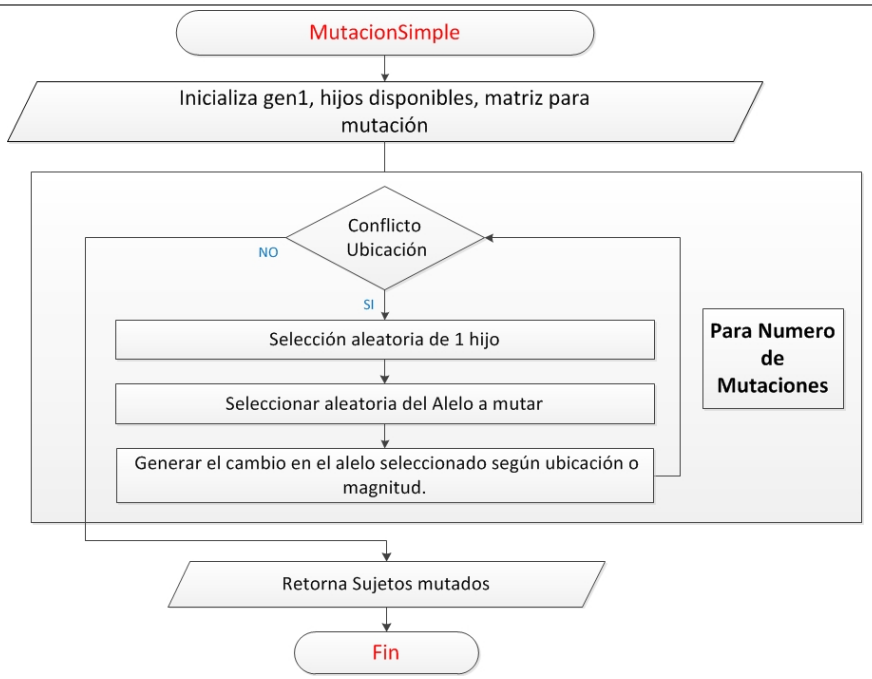
Como característica la mutación solo puede darse en la descendencia, no en la población original de análisis, también suele dejarse a criterio del usuario, el nivel de mutación que se tendrá aunque es usual que sea con muy poca frecuencia y a un nivel muy bajo, alterar uno o dos elementos de la cadena de información puede ser suficiente.

La figura 2.8, muestra dos especímenes producto de un cruce antes y después de la operación de mutación, como se observa la mutación no afecta necesariamente a los dos individuos ni lo hace de manera exagerada, basta con un cambio en uno de los alelos.

Figura 2.8: Ejemplo de una Operación de Mutación

Algoritmo para Mutación Simple

Algoritmo 2.12 Función MutacionSimple



La función de mutación simple funciona solo sobre la descendencia producida por el cruce, acorde con la suposición de que las mutaciones solo pueden darse en los hijos de una generación, mas no en los padres.

2.6. Algoritmo Genético Diferencial

"La evolución diferencial (ED) es uno de los algoritmos evolutivos más recientes introducido en 1994 por Price y Storn para resolver el problema polinomial de Chebychev, los autores propusieron al siguiente año la evolución diferencial como método para optimización de funciones no lineales y no diferenciables sobre espacios continuos."[**7**]

Los algoritmos diferenciales son un método de búsqueda estocástica y pertenecen a los métodos evolutivos porque se basan en una población de posibles soluciones y utiliza los principios de operadores genéticos como el cruce, mutación y los mecanismos de selección del mejor individuo entre padres e hijos para reemplazarlos en la población de padres de la siguiente generación.

La secuencia de un algoritmo diferencial básicamente tiene tres etapas, una primera de selección de individuos aleatorios como padres, restar cada elemento del código de los padres seleccionados y por ultimo sumar a un tercer individuo seleccionado de manera aleatoria el resultado diferencial del paso anterior.

La figura 2.9 presenta un esquema general del algoritmo diferencial tratado en [**7**]; En la figura se muestran con indices numéricos un proceso lógico para el desarrollo de un algoritmo diferencial.

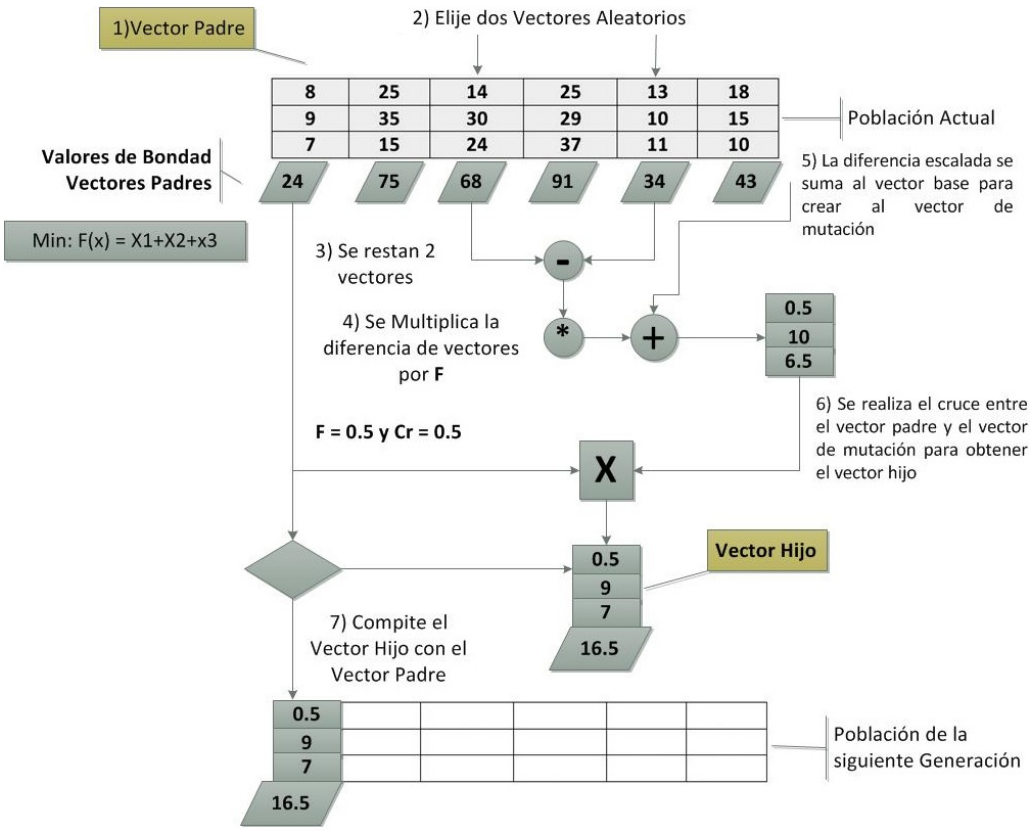


Figura 2.9: Esquema Genérico de un Algoritmo Diferencial [**7**]

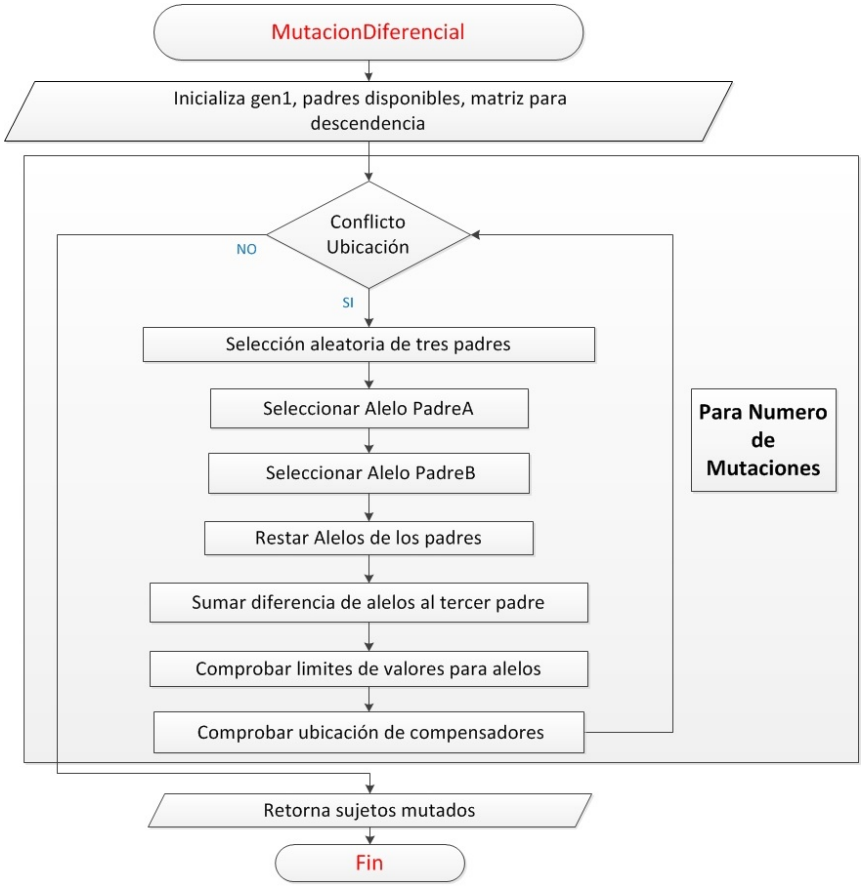
En orden se tiene como:

1. Vectores que forman la población inicial
2. Se escogen dos individuos al azar
3. Se los restan elemento a elemento los individuos seleccionados
4. Multiplicación del vector de diferencia por un coeficiente de ajuste de mutación, que puede ser la unidad, un valor fijo u otro aleatorio entre 0 y 1
5. Se suma el vector diferencia escalado a un tercer padre seleccionado aleatoriamente para obtener un arreglo con vectores de mutación
6. Cruce entre vectores de mutación con otros padres originales para obtener los hijos de la siguiente generación.
7. Se puede elegir si los padres de la anterior generación compiten o no con los hijos para formar parte de las siguiente generación de padres, depende de la estrategia de evolución escogida.

Algoritmo Para Mutación Diferencial

Como método para diversificar los valores de las población se utiliza parcialmente la evolución diferencial llegando solo hasta la generación de los vectores de mutación e introducirlos como elementos de competencia.

Algoritmo 2.13 Función MutacionDiferencial



2.7. Criterio para Maximizar Carga

El criterio utilizado para determinar el máximo nivel de carga que puede soportar el sistema con o sin compensadores se basa en, el concepto utilizado en[10], utilizando los voltajes en barras junto a las potencias transmitidas en los ramales, se determina si hay violación en las condiciones de operación del sistema o límites térmicos de componentes. Mientras se sigan satisfaciendo las condiciones de voltaje y potencia y en líneas se considera como una opción válida para esa configuración de compensadores y se puede intentar aumentar la carga del sistema para comprobar si se encuentra un nuevo punto de operación valido.

A lo largo de este proceso de aumento de carga las posiciones de los FACTS pueden cambiar para satisfacer las nuevas condiciones de operación satisfactoria del sistema y esta consideración será motivo de análisis posterior.

Este documento está destinado a la determinación de la capacidad máxima de transmisión que actualmente se puede obtener de las redes de un sistema, antes y después de la implementación de los compensadores flexibles en las mejores posiciones que dicte la solución del algoritmo genético, por lo que las capacidades de las líneas de transmisión no se verán incrementadas en ningún caso durante la ejecución de búsqueda del máximo coeficiente de carga que pueda soportar el sistema en su lugar se plantean dos escenarios, uno de incremento solo en la carga y otro de incremento equilibrado de carga y capacidad de generación.

En el primer escenario de incremento solo de carga, la barra de compensación y su generador ligado serán los que absorban todo el incremento de carga que se produzca, saturando más rápidamente como es lógico las líneas de transmisión ligadas a esta barra, pero en el segundo caso que se elige un crecimiento equilibrado de carga y capacidad de generación distribuido entre la mayoría, por no decir todos los generadores se busca comparar el impacto que pueden tener un crecimiento de generación y carga distribuido sobre el uso del sistema de transmisión vigente.

Capítulo 3

INTERFAZ GRÁFICA GUIDE MAT-LAB

Todos los algoritmos presentados hasta el momento fueron desarrollados sobre la plataforma de programación MATLAB, este software de cálculo también incluye características para programar entornos gráficos que sirven como interfaz para el usuario con el complemento GUIDE que de manera oportuna brinda la posibilidad de mejorar la presentación y el manejo del algoritmo, esta sección se enfocará en tres partes que son la estructura del programa y su manejo, las funciones de cálculo que utiliza y los reportes de resultados generados.

La interfaz gráfica básicamente utiliza dos pantallas, una primera de inicio con el nombre del proyecto y una segunda de simulación en la que se pueden cambiar los parámetros del flujo de potencia y el algoritmo genético de posición y magnitud de compensadores.

Pantalla de Inicio

Figura 3.1: Pantalla Inicial

La pantalla de inicio mostrada en la imagen 3.1 muestra el titulo del proyecto “Algoritmo para Obtener la ubicación optima de compensadores flexibles de corriente alterna para el mejoramiento de la capacidad de transmisión de un sistema eléctrico” y un grupo de botones elementales, el objetivo de esta ventana fue la de no sobrecargar aun más el espacio que ocupa la pantalla de selección de función y configuración que se muestra a continuación.

Los botones mostrados en la pantalla de inicio que se detallan en la imagen 3.2 realizan las siguientes acciones:

Terminar la aplicación y cerrar la ventana de inicio

Mostrar una pantalla con información del autor

Continuar a la siguiente pantalla con las opciones para ejecutar los algoritmos programados o configurar los parámetros que así lo permitan.

Figura 3.2: Detalle de Botones de Pantalla de inicio

Pantalla de Selección de Función y Configuración

La segunda y más importante ventana es la mostrada en la figura 3.3, en ella se seleccionan los algoritmos a ejecutar en base a los parámetros configurables que se muestran en la parte central y lateral derecha de la ventana.

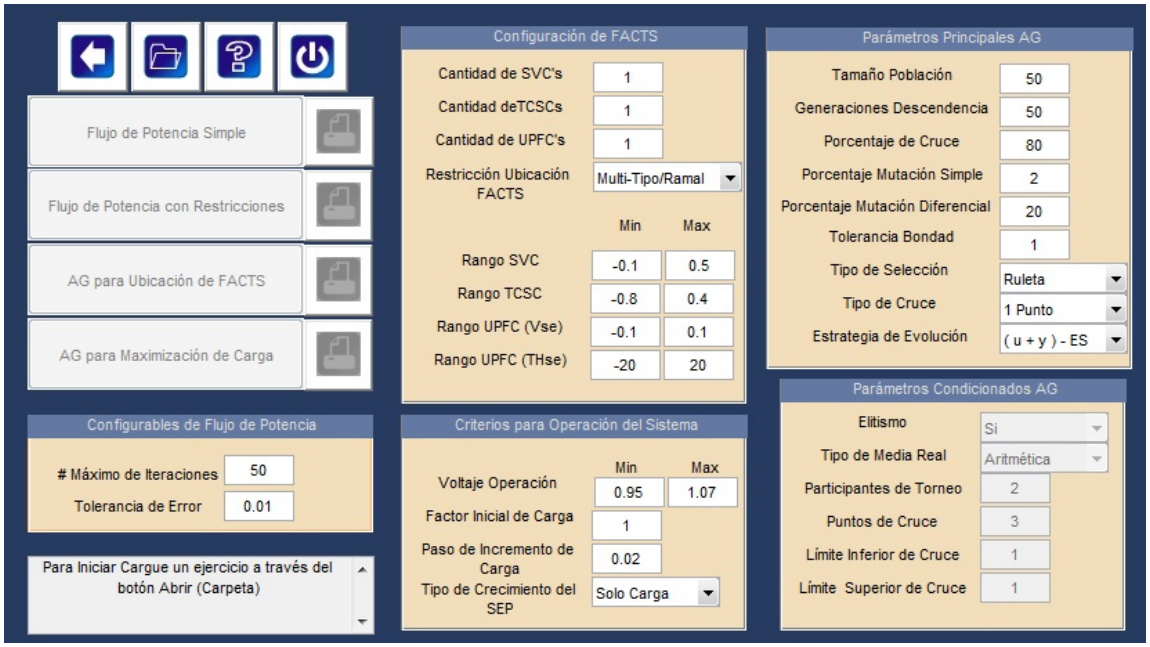


Figura 3.3: Pantalla de Selección de Función y Configuración

La figura 3.4 en si muestra los tres grupos de elementos entre botones y recuadros que posee toda la ventaja tanto para selección y configuración.

En la Sección superior una hilera de botones que realizan las acciones de Regresar a la pantalla de inicio, cargar o actualizar la información del sistema que se quiera analizar, mostrar una pantalla de ayuda con información para simulación, terminar la aplicación y cerrar la ventana.

En la sección media 4 pares de botones con los nombres de las funciones disponibles para la aplicación, a cada función le corresponde un botón para generar su respectivo reporte.

Por último en la sección inferior un panel titulado "Configurables de flujo de potencia", que muestra las opciones disponibles para ser alteradas en los flujos de potencia, como característica del grupo de elementos de configuración, todos los parámetros se encuentran agrupados bajo un panel en particular, los paneles de configuración restantes son los de configuración de FACTS, criterios para operación del sistema y parámetros del algoritmo genético.

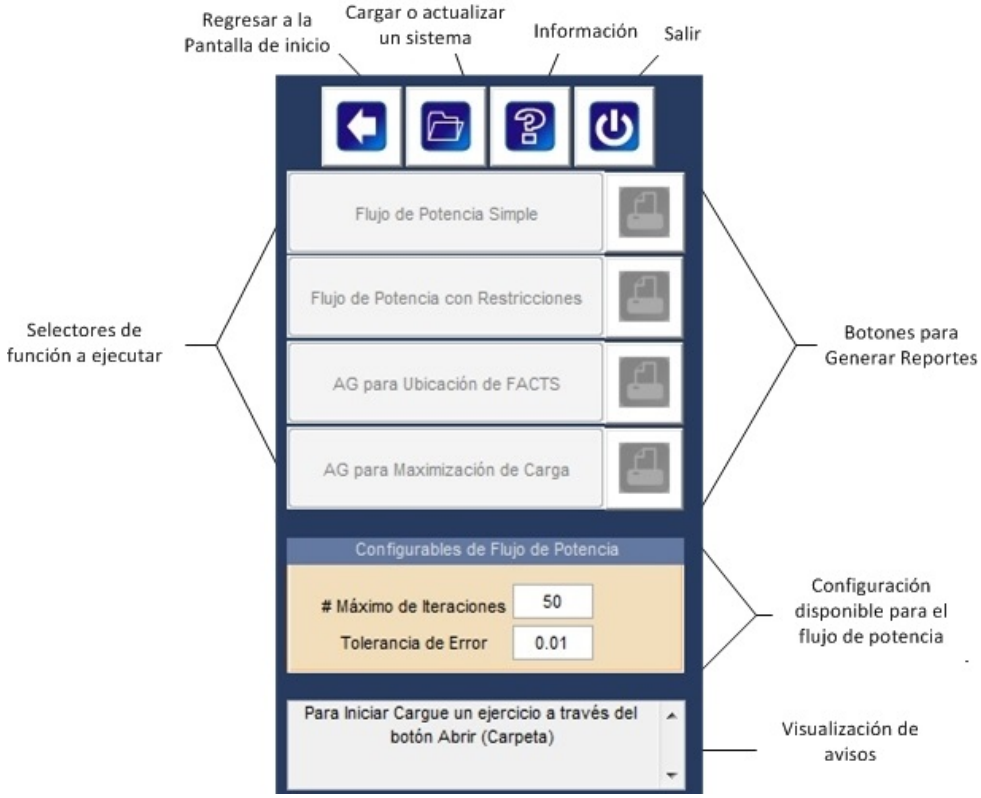


Figura 3.4: Detalle de sección 1 de Pantalla de Selección y Configuración

En la sección media de la pantalla de selección y configuración que se muestra en la figura 3.5 se tienen solo parámetros de configuración para los compensadores y los criterios de operación del sistema.

El panel de configuración de FACTS muestra la cantidad de compensadores, los rangos que se desea puedan alcanzar y las restricciones de ubicación a considerar. En el panel de criterios de ope-

ración del sistema se colocan los voltajes límites de estabilidad del sistema, un coeficiente de carga inicial, porcentaje de crecimiento y tipo de crecimiento del sistema. Los campos de restricción de ubicación de FACTS y tipo de crecimiento del SEP son opciones que solo permiten la manipulación entre un número fijo de opciones mostradas en la figura 3.5.

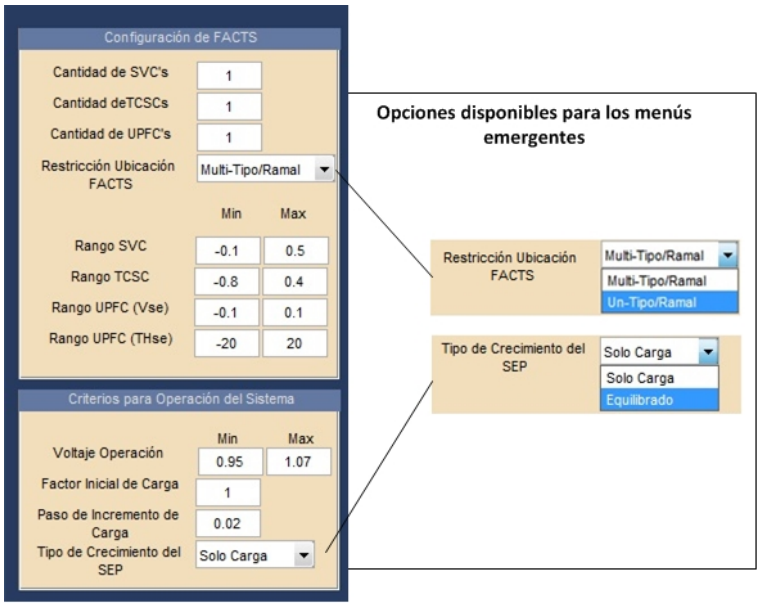


Figura 3.5: Detalle de sección 2 de Pantalla de Selección y Configuración

Por ultimo la sección mostrada en la figura 3.6 muestra los capos de configuración del algoritmo genético, mayormente los primeros parámetros son indices de porcentajes para la generación de la descendencia.

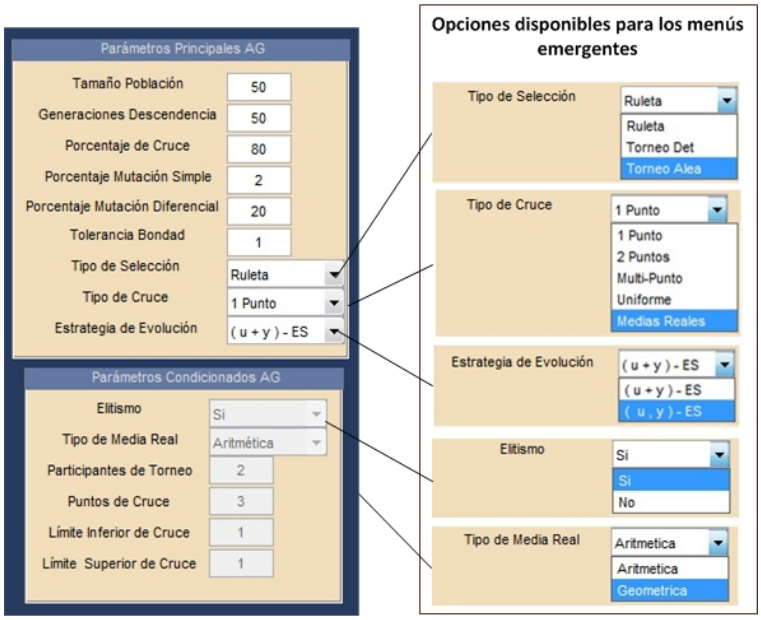


Figura 3.6: Detalle de sección 3 de Pantalla de Selección y Configuración

Al igual que en el panel central de la figura 3.5 también se incluyen campos con opciones emergentes, ademas como característica de esta sección de la ventana se muestra el panel titulado "Parámetros condicionados del AG", que son parámetros de configuración que solo sera posible su edición cuando se elija la opción adecuada en el panel superior, un ejemplo de ello es el tipo de cruce solo al ser seleccionado un cruce de medias reales habilitará la edición del tipo de promedio a usar, entre uno aritmético o uno geométrico, de ahí su nombre que estén condicionados a la selección de otra opción.

3.1. Funciones

Las funciones en si, son los algoritmos principales de la aplicación, se plantean cuatro algoritmos principales que tienen el objetivo de:

- Correr un flujo de potencia sin considerar restricciones.
- Correr un flujo de potencia con restricciones en los sistemas de generación.
- Optimizar la posición y magnitud de compensadores a través de algoritmos genéticos.
- Determinación de la máxima carga que soporta el sistema con compensadores y un optimo uso de compensadores.

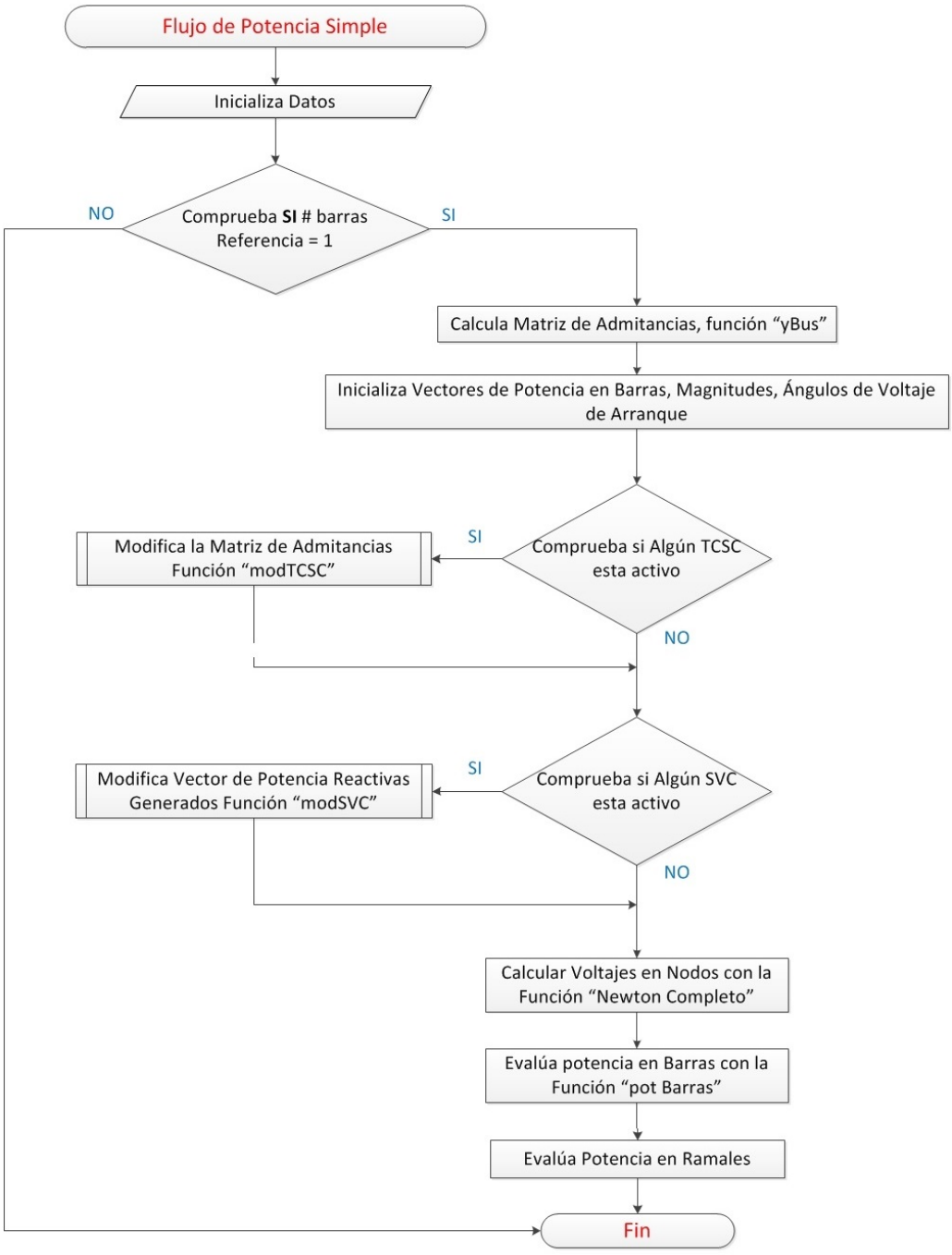
Esta última función en realidad es la que cumple con el objetivo del proyecto mientras que las anteriores son versiones parciales de ella que se planearon puedan ser útiles para complementar los análisis y comprender el proceso que se lleva a cabo tras el algoritmo de máxima carga sobre el SEP.

Cada función tiene asociada un reporte de datos en específico, el reporte que contiene mayor cantidad de información también en este caso es del algoritmo para determinar la carga máxima aunque los reportes de las otras funciones también poseen pequeñas características como el caso del reporte del flujo de potencia que al evaluar las posiciones de los compensadores y haber una violación en las condiciones de operación del sistema en el reporte se indicara, mientras que en el reporte del algoritmo de maximización de carga no se muestra este dato ya que las respuestas estarán en función de condiciones favorables máximas alcanzadas.

3.1.1. Flujo de potencia simple

Este algoritmo no considera restricciones en cuanto a los límites de generación, aunque si considera los efectos introducidos por los compensadores flexibles que estén activos. El proceso para el flujo simple de potencia es el siguiente:

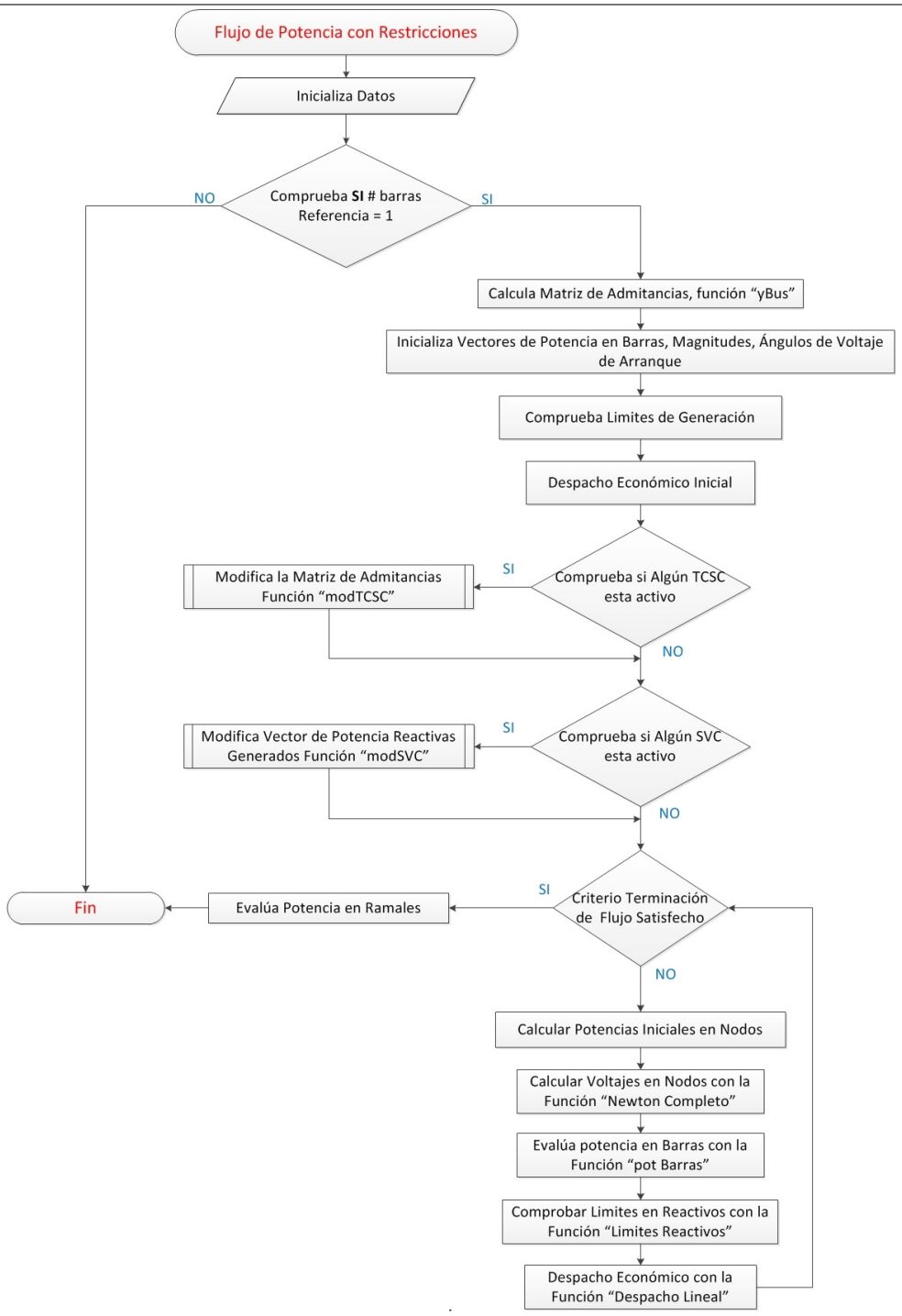
Algoritmo 3.1 Flujo de Potencia Simple



3.1.2. Flujo de potencia con restricciones

Este algoritmo considera los límites de generación de potencia activa y reactiva de los generadores así como los costos de generación en un despacho económico que considera la función de costo lineal. El proceso del flujo de potencia con restricciones es el siguiente:

Algoritmo 3.2 Flujo de Potencia con Restricciones

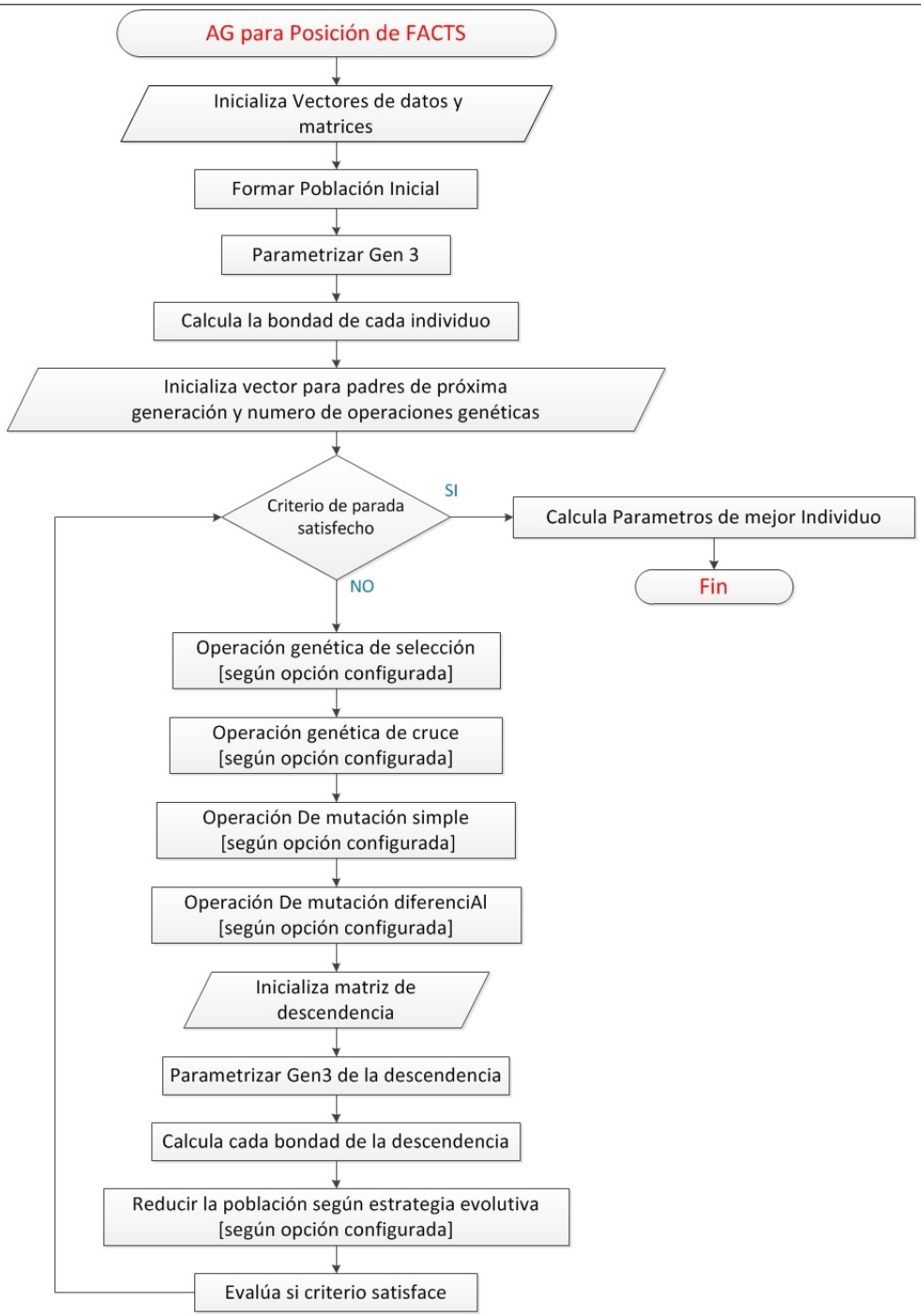


Los despachos económicos inicial y posterior a la convergencia del flujo de potencia se realizan para mejorar la velocidad de convergencia del método y para ajustar el despacho económico a los desajustes provocados por las pérdidas.

3.1.3. Algoritmo Genético para Ubicación de FACTS

Este algoritmo permite obtener la ubicación y magnitud de compensadores flexibles en un sistema de potencia, el algoritmo permite modificar los rangos de cada tipo de compensador y la configuración de los operadores genéticos utilizados, dando como resultado un número considerable de posibles combinaciones en cuanto a operadores genéticos.

Algoritmo 3.3 Algoritmo Genético para Posición y Magnitud de FACTS



Nota:

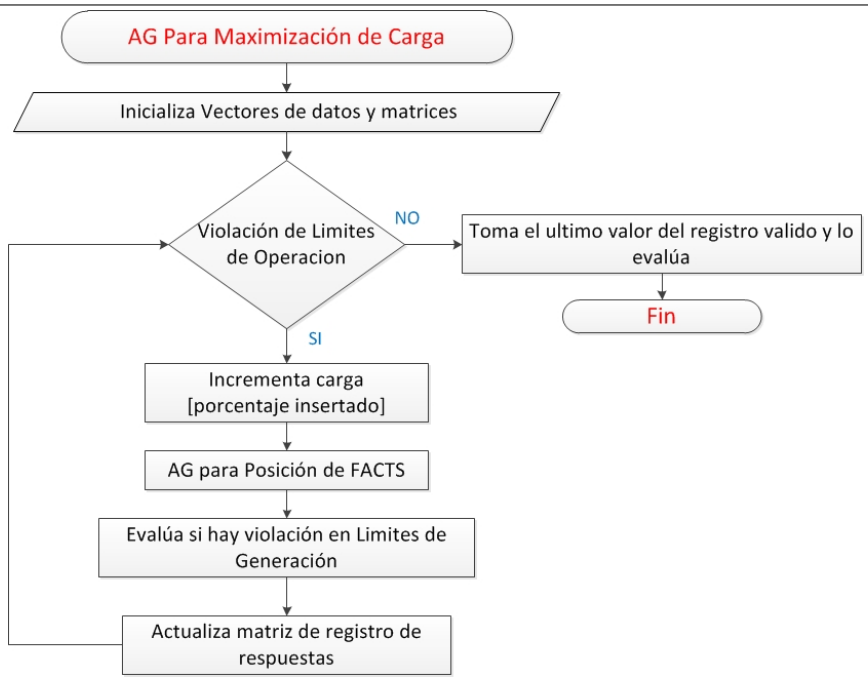
El criterio de parada para el algoritmo genetico está formado por dos condiciones, la primera es el número de generaciones y la segunda es la diferencia de la máxima y mínima bondad en la población, satisfacen una tolerancia mínima que quiere decir que se ha alcanzado cierta homogeneidad en la población.

Las estrategias de evolución afectan al criterio de parada y el tiempo de simulación, porque con un criterio de eliminación directa de padres, es menos probable que se alcance una homogeneidad en la población y el criterio de parada dominante tendera a ser el número de generaciones.

3.1.4. Algoritmo para Determinar Máxima Capacidad de Carga

Utilizando las soluciones del algoritmo genético con las mejores posiciones de compensadores que haya sido capaz de encontrar y aumentando la carga hasta que algún límite de operación sea superado son los puntos que hacen a este algoritmo diferente, el tiempo de duración de la simulación, se ve aumentado considerablemente en función del paso de incremento de carga y el porcentaje inicial de carga que se otorgue.

Algoritmo 3.4 Algoritmo Genético para Determinar Máximo Nivel de Carga del Sistema



Nota:

Durante la configuración un paso de incremento de carga más grande asegura que la ejecución del algoritmo dure menos pero el resultado de máxima carga tendrá menos resolución, aunque la duración de la ejecución del programa no depende solo de esto sino también de la configuración genética.

3.2. Reportes

Los reportes son el instrumento seleccionado para presentar los resultados de la simulación, la información contenida en los reportes se divide en 5 Campos:

Información del Sistema Original.- Muestra las matrices de información del sistema cargado, se pueden apreciar las características y límites de operación de las líneas, la asignación de carga, generadores, FACTS activos y sus magnitudes con las que afectan al sistema.

Configuración Utilizada.- Básicamente aquí se presentan las opciones escogidas a través de los 5 campos de configuración de la interfaz gráficas, para flujo de potencia, FACTS, Algoritmo Genético y Operación del sistema. En ciertas partes del reporte se incluyen pequeños avisos que se han considerado de importancia ya sea para comunicar alguna situación en especial durante la simulación o aclarar algún campo de la configuración.

Resultados de Simulación.- Muestra un resumen general del sistema, costos de generación, ubicación y magnitud de compensadores, voltajes en barras y potencias sobre ramales, con el algoritmo de maximización de carga si no se logra mejorar la capacidad de carga y el algoritmo se detiene ante el coeficiente de carga inicial, se mostraran los resultados del mejor ajuste alcanzado y un mensaje indicando que no se ha mejorado la capacidad de carga..

Registro de Optimización.- Es un campo que muestra los resultados de ubicaciones y magnitudes de los compensadores según aumenta el nivel de carga, el campo de registro tienen la característica de mostrar hasta la última combinación y posición de FACTS cuando el sistema entra en condiciones de violación de las condiciones de estabilidad..

Información de Matrices del Sistema luego de la Incorporación de FACTS.- Muestra las matrices de Ramales, Barras con los compensadores y matriz de generadores con potencia ajustada al coeficiente de carga más alto alcanzado en condiciones de operación satisfactorias.

Recuérdese que las magnitudes mostradas a lo largo del registro están en sus equivalentes por unidad cuando se trata de voltajes y potencias, mientras que para las magnitudes de los FACT cada caso es distinto, para el TCSC la magnitud mostrada es el porcentaje de reactancia del ramal al que esta acoplado, en el SVC su magnitud indica directamente la potencia reactiva en el sistema por unidad y para el UPFC el voltaje serie en por unidad y el ángulo en grados.

A continuación se presenta un reporte obtenido del sistema de prueba usado a lo largo del desarrollo de los algoritmos, el sistema contiene datos del modelo de 9 barras de la IEEE utilizados en las simulaciones del software de flujo de potencia MATPOWER, los cambios que se contemplan para simular este sistema en el software desarrollado son principalmente los relacionados a los costos de producción y potencias asignadas a barras. Las potencias de generación deben ser ajustadas a los resultados del flujo de potencia del programa original puesto que las expresiones de costo de producción son diferentes.

Información del Sistema Original

Matriz de Ramales Empleada

Org	Dest	R	XL	Y	Max1	Max2	Max3	Ang	Est. TCSC	Mag TCSC	Est. UPFC	MagV UPFC	MagTh UPFC
1	4	0.0000	0.0576	0.0000	2.50	2.50	2.50	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
4	5	0.0170	0.0920	0.1580	2.50	2.50	2.50	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
5	6	0.0390	0.1700	0.3580	1.50	1.50	1.60	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
3	6	0.0000	0.0586	0.0000	3.00	3.00	3.10	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
6	7	0.0119	0.1008	0.2090	1.50	1.50	1.60	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
7	8	0.0085	0.0720	0.1490	2.50	2.50	2.50	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
8	2	0.0000	0.0625	0.0000	2.50	2.50	2.50	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
8	9	0.0320	0.1610	0.3060	2.50	2.50	2.50	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
9	4	0.0100	0.0850	0.1760	2.50	2.50	2.50	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000

Matriz de Barras Empleada

#Barra	Tipo	P.Carga Barra	Q.Carga	V	AngV	Est. SVC	Mag SVC
1	3	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
2	2	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
3	2	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
4	1	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
5	1	0.900	0.300	1.000	0.00	0	0.0000
6	1	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
7	1	1.000	0.350	1.000	0.00	0	0.0000
8	1	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
9	2	1.250	0.500	1.000	0.00	0	0.0000

Matriz de Generadores Empleada

#Barra	Pot.P Genera	Pot.Q Genera	Pot.Q Maxima	Pot.Q Minima	Voltaje Genera	Pot.P Maxima	Pot.P Minima	Costo Medio
1	0.000	0.000	3.00	-3.00	1.00	5.00	0.10	2000
2	134.32	0.000	3.00	-3.00	1.00	1.00	0.10	2000
3	94.190	0.000	3.00	-3.00	1.00	1.00	0.10	2000

Configuración Usada

```
|=============================================================================|
|                      Configuración de Flujo de Potencia                     |
|=============================================================================|
| > Numero Máximo de Iteraciones:   50                                        |
| > Tolerancia de Error para Criterio de Paro en Flujo de Potencia: 0.01000   |
|_____________________________________________________________________________|

|=============================================================================|
|                            Configuración de FACTS                           |
|=============================================================================|
|                Tipo        Cantidad       Rango   de   Operación           |
|                                           Mínimo        Máximo              |
|_____________________________________________________________________________|
|               -SVC-            1            -0.10         0.50             |
|               -TCSC-           1            -0.80         0.40             |
|               -UPFC-           1            -0.10         0.10  (Mag Vse)    |
|                                            -20.00        20.00  (Ang Vse)    |
| Restricción de Ubicación:       Multiples FACTS de distinto Tipo en un Ramal |
|                                                                             |
| Nota: La Restricción de Ubicación no aplica a los Buses por haber solo un Tipo |
|       de compensador que se ubica en los Buses                              |
|_____________________________________________________________________________|

|=============================================================================|
|                      Configuración de Algoritmo Genético                    |
|=============================================================================|
|  > Tamaño De Población:                          50 Individuos              |
|  > Número Max Generaciones:                      50                         |
|  > Tolerancia de Bondad para Criterio de Parada:  1.000                     |
|  > Estrategia de Evolución:                      [ U + Y ]-ES               |
|  > Porcentaje de Mutación Simple:                2 Porciento                |
|  > Porcentaje de Mutación Diferencial:           20 Porciento               |
|  > Porcentaje de Cruce:                          80 Porciento               |
|  > Tipo de Cruce:                                1 PUNTO                    |
|  > Tipo de Selección para Parejas de Padres:     POR RULETA                 |
|_____________________________________________________________________________|
| NOTA: En esta estrategia de evolución los padres y descendientes entran en com-|
| petencia por pasar a la siguiente generación de padres.                     |

|=============================================================================|
|                      Criterio para Operación del Sistema                    |
|=============================================================================|
|  > Límites de Voltaje:                      Min: 0.950       Max: 1.070     |
|  > Factor de Carga Inicial del Sitema:      1.400                           |
|  > Taza de Crecimiento del sistema:         2.00 Porciento                  |
|        * Tipo de Crecimiento del Sistema:   Solo en Carga                   |
|_____________________________________________________________________________|
```

Resultados de Simulación

Resumen de Simulación

Cantidad		Magnitudes	P (MW)	Q (MVAr)
Barras:	9	Cap Generación:	7.00	-9.00 a 9.00
Generadores:	3	Generación Actual:	4.478	0.263
Cargas:	3	Cargas Actuales:	-4.422	-0.713
Ramales:	9	Pérdidas en Líneas:	0.056	0.901

> Costo Generación: 8955.87 Unidades
> Tiempo Simulación: 20.311 Segundos
> Máximo Factor de Carga Alcanzado 1.400

	Posición	Magnitud
> Compensadores SVC:	En Barra: 5	0.3501
> Compensadores TCSC:	En Ramal: 2	0.3027
> Compensadores UPFC:	En Ramal: 1	-0.0058 (Vse) , -1.1662 (THse)

Información de Operación

	Mínimos	Máximos
Magnitud-Voltaje:	0.9801 p.u. => Barra 7	1.0048 p.u. => Barra 6
Ángulo-Voltaje:	-15.817 grad => Barra 7	0.00 grad => Barra 1

Información de Barras

Barra	Voltaje		Generación		Carga	
	Mag(pu)	Ang(grad)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.000	0.000	2.478	0.170	0.000	0.000
2	1.000	-9.315	1.000	0.015	0.000	0.000
3	1.000	-8.554	1.000	0.000	0.000	0.000
4	1.000	-8.202	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.996	-14.942	0.000	0.000	1.278	0.426
6	1.005	-11.897	0.000	0.000	0.000	0.000
7	0.980	-15.817	0.000	0.000	1.420	0.497
8	1.001	-12.895	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.000	-15.546	0.000	0.079	1.775	0.710

Información de Ramales

Número Ramal	Barra Origen	Barra Destino	Potencia Transmitida por Ramal - S(MVA)	Potencia Pérdida en Ramal P(MW)	Q(MVAr)
1	1	4	2.4849	0.0000	0.3553
2	4	5	0.9776	0.0160	0.1128
3	5	6	0.3652	0.0037	0.0162
4	3	6	1.0062	-0.0000	0.0588
5	6	7	0.7237	0.0060	0.0510
6	7	8	0.7596	0.0048	0.0409
7	8	2	1.0011	0.0000	0.0625
8	8	9	0.3410	0.0025	0.0128
9	9	4	1.5046	0.0224	0.1905

Registro de Optimización

Registro de Iteraciones en Aumento de Carga

Posición del FACTS en Barra o Ramal

SVC1	TCSC1	UPFC1	Mejor Bondad	F Carga
5.000	2.000	1.000	45.5997	1.400
7.000	3.000	8.000	54.8936	1.420

Magnitud del FACTS

SVC1	TCSC1	UPFC1(V)	UPFC1(Th)	Mejor Bondad	F Carga
0.350	0.303	-0.006	-1.166	45.5997	1.400
0.441	-0.790	0.004	0.808	54.8936	1.420

Información de matrices del Sistema luego de la Incorporación de FACTS

Matriz de Ramales Con FACTS Incluidos

Org	Dt	R	XL	Y	Max1	Max2	Max3	Ang	Est. TCSC	Mag TCSC	Est. UPFC	MagV UPFC	MagTh UPFC
1	4	0.0000	0.0576	0.0000	2.50	2.50	2.50	0	0	0.0000	1	-0.0058	-1.1662
4	5	0.0170	0.0920	0.1580	2.50	2.50	2.50	0	1	0.3027	0	0.0000	0.0000
5	6	0.0390	0.1700	0.3580	1.50	1.50	1.60	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
3	6	0.0000	0.0586	0.0000	3.00	3.00	3.10	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
6	7	0.0119	0.1008	0.2090	1.50	1.50	1.60	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
7	8	0.0085	0.0720	0.1490	2.50	2.50	2.50	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
8	2	0.0000	0.0625	0.0000	2.50	2.50	2.50	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
8	9	0.0320	0.1610	0.3060	2.50	2.50	2.50	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000
9	4	0.0100	0.0850	0.1760	2.50	2.50	2.50	0	0	0.0000	0	0.0000	0.0000

Matriz de Barras Con FACTS Incluidos

#Barra	Tipo	P.Carga Barra	Q.Carga	V	AngV	Est. SVC	Mag SVC
1	3	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
2	2	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
3	2	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
4	1	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
5	1	1.278	0.426	1.000	0.00	1	0.3501
6	1	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
7	1	1.420	0.497	1.000	0.00	0	0.0000
8	1	0.000	0.000	1.000	0.00	0	0.0000
9	2	1.775	0.710	1.000	0.00	0	0.0000

Matriz de Generadores Con FACTS Incluidos

#Barra	Pot.P Genera	Pot.Q Genera	Pot.Q Maxima	Pot.Q Minima	Voltaje Genera	Pot.P Maxima	Pot.P Minima	Costo Medio
1	0.000	0.000	3.00	-3.00	1.00	5.00	0.10	2000
2	134.320	0.000	3.00	-3.00	1.00	1.00	0.10	2000
3	94.190	0.000	3.00	-3.00	1.00	1.00	0.10	2000

Published with MATLAB® R2013a

Capítulo 4

SIMULACIONES

En un capítulo anterior se mostraron los datos de potencias y características físicas del sistema, estos datos primero se deben ajustar al formato usado por los algoritmos desarrollados. Todos los algoritmos principales funcionan con el mismo tipo de matrices de datos y se vinculan a matlab a través de una hoja de calculo de Microsoft EXCEL por tanto se requieren una misma hoja de calculo global para las simulaciones.

Los datos de simulación se dividen en tres matrices principales, los datos de cada una de ellas se encuentran referidos a una potencia Base de 100 MW y voltaje de 230kV, las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 muestran la información del sistema en el formato utilizado por el algoritmo desarrollado, en las tablas se muestra también el nombre de cada barra solo por motivos ilustrativos porque la matriz usada en el algoritmo carece de este campo y usa números reales enteros para diferenciar una barra de otra.

La primera matriz denominada de barras es la mostrada en la tabla 4.1 y contiene; el número asignado a cada barra, el tipo de barra, la carga asignada, la magnitud y ángulo de voltajes de arranque para el método de cálculo iterativo del flujo de potencia.

La barra de referencia elegida para el sistema es la barra de Pomasqui principalmente porque es el enlace con el sistema eléctrico colombiano y adelantándose un poco a los hechos, si llegare el caso que el sistema de generación ecuatoriano se sature, esta barra seria la que absorberá los desequilibrios del sistema ante un aumento de carga, también se plantea el forzar la generación de esta barra a su mínimo mientras la carga no supere la capacidad de generación conjunta de los demás generadores a través de la función de despacho lineal y un costo superior a la media de producción nacional.

En lo que respecta a la numeración de las barras, la número uno se usa para la barra de referencia, mientras que para las siguientes se van colocando según la capacidad de generación instalada en cada una de ellas, dejando las barras sin generadores conectados a ellas en los últimos lugares sin un orden en especial.

# Barra	Nombre	Tipo	Carga P	Carga Q	Mag. V	Ang. V
1	Pomasqui	3	0,942	0,0951	1	0
2	Molino	2	1,101	0,431	1	0
3	Pascuales	2	4,416	1,181	1	0
4	Totoras	2	1,626	0,601	1	0
5	Milagro	2	3,639	0,989	1	0
6	Quevedo	2	1,992	0,729	1	0
7	S.Rosa	2	6,419	1,580	1	0
8	Trinitaria	2	1,398	0,459	1	0
9	Zhoray	2	0	0	1	0
10	S.Domingo	2	1,628	0,442	1	0
11	Sinincay	2	1,292	0,343	1	0
12	Baba	2	0	0	1	0
13	Esclusas	2	1,849	0,346	1	0
14	Riobamba	2	1,075	0,202	1	0
15	Dos Cerritos	1	0,608	0,181	1	0
16	Prosperina	1	1,860	0,558	1	0
17	S.Gregorio	1	1,000	0,434	1	0

Tabla 4.1: Matriz de Barras

La matriz de generadores se presenta en la tabla 4.2 y contiene los números asignados a los ramales con generadores, la potencia inicial de generación, los límites de potencia activas y reactiva del generador, las magnitudes de los voltajes de generación que por defecto se pretende que alcancen el 1 por unidad y el costo promedio de producción.

Respecto a los costos de producción al generador de la barra de referencia se le asigna un costo de producción mayor para hacer que predomine la energía de procedencia local durante la asignación de unidades y para solucionar un conflicto con los generadores nacionales conectados a la misma barra de referencia se trasfieren esas potencias como negativas en la barra de carga ya que por su relativa escasa capacidad no afectaría en mayor medida a los flujos de potencia.

# Barra	Nombre	PotP Gen	PotQ Gen	Qmax	Qmin	Mag V	PMax	Pmin	Costo Medio
1	Pomasqui	0	0	6	-6	1	6	0	10500
2	Molino	0	0	6,884	-5,883	1	11,510	0	8050
3	Pascuales	0	0	3,625	-1,385	1	8,292	0	8050
4	Totoras	0	0	2,895	-2,663	1	3,827	0	8050
5	Milagro	0	0	3,009	-2,482	1	3,801	0	8050
6	Quevedo	0	0	2,008	-1,675	1	2,903	0	8050
7	S.Rosa	0	0	1,726	-0,736	1	2,877	0	8050
8	Trinitaria	0	0	1,288	-0,444	1	2,608	0	8050
9	Zhoray	0	0	2	-2	1	1,700	0	8050
10	S.Domingo	0	0	0,341	-0,174	1	1,364	0	8050
11	Sinincay	0	0	1,024	-1,024	1	0,885	0	8050
12	Baba	0	0	0,468	-0,468	1	0,421	0	8050
13	Esclusas	0	0	0,105	-0,026	1	0,210	0	8050
14	Riobamba	0	0	0,105	-0,091	1	0,102	0	8050

Tabla 4.2: Matriz de Generadores

La matriz de ramales mostrada en la tabla 4.3, contiene los números de barras que usa como origen y destino cada ramal, los valores de resistencia y reactancia en por unidad y los límites de potencia sobre las líneas, esta matriz no puede tener dos ramales paralelos entre los mismos nodos por lo que para su reducción se usa el concepto de teoría de circuitos dando como resultado para una líneas en paralelo con las mismas características, una impedancia la mitad del valor original y una capacidad el doble.

	#Barra Desde	#Barra Hasta	Ramales 230 Kv	Resist. R	React. XL	Sucp S	Rang A	Rang B	Rang C	Desf. Trafo
1	10	12	S.Domingo - Baba	0,00695	0,05558	0	2,038	2,038	2,038	0
2	12	6	Baba - Quevedo	0,00483	0,03860	0	2,038	2,038	2,038	0
3	10	6	S.Domingo - Quevedo	0,01173	0,09382	0	2,038	2,038	2,038	0
4	6	17	Quevedo - S.Gregorio	0,00634	0,05073	0	4,076	4,076	4,076	0
5	6	3	Quevedo - Pasculaes	0,00811	0,06489	0	4,076	4,076	4,076	0
6	3	16	Pascuales - Prosperina	0,00131	0,01047	0	2,038	2,038	2,038	0
7	16	8	Prosperina - Trinitaria	0,00215	0,01722	0	2,038	2,038	2,038	0
8	8	13	Trinitaria - Esclusas	0,00055	0,00431	0	2,486	2,486	2,486	0
9	13	5	Esclusas - Milagro	0,00302	0,02412	0	4,076	4,076	4,076	0
10	3	15	Pascuales - DosCerritos	0,00112	0,00894	0	2,038	2,038	2,038	0
11	15	5	Dos Cerritos - Milagro	0,00478	0,03824	0	2,038	2,038	2,038	0
12	3	5	Pascuales - Milagro	0,00589	0,04709	0	2,038	2,038	2,038	0
13	5	9	Milagro - Zhoray	0,00662	0,05302	0	4,973	4,973	4,973	0
14	9	11	Zhoray - Sinincay	0,00491	0,04866	0	2,571	2,571	2,571	0
15	9	2	Zhoray - Molino	0,00082	0,00659	0	4,076	4,076	4,076	0
16	3	2	Pascuales - Molino	0,01052	0,08418	0	4,076	4,076	4,076	0
17	2	14	Molino - Riobamba	0,01766	0,14593	0	1,975	1,975	1,975	0
18	2	4	Molino - Totoras	0,02247	0,18571	0	1,975	1,975	1,975	0
19	14	4	Riobamba - Totoras	0,00481	0,03978	0	1,975	1,975	1,975	0
20	4	7	Totoras - S.Rosa	0,00618	0,05106	0	3,949	3,949	3,949	0
21	7	10	S.Rosa - S.Domingo	0,00440	0,03633	0	3,949	3,949	3,949	0
22	7	1	S.Rosa - Pomasqui	0,00238	0,02155	0	3,834	3,834	3,834	0

Tabla 4.3: Matriz de Ramales

4.1. Flujo de potencia Simple

Los resultados de las simulaciones presentados a continuación fueron obtenidos con un ordenador con sistema operativo Windows 7UltimateSP1, procesador Intel core i7-3720QM, memoria de 16 GB con una versión de matlab R2013a.

En la sección de resultados de simulación se visualiza el mensaje "*IMPORTANTE, El método no convergió en 50 iteraciones, pruebe disminuyendo la tolerancia de error del método o aumentando el número máximo de iteraciones. Los resultados mostrados son los obtenidos en la última iteración antes de alcanzar el criterio de paro*" y en la sección de resumen de simulación las capacidades de generación y cargas con magnitudes no coherentes, esto se debe a la distribución de generación entre las unidades conectadas a cada barra que como dato inicial se encuentran todas en cero.

4.2. Flujo de potencia con restricciones

Esta simulación al igual que el flujo de potencia simple no requieren más de una prueba para ver sus resultados ya que comparaciones variando el número de iteraciones o la tolerancia de error no producen cambios significativos, porque el método convergió en un número menor de iteraciones al puesto por defecto en la interfaz gráfica y la tolerancia de error del método que, de por si es pequeña.

Tomando los datos de la sección de resultados de simulación para este algoritmo se puede saber que en comparación con los resultados del flujo de potencia simple sin restricciones, este flujo de potencia entrega como resultado la asignación de potencias de las unidades, como se previó con las funciones de despacho económico y las restricciones de costo sobre la barra de referencia, las potencias en todas las barras se incrementaron equilibradamente y la potencia del generador en la barra de referencia se mantuvo al mínimo porque la capacidad de generación era superior a la carga

Se detecta un cambio de tipo en la barra número 14 que corresponde al nodo de Riobamba, cambio producido por llegar al límite de la generación de reactivos de ese generador, la consecuencia del cambio es que la barra ya no es capaz de mantener su voltaje de generación y empieza a ser afectado por la carga o los generadores aledaños, el valor de voltaje en esa barra es un claro indicador de este cambio.

En la información de operación del sistema, de la sección “Resultados de simulación”, se aprecia entre los cuadros de información de barras, e información de ramales los datos de potencia en generación y cargas, tanto en las barras como en los ramales.

En el recuadro de información de ramales se muestran las potencias sobre los ramales y las perdidas producidas sobre las líneas.

Del reporte se pueden extraer datos sobre la operación como :

- Extremos alcanzados en voltajes:
  - Vmin 0.9695 p.u. => Barra 17
  - Max 1.0000 p.u. => Barra 1
  - Min Angulo-Voltaje: 0.000 grad => Barra 1
  - Max Angulo-Voltaje: 0.49 grad => Barra 2
- Violación de límites de potencia sobre ramales
  - Ninguno
- Perdidas totales
  - $P_{per} = 0,396$
  - $Q_{per} = 3,228$

A continuación se presentan la sección de “Resultados de simulación” del reporte para flujos de potencia con restricciones, solo son mostrados los resultados de barras y ramales por ser los más importantes.

Resultados de Simulación

Informacion de Barras

Barra	Voltaje		Generacion		Carga	
	Mag(pu)	Ang(grad)	P(MW)	Q(MVAr)	P(MW)	Q(MVAr)
1	1.000	0.000	0.000	0.064	0.942	0.095
2	1.000	0.490	8.766	0.000	1.101	0.431
3	1.000	0.308	6.315	0.889	4.416	1.181
4	1.000	0.194	2.915	0.783	1.626	0.601
5	1.000	0.323	2.895	0.387	3.639	0.989
6	1.000	0.147	2.211	0.845	1.992	0.729
7	1.000	0.012	2.191	0.877	6.419	1.580
8	1.000	0.293	1.986	0.232	1.398	0.459
9	1.000	0.475	1.295	0.096	0.000	0.000
10	1.000	0.061	1.039	0.181	1.628	0.442
11	1.000	0.445	0.674	0.072	1.292	0.343
12	1.000	0.119	0.321	0.000	0.000	0.000
13	1.000	0.291	0.160	0.234	1.849	0.346
14	0.985	0.225	0.078	0.000	1.075	0.202
15	0.998	0.306	0.000	0.000	0.608	0.181
16	0.995	0.290	0.000	0.000	1.860	0.558
17	0.970	0.097	0.000	0.000	1.000	0.434

Informacion de Ramales

Numero Ramal	Barra Origen	Barra Destino	Potencia Transmitida por Ramal - S(MVA)	Potencia Perdida en Ramal	
				P(MW)	Q(MVAr)
1	10	12	1.0355	0.0075	0.0596
2	12	6	0.7170	0.0025	0.0198
3	10	6	0.9083	0.0097	0.0774
4	6	17	1.1244	0.0080	0.0641
5	6	3	2.4584	0.0490	0.3922
6	3	16	1.7052	0.0038	0.0304
7	16	8	0.3390	0.0002	0.0020
8	8	13	0.4047	0.0001	0.0007
9	13	5	1.3005	0.0051	0.0408
10	3	15	0.2589	0.0001	0.0006
11	15	5	0.4329	0.0009	0.0072
12	3	5	0.3209	0.0006	0.0048
13	5	9	2.8454	0.0536	0.4293
14	9	11	0.6221	0.0019	0.0188
15	9	2	2.1860	0.0039	0.0315
16	3	2	2.1415	0.0482	0.3860
17	2	14	1.7828	0.0561	0.4638
18	2	4	1.5755	0.0558	0.4610
19	14	4	0.8612	0.0036	0.0295
20	4	7	3.5310	0.0771	0.6366
21	7	10	1.3359	0.0079	0.0648
22	7	1	0.5495	0.0007	0.0065

4.3. Algoritmo Genético para Ubicación de FACTS

El problema de ubicación de FACTS es un problema multiobjetivo que ante universos de posibilidades de respuestas bastante grandes tienden a converger en máximos locales, por ello se ejecutarán varias veces los mismos problemas cambiando los números y tipos de compensadores o la configuración de los operadores genéticos para variar en mayor o menor grado la carga sobre el algoritmo genético o definir una configuración que de mejores resultados.

Los criterios para definir si los resultados obtenidos en realidad son los mejores o si el algoritmo genético efectivamente esta funcionando como debería parten de la configuración de compensadores más sencilla que se pueda plantear que es el estudio de un compensador a la vez, ante esta configuración el algoritmo debería tender su convergencia a un valor específico en la mayoría de situaciones. Con este proceso se comprobarían dos aspectos, el primero que el algoritmo genético en realidad no esta arrojando magnitudes aleatorias y el segundo aspecto a comprobar sería la combinación de operadores genéticos que den los mejores resultados para el problema de flujos de potencia con codificación en números reales.

Como elemento de referencia para los resultados obtenidos en las simulaciones se usa una bondad calculada sin compensadores, esta bondad se obtiene configurando los rangos de los compensadores a cero, se simula un escenario sin compensadores con una bondad resultante de $55,027$.

4.3.1. Simulaciones con sistema incorporando un único FACTS

Las primeras simulaciones realizadas son ejecutadas con el fin de hacer un primer tanteo del funcionamiento del algoritmo con los datos del sistema del SNT por lo que la configuración de operadores genéticos son los ofrecidos por defecto al ejecutar la interfaz gráfica siendo esta una Población Inicial de 50, número de Generaciones máximo de 50, porcentaje de Cruce al 80 %, porcentaje de mutación simple de 2 %, porcentaje de mutación diferencial de 20 %, tipo de selección por ruleta, tipo de cruce de 1 Punto y estrategia evolutiva $(\mu + \lambda) - ES$

Simu	SVC			TCSC			UPFC			
#	**Ubic. Barra**	**Mag**	**Valor Bondad**	**Ubic. Ramal**	**Mag**	**Valor Bondad**	**Ubic. Ramal**	**Mag. V**	**Mag. ϕ**	**Valor Bondad**
1	S.Gregorio	0.5	74,17	Quevedo/ S.Gregorio	-0.793	66,31	Quevedo/ S.Gregorio	0.0327	-19,56	83,56
2	S.Gregorio	0.5	74,17	Quevedo/ S.Gregorio	-0.798	66,41	Quevedo/ S.Gregorio	0.0295	4,47	83,71
3	S.Gregorio	0.5	74,17	Quevedo/ S.Gregorio	-0.799	66,43	Quevedo/ S.Gregorio	0.0345	-19,45	80,27
4	S.Gregorio	0.5	74,17	Quevedo/ S.Gregorio	-0.785	66,13	Molino/ Riobamba	0.0196	16.44	75,65
5	S.Gregorio	0.5	74,17	Quevedo/ S.Gregorio	-0.798	66.41	Quevedo/ S.Gregorio	0.0296	6,12	83,66

Tabla 4.4: Resultados para ubicación de un FACTS, configuración por defecto

De los resultados en la tabla 4.4 se aprecia que las soluciones aportadas para los SVC y los

TCSC tienden a ser los mismos en todas las ocasiones y solo se ve una variación considerable de resultados para el caso de los UPFC que incluso muestra un ejemplo de un máximo local en la cuarta simulación que converge en la barra número 17 en lugar de la 4 que venía siendo la tendencia, también la diferencia máxima en resultados de bondad obtenidos en los casos de SVC y TCSC no traspasan la unidad mientras que para el UPFC llegan a las tres unidades.

En vista que lo resultados con SVC y TCSC tienden a ser los mismo por la poca presión que su elección individual ejerce sobre el algoritmo genético por su única variable, se continuarán las simulaciones centrando la atención en los dispositivos UPFC.

Cambios en tamaño de población

Los resultados mostrados en la tabla 4.4 utiliza una combinación de cruce y mutación diferencial para generar la descendencia, pero para comparar los operadores individualmente se decide llevar el porcentaje de mutación a cero para probar los operadores con las características básicas del algoritmo .

La configuración del algoritmo genético con respecto a las simulaciones anteriores cambia en el porcentaje de mutación simple y diferencial a valores de 0 %, las pruebas se dividen en dos grupos con el tamaño de la población como punto único de divergencia en la configuración.

Simu	UPFC						
#	Tam. Pob.	**Ubic. Ramal**	**Mag V**	**Mag. ϕ**	**Valor Bondad**	**Gen. Descen.**	**Tiempo Seg**
1	50	4	0,0305	-7,797	83,44	10	35,63
2	50	4	0,026	7,456	79,93	9	31,23
3	50	4	0,0402	-18,21	71,83	10	30,95
4	50	17	0,0196	9,825	74,33	50	193,21
5	50	15	0,0582	0,20037	0,69	11	46,11
6	100	4	0.0297	10,23	83,8	15	130,2
7	100	4	0.0384	-19,77	74,57	17	140,23
8	100	4	0,0282	7,34	81,16	13	114,69
9	100	4	0.0277	7,424	80,1046	12	97,98
10	100	4	0.0336	-11,99	78,85	19	101,95

Tabla 4.5: Resultados para ubicación de un FACTS con cambios en población

La primera impresión incluso antes de las simulaciones es que al tener más objetivos como sujetos de los que elegir se tienen mejores resultado, aunque el tiempo de simulación y el número de generaciones en las que convergen los valores se ven afectados negativamente, esta noción resulta ser verdadera y no solo el error de ajuste en los resultados es menor sino que también la tendencia de converger a máximos locales disminuye al aumentar el tamaño de población.

Cambios en los operadores de cruce

Para estas pruebas se utiliza una población de 50 individuos, un porcentaje de cruce del 100 % y selector de ruleta para todos los casos.

Simu	UPFC						
#	**Tipo Cruce**	**Ubic. Ramal**	**Mag V**	**Mag. ϕ**	**Valor Bondad**	**Gen. Descen.**	**Tiempo Seg**
1	1 Punto	4	0,0305	-7,797	83,44	10	35,63
2		4	0,026	7,456	79,93	9	31,23
3		4	0,0402	-18,21	71,83	10	30,95
4		17	0,0196	9,825	74,33	30	123,21
5		15	0,0582	0,20037	0,69	11	46,11
6	2 Puntos	4	0,0288	6,072	82,30	11	26,161
7		18	0,0250	19,94	74,37	20	107,14
8		4	0,0543	15,55	69,62	14	57,32
9		18	0,0186	13,50	74,89	11	44,11
10		17	0,0187	-2,41	71,75	31	167,68
11	Uniforme	18	0,019	15,28	72,25	11	57,69
12		4	0,0290	8,23	82,82	9	28,48
13		4	0.0324	-12,97	81,37	14	50,05
14		4	0,0537	-3,04	69,3	7	31,86
15		13	0.0345	-4,48	67	10	56,55
16	Medias Reales (Aritmética)	4	0.0296	2,55	83,66	30	109,47
17		4	0,0298	-2,29	83,769	18	64,49
18		17	0.0189	4,21	73,57	30	180,57
19		4	0.0339	9,91	76,14	30	176,90
20		4	0.0296	1,2432	83,80	26	132,36
21	Medias Reales (Geométrica)	17	0,0185	-2,86	71,24	24	100,70
22		4	0.0297	-3.014	83,45	30	165.02
23		4	0.0237	5,8873	73,32	18	73,32
24		4	0.0296	0.2186	83,79	13	29,64
25		4	0,0295	9,05	83,88	23	72,87

Tabla 4.6: Resultados para ubicación de un FACTS con cambios en operadores de cruce

En los tipos de cruce no se aprecia un método que a simple observación sea mejor que otro en cuanto a convergencia de mejores resultados, en el grupo de métodos de cruce normales el cruce uniforme mostró convergencias más rápidas en menor número de generaciones con valores de convergencia aceptables, mientras que en los tipos de cruce de números reales con promedios, las medias geométricas mostraron mejores tiempos que su similar aritmético por lo que se prestará más atención a estos métodos a futuro.

Como dato adicional cuando los UPFC marcan su ubicación en el ramal 18 se produce una violación de potencia sobre el ramal 6 y las 30 generaciones son el límite establecido para esta prueba por tanto un tipo de cruce que involucre este máximo local pierde su importancia frente a los otros.

Cambios en los operadores de Selección

Para los operadores de selección se tomarán los porcentajes y población de las pruebas anteriores y un operador de cruce del tipo uniforme, los cambios producidos serán en los operadores de selección.

Simu	UPFC						
#	**Tipo Selector**	**Ubic. Ramal**	**Mag V**	**Mag. ϕ**	**Valor Bondad**	**Gen. Descen.**	**Tiempo Seg**
1	Ruleta	18	0,019	15,28	72,25	11	57,69
2		4	0,0290	8,23	82,82	9	28,48
3		4	0.0324	-12,97	81,37	14	50,05
4		4	0,0537	-3,04	69,3	7	31,86
5		13	0.0345	-4,48	67	10	56,55
6	Torneo Determinista	15	0,0584	4,31	69,84	8	44,14
7		4	0,7135	0,009	69,67	7	31,53
8		4	0,6716	0,02	80,37	9	35,78
9		15	0,0567	5,66	69,51	6	35,15
10		4	0,0309	-10,59	83,54	5	24,53
11	Torneo Aleatorio	18	0,0184	10,2333	74,33	17	82,26
12		4	0.0323	8,5745	78,59	16	86,34
13		4	0,0523	0,4015	70,48	18	113,24
14		20	0,0963	14,86	65,97	12	38,54
15		15	0,059	8,0	70,05	12	51,1

Tabla 4.7: Resultados para ubicación de un FACTS con cambios en operadores de selección

De los resultados de la tabla 4.7 se observa que al igual que los operadores de cruce no hay una tendencia clara del mejor método, aunque si una del método menos adaptado que fué el de torneo aleatorio, con mayor cantidad de máximos locales y tiempo de simulación.

Cambios en los estrategias de evolución

Las simulaciones en este campo compara el impacto que tendría la competencia de padres e hijos con la opción de pasar a los hijos directamente como padres de la siguiente generación, la configuración a utilizar incluye 100 % de cruce sin mutación, selector por ruleta y cruce Uniforme.

Simu	UPFC						
#	**Estrategia** Evolutiva	**Ubic. Ramal**	**Mag V**	**Mag. ϕ**	**Valor Bondad**	**Gen. Descen.**	**Tiempo Seg**
1	$(\mu+\lambda)-ES$	18	0,019	15,28	72,25	11	57,69
2		4	0,0290	8,23	82,82	9	28,48
3		4	0.0324	-12,97	81,37	14	50,05
4		4	0,0537	-3,04	69,3	7	31,86
5		13	0,0345	-4,48	67	10	56,55
6	$(\mu,\lambda)-ES$ (Elitismo-SI)	4	0,0572	-17,91	69,37	30	73,91
7		8	0,0572	15,6	65,25	30	131,22
8		17	0,0197	17,28	75,88	26	98,16
9		18	0.0186	15.6225	75.1172	30	119.453
10		12	0,0102	14,54	64,75	30	101,16
11	$(\mu,\lambda)-ES$ (Elitismo-NO)	15	0,0553	7,20	69,20	30	88,44
12		3	0,0141	-9,96	55,35	20	55
13		22	0,0236	3,124	55,48	27	31,54
14		1	0,0116	-13,83	55,25	29	41,99
15		4	0,0214	14,817	70,19	30	42,95

Tabla 4.8: Resultados para ubicación de un FACTS con cambios en estrategia de evolución

Los resultados al probar distintas estrategias evolutivas son bastante claros y favorecen a la estrategia de competencia entre padres e hijos, restara por probar una vez más las estrategias evolutivas con el operador de mutación diferencial

Cambios en Porcentajes de Mutación Diferencial

A lo largo de las pruebas de los operadores genéticos de población, selección, cruce y estrategia evolutiva es evidente que los resultados obtenidos en ninguno de los casos igualo los de las pruebas iniciales que incorporaban un 20 % de participación de mutación diferencial en la generación de descendencia y queda bastante claro que mejora sustancialmente el comportamiento del algoritmo de ubicación de FACTS.

Esta prueba evalúa los cambios que produce la mutación diferencial sobre un campo más especifico como es la combinación de un factor de mutación diferencial del 50 % con las estrategias evolutivas que no mostraron resultados prometedores.

Los operadores adicionales para efectos de comparación con la tabla 4.8 serán, cruce uniforme, selección por ruleta, tamaño de población de 50, máximo número de generaciones de 30 y porcentaje de cruce del 50 %.

Simu	UPFC - Mutación Diferencial 50 %						
#	**Estrategia** Evolutiva	**Ubic. Ramal**	**Mag V**	**Mag.** ϕ	**Valor Bondad**	**Gen. Descen.**	**Tiempo Seg**
1	$(\mu+\lambda)-ES$	4	0,0298	-2,50	83,76	15	48,96
2		4	0,0299	16,47	83,92	18	60,08
3		4	0,0334	-17,49	81,28	18	74,32
4		4	0,0301	-4,61	83,72	14	43,43
5		4	0,0319	-16,38	83,59	12	42,37
6	$(\mu,\lambda)-ES$ (Elitismo-SI)	4	0,0296	8,65	83,76	30	90,72
7		4	0,0299	16,36	89,93	30	76,84
8		4	0,0285	15,60	81,00	30	69,41
9		4	0,0276	5,49	79,86	30	70,48
10		4	0,0299	16,96	83,86	30	69,06
11	$(\mu,\lambda)-ES$ (Elitismo-NO)	4	0,0175	19,07	65,85	30	56.63
12		15	0,041	15,4433	57,11	30	72,59
13		15	0,0469	2,96	58,69	30	80,58
14		8	0,0236	11,70	56,38	30	64,13
15		12	0,0021	-19,57	55,75	30	67,7

Tabla 4.9: Resultados para ubicación de un FACTS con cambios en porcentaje de mutación diferencial

Adicionando el elemento de mutación diferencial, se mejoran los resultados y tiempos de simulación para las estrategias $(\mu+\lambda)-ES$ y $(\mu\ ,\ \lambda)-ES$ con elitismo, aunque la estrategia de competencia padres e hijos mantiene una superioridad notoria en tiempos de simulación, manteniendo los mismo resultados.

Para el caso $(\mu\ ,\ \lambda)-ES$ sin elitismo los resultados se mantienen entre los peores como en la tabla 4.8, la explicación que se puede obtener para este comportamiento es que, al diversificar los

resultados y no mantener al mejor individuo, en realidad el efecto de mutación diferencial hace que las magnitudes y ubicaciones del compensador no converjan a un valor y se mantengan variando.

4.3.2. Simulaciones con sistema incorporando dos FACTS

Siguiendo con las pruebas incorporando dos compensadores simultáneamente se busca comprobar que si usando dos o más compensadores se puede extraer un mejor valor de bondad que tratando de usar un solo compensador con capacidad más grande. También se busca comprobar las combinaciones de operadores genéticos cuyos resultados fueron muy similares en la sección de simulaciones de un solo compensador, más concretamente los operadores de cruce y selección.

Comprobación de operadores de Selección

La comprobación de los operadores de selección se hará con una configuración que incluye un 50 % de cruce, 50 % de mutación diferencial, cruce uniforme y estrategia evolutiva de competencia padres e hijos.

Simu		SVC		UPFC				
#	**Tipo Selector**	**Ubic. Barra**	**Mag**	**Ubic. Ramal**	**Mag V**	**Mag. ϕ**	**Valor Bondad**	**Tiempo Seg**
1	Ruleta	17	0,4647	17	0,0199	15,58	124,94	162,86
2		14	0,4425	4	0,0295	6,4149	170,83	75,89
3		17	0,5	18	0,0198	17,73	138,18	161,56
4		17	0,5	9	0,0123	12,23	143,93	147,24
5		17	0,5	17	0,0201	18,54	138,19	135,69
6	Torneo Determinista Long 2	14	0,45	4	0,0297	-1,27	176,67	58,98
7		14	0,45	4	0,0297	14,25	176,76	114,76
8		17	0,5	5	0,067	-2,84	127,03	73,38
9		17	0,49	8	0,0511	20	195,74	200,65
10		14	0,48	4	0,0298	-1,33	157,81	66,40
11	Torneo aleatorio Long 2	17	0,5	17	0,0248	13,72	138,88	134
12		14	0,453	4	0,300	17,51	176,72	70,77
13		17	0,5	17	0,0192	18,35	137,51	101,51
14		14	0,45	4	0,303	20	176,87	58,15
15		14	0,45	4	0,295	5,32	176,71	79.99
16	Torneo determinista Long 4	17	0,5	17	0,0185	16,68	136,68	56,23
17		14	0,45	4	0,0302	19,57	176,52	50,92
18		17	0,5	3	0,0894	-6,09	124,12	41,53
19		17	0,5	15	0,0672	1,669	130,66	91,47
20		17	0,5	20	0,0967	10,06	126,75	53,75
21	Torneo Aleatorio Long 4	14	0,45	4	0,305	-8,70	176,70	75,82
22		17	0,5	8	0,0452	13,00	168,19	162,64
23		17	0,5	9	0,0154	15,033	191,33	161,83
24		17	0,5	6	0,0138	8,647	142,46	160,75
25		14	0,452	4	0,0299	16,49	176,89	76,40

Tabla 4.10: Resultados para ubicación de dos FACTS con cambios en operador de selección

De los resultados obtenidos usando dos compensadores y variando el tipo de selección, se aprecia que:

- Con tres variables de control y un alto coeficiente de mutación, el método de selección por torneo aleatorio es el que muestra gran mejoría con respecto a las simulaciones de la tabla 4.7, la mejoría de este método es atribuible al alto porcentaje de mutación diferencial, ya que las variaciones contempladas en la configuración genética solo influyen en el incremento en variables de control y consecuentemente un aumento en la presión sobre el algoritmo.
- Los resultados para el método de selección aleatorio mejoran a tal punto que con un mayor número de participantes en el torneo alcanza mejores máximos de bondad, en contratarte de esta mejora en bondad los tiempos de simulación se incrementan.
- Para el caso de selección por torneo determinista, el aumento del número de participantes del torneo no produce mejoría en bondades de convergencia como en el torneo aleatorio, dando mejores resultados con un torneo más pequeño de individuos.

Una vez más estas simulaciones no muestran cual método de selección es completamente superior a los demás probados, sin embargo por una leve mejoría de resultados del torneo determinista en comparación con la selección por ruleta, tanto en bondades como en tiempos de simulación, se elije que las siguientes pruebas usarán la selección por torneo determinista con dos participantes por torneo.

Comprobación de operadores de cruce

Para este grupo de simulaciones se busca comprobar los operadores de cruce uniforme y por promedios geométricos que mostraron una leve mejoría en resultados y tiempos de simulación en comparación con los otros métodos de cruce.

Simu		SVC		UPFC				
#	**Tipo Cruce**	**Ubic. Barra**	**Mag**	**Ubic. Ramal**	**Mag V**	**Mag. ϕ**	**Valor Bondad**	**Tiempo Seg**
1	Medias Reales (Geométrica)	7	0,103	4	0,03	-4,19	83,75	57,20
2		14	0,43	4	0,301	0,19	157,55	65,98
3		7	-0,006	4	0,0295	0,25	83,87	29,34
4		14	0,46	4	0,0353	-19,61	136,57	61,80
5		14	0,43	4	0,0295	1,399	162,46	118,30
6	Uniforme	17	0,5	17	0,201	17,66	138,56	176,95
7		14	0,4524	4	0,03	-4,65	176,70	70,82
8		17	0,5	9	0,0139	14,15	166,63	97,33
9		17	0,5	18	0,0187	13,24	136,61	171,28
10		17	0,5	9	0,0168	15,26	201,61	120,13

Tabla 4.11: Resultados para ubicación de dos FACTS con cambios en operador de cruce

El análisis de los resultados para definir un mejor método de cruce se basa en comparar los valores de bondad obtenidos, siendo los del cruce uniforme los mejores. Los resultados de cruce

uniforme muestran más diversidad en cuanto a los valores del UPFC, pero incluso así la media de bondades es más elevada que el caso de cruce con medias geométricas, tomando los tiempos de simulación y bondades se puede observar que el método de medias reales es susceptible a llegar a convergencias prematuras con máximos locales, una señal clara de esto es que con las medias geométricas no se alcanzo la ubicación en el ramal 9 para el UPFC, que muestra tener valores más elevados de bondad asociados.

Comparación con dos compensadores de menor capacidad

A continuación se procede a comprobar si reduciendo la magnitud de los compensadores a la mitad, pero duplicando su número se obtienen mejores valores de bondad para cada tipo de compensador, las magnitudes mostradas para los UPFC solo sera el voltaje en serie del compensador por ser más representativo que el angulo.

SVC			SVCx2				
Ubic.	**Mag**	**Valor**	**Ubic.**	**Mag 1**	Ubic	**Mag 2**	**Valor**
Ramal		**Bondad**	**Ramal 1**		Ramal 2		**Bondad**
17	0,5	74,17	17	0,25	14	0,25	68,23
TCSC			TCSCx2				
Ubic.	**Mag**	**Valor**	**Ubic.**	**Mag 1**	Ubic	**Mag 2**	**Valor**
Ramal		**Bondad**	**Ramal 1**		Ramal 2		**Bondad**
4	-0,799	66,43	19	-0,397	4	-0,394	63,63
UPFC			UPFCx2				
Ubic.	**Mag**	**Valor**	**Ubic.**	**Mag 1**	Ubic	**Mag 2**	**Valor**
Ramal		**Bondad**	**Ramal 1**		Ramal 2		**Bondad**
4	0,0299	83,68	4	0,0245	18	0,0166	183,18

Tabla 4.12: Comparación de valores de bondad al distribuir la capacidad de un FACT en dos

La prueba realizada equivalió a ubicar distintos FACT con capacidades menores a las vistas en simulaciones anteriores, de los resultados para los SVC y TCSC no hay mucho que resaltar, salvo que no se produce mejora alguna en la bondad resultante. Un indicio de que sería mejor ubicar compensadores de mayor capacidad en un punto que varios distribuidos, podría ser el nivel de uso del compensador cuando se ubica en una única barra, ya que en los dos casos de SVC y TCSC coincide que ,cuando eran un compensador único estaban cerca de los límites de operación, mientras que para el UPFC este límite no se alcanzaba y en comparación la bondad del UPFC aumento considerablemente cuando se usan dos de menor capacidad.

4.3.3. Simulaciones con sistema incorporando más de dos FACTS

Las pruebas con sistemas más allá de dos FACT usarán los operadores que han venido teniendo

mejores respuestas con el problema de flujo de potencia: un porcentaje de mutación diferencial del 50 %, porcentaje de cruce de 50 %, cruce uniforme, selector por torneo determinista, estrategia de evolución con competencia entre padres e hijos y un aumento del tamaño de población a 75 individuos para mejorar la convergencia de resultados al usar más variables de control.

Esta sección se plantea para comprobar hasta que punto es factible seguir aumentando la cantidad de compensadores de un tipo, se analizará este punto en términos de mejora del valor de bondad.

	Compensador x1	Compensador x2	Compensador x3	Compensador x4
Valor Bondad TCSC	66,41	91,36	100,40	106,63
Valor Bondad SVC	74,17	123,16	158,50	194,09
Valor Bondad UPFC	83,45	187,11	556,74	395,71

Tabla 4.13: Comparación de valores de bondad al incluir más de un FACTS de mismo tipo

Comparando la bondad del sistema sin compensadores con un valor de $55,027$ y las bondades mostradas en la tabla 4.13, se aprecia que al adicionar el segundo compensador en SVC y TCSC o el tercer compensador en UPFC es cuando se presenta el mayor paso de incremento en el valor de bondad. Se toman las cantidades de compensadores con mayores pasos en incrementos de bondad para usarlos como un criterio para el número de FACTS del sistema que aproveche las capacidades de cada uno de ellos.

A continuación se prueba una combinación de 2 compensadores SVC, 2 compensadores TCSC y 3 UPFC, como se ha venido haciendo se harán 5 pruebas, pero para este caso y los posteriores casos, se mostrarán solo tres de los mejores resultados alcanzados, ya que por la presión que se ejerce en el algoritmo genético la convergencia a máximos locales es más común. Las ubicaciones y magnitudes de los compensadores en este punto pasan a segundo plano para dar paso a las comparaciones del valor de bondad con las condiciones de operación del sistema, como violaciones en límites de operación y perdidas en ramales.

Simu	SVCx2 + TCSCx2 + UPFCx3			
#	Valor Bondad	**Pérdidas**	**Ubicaciones**	**Violaciones**
3	560.323	P = 0.391 MW Q = 2.842 MVA	SVC=> 16 - 17 TCSC=> 5 - 22 UPFC=> 19 - 4 - 7	NO
4	841,92	P = 0,081 MW Q = 0,657 MVA	SVC=> 15 - 17 TCSC=> 16 - 6 UPFC=> 4 - 9 - 17	NO
5	878,32	P = 0.365 MW Q = 2.966 MVA	SVC=> 16 - 15 TCSC=> 2 - 7 UPFC=> 4 - 19 - 5	NO

Tabla 4.14: Resultados para ubicación de dos SVC, dos TCSC y tres UPFC FACTS

Para descartar la posibilidad de que los compensadores hayan interferido entre ellos durante las pruebas cuyos resultados se muestran en la tabla 4.14, se reducirá el número de compensadores a la mitad para la comparación de resultados.

Simu	SVCx1 + TCSCx1 + UPFCx2				
#	Valor Bondad	**Pérdidas**	**Ubicaciones**	**Magnitudes**	**Tiempo Seg**
1	429,57	P= 0,378 MW Q= 3,074 MVAr	SVC=> 16 TCSC=> 10 UPFC=> 4 - 1	SVC=> 0,5 TCSC=> -0,799 UPFC=> 0,0301 , 0,0742	NO
2	1284	P= 0.392 MW Q= 3.188 MVAr	SVC=> 16 TCSC=> 10 UPFC=> 8 - 4	SVC=> 0,35 TCSC=> -0,79 UPFC=> 0,0435 , 0,0239	Potencia Ramales 6, 7, 8, 22
3	974,25	P= 0.317 MW Q= 2.569 MVAr	SVC=> 16 TCSC=> 10 UPFC=> 8 - 4	SVC=> 0,5 TCSC=> -0,76 UPFC=> 0,0373 , 0,0238	Potencia Ramales 6, 8

Tabla 4.15: Resultados para ubicación de un SVC, un TCSC y dos UPFC FACTS

Los resultados mostrados en la tabla 4.15 tuvieron un resultado diferente al que se esperaba, en cuanto a valores de bondad el algoritmo converge satisfactoriamente, el problema surge en una posible incompatibilidad de número de compensadores ya que en la mayoría de casos se producen violaciones en los límites de potencia transmitida por los ramales, demostrando que puede darse una grupo de combinaciones especificas para determinado sistema que no brinden buenos resultados.

Simu	SVCx1 + TCSCx1 + UPFCx1			
#	Valor Bondad	**Perdidas**	**Ubicaciones**	**Magnitudes**
1	268,613	P= 0,381 MW Q= 3,095 MVAr	SVC=> 14 TCSC=> 7 UPFC=> 4	SVC=> 0,45 TCSC=> -0,799 UPFC=> 0,0295
3	227,01	P= 0,381 MW Q= 3,081 MVAr	SVC=> 15 TCSC=> 19 UPFC=> 4	SVC=> 0,26 TCSC=> -0,78 UPFC=> 0,025
4	294,66	P= 0,381 MW Q= 3,08 MVAr	SVC=> 16 TCSC=>19 UPFC=> 4	SVC=> 0,5 TCSC=> -0,746 UPFC=>0,0295

Tabla 4.16: Resultados para ubicación de un SVC, un TCSC y dos UPFC FACTS

De los datos en la tabla 4.16 se ve que las bajas pérdidas en las líneas no necesariamente están relacionadas con un buen valor de bondad, aunque si se deseara enfocar un estudio sobre estos parámetros, se podría cambiar la evaluación de bondad para que procese mejor esta característica.

En lo que respecta a la mejor combinación de FACTS para determinar la máxima carga, se escogen las combinaciones usadas en las pruebas de las tablas 4.14 y 4.16 ademas de otras que se consideren en base a los resultados.

4.4. Algoritmo genético para determinar máxima capacidad de carga

Como se mencionó con anterioridad la carga tiene la característica de variar con mucha facilidad a lo largo del día y la estación del año, si embargo para las pruebas se necesita una carga especifica y los resultados que se obtengas variaran según como se distribuya dicha carga a lo largo

de los nodos del sistema. Durante el establecimiento de una carga especifica para este grupo de simulaciones en especial se toma en cuenta el objetivo del proyecto, que es la determinación de la máxima capacidad de carga, factores adicionales como la ausencia de un operador de sistema que cambie los niveles de generación para abastecer la carga del sistema plantean la incógnita de si la distribución inicial de carga usada hasta ahora satisface dichas condiciones o que impacto tendrían sobre la carga máxima alcanzada.

Para Comprobar el impacto que tendrá la distribución de carga en el sistema se proponen dos escenarios adicionales, el primer escenario, es una distribución de carga ajustada según la información mostrada en el sistema SCADA del portal electrónico de Transelectric y el segundo escenario incluye, ademas de la nueva distribución de cargas, una consideración para que aquellas barras de voltaje controlado que tengas una capacidad de generación menor a la de consumo se cambien a barras de carga solamente, esto sin embargo no cambia su participación en el despacho económico pero si en la compensación de reactivos.

4.4.1. Máxima capacidad del sistema sin FACTS

El algoritmo desarrollado no tiene como tal una herramienta o función destinada a la determinación de la capacidad máxima de transmisión del sistema sin compensadores, sin embargo esta situación se puede simular si a los rangos de los FACTS se les asignan valores nulos, como resultado para los tres escenarios propuestos se tienen:

1. El primer escenario de simulación contiene las matrices de datos mostradas en las tablas 4.1,4.2 y 4.3 con esta configuración los resultados obtenidos son

   Coeficiente de carga Máximo de 1.10

   Compensadores NO

   Vmin 0.9662 p.u. => Barra 17

   Max 1.0000 p.u. => Barra 1

   Min Angulo-Voltaje: 0.000 grad => Barra 1

   Max Angulo-Voltaje: 30.74 grad => Barra 2

   Próxima violación de límite en potencia para ramal: 17

2. El segundo escenario de prueba, ajusta la distribución de cargas según el flujo de potencia mostrado en el sistema SCADA del portal electrónico de Transelectric, el procedimiento de ajuste es similar al que se siguió para obtener las potencias de la tabla 4.1, primero se obtienen los porcentajes de carga en cada barra y se relacionan con la potencia máxima demandada que se tenga registro. La lectura de potencias en el portal electrónico de Transelectric se hizo a las 20H19, correspondiente a una hora de consumo punta.

   Coeficiente de carga Máximo de 1.05

   Compensadores NO

Vmin 0.9716 p.u. => Barra 17

Max 1.0000 p.u. => Barra 1

Min Angulo-Voltaje: 0.000 grad => Barra 1

Max Angulo-Voltaje: 28.49 grad => Barra 2

Próxima violación de límite en potencia para ramal: 17

3. Tercer escenario ajustando la distribución de carga según el esquema SCADA del portal de Transelectric y ademas cambiando a barras tipo PQ las que tienen capacidad de generación menor a su carga.

   Coeficiente de carga Máximo de 1.05

   Compensadores NO

   Vmin 0.9599 p.u. => Barra 16

   Max 1.0000 p.u. => Barra 1

   Min Angulo-Voltaje: 0.000 grad => Barra 1

   Max Angulo-Voltaje: 29.02 grad => Barra 2

   Próxima violación de límite en potencia para ramal: 17

Como punto en comun de los tres escenarios propuestos se tiene que, la proxima violacion de límites de operacion es en la potencia transmitida por el ranal número 17.

4.4.2. Máxima capacidad del sistema con FACTS

Para esta sección se consideraron:

- Varias simulaciones de un mismo caso, ya que cuando se empiezan a tratar con mayor cantidad de compensadores y variables de control, es inevitable que se presenten máximos locales como respuesta del algoritmo genético, por lo que los resultados mostrados en esta sección son los obtenidos a lo largo de varias ejecuciones de un mismo problema, hasta cuando un punto máximo de carga se vuelva repetitivo.

- Una mejora en la función de bondad, de modo que durante la asignación de un valor de bondad se incluya la evaluación de las condiciones de operación y penalice el valor de bondad ante la detección de una violación de condiciones de operación.

- Ensayos con capacidades de carga mas altas que la que el sistema soporta sin compensadores, con uno y dos compensadores.

4.4.2.1. Pruebas sobre sistema con distribución de cargas según participación anual de empresas distribuidoras.

Para este escenario de distribución de carga, la respuesta de carga máxima sin compensadores fue de 1,10, los resultados para uno y dos SVC son los mostrados en la tabla 4.17.

	SVC x 1		**SVC x 2**			
Coeficiente de Carga	Ubicación	Magnitud	Ubicación		Magnitud	
			SVC1	SVC2	SVC1	SVC2
1,11	14	-0.063	17	14	0,5	-0,087

Tabla 4.17: Máxima capacidad de Carga con uno y dos SVC

En ambos casos para uno y dos SVC los resultados son desalentadores, ya que solo extendieron la capacidad de transmisión del sistema en un 1 %.

En el primer caso con un SVC, la extensión de limite de transmisión de carga se produce por una modificación leve, introducida por una compensación inductiva en la barra 14. Con la prueba que incluye dos SVC, la extensión de limite de transmisión también se produce por una leve compensación inductiva en la barra 14, mientras que el otro SVC solo mejora el voltaje, esto es apreciable porque en el primer caso con un SVC, el voltaje mas bajo es $0,9659\ p.u.$ en la barra 17, que es en la que se ubica el compensador capacitivo y mejora el voltaje de esta barra al punto que el nuevo voltaje de menor magnitud es $0,979\ p.u.$ en la barra 14.

Los resultados para las pruebas con uno y dos TCSC mostrados en la tabla 4.18, presentaron un comportamiento similar al de los SVC, en cuanto a que los resultados en máxima capacidad de transmisión obtenidos por un solo compensador no distanciaban mucho del que se obtendría con dos del mismo tipo y la mejora que se obtenía al usar dos compensadores se presentaba en el voltaje mínimo que se incrementaba, de $0,9619\ p.u.$ en la barra 17 a $0,9815\ p.u.$ en la barra 14.

	TCSC x 1		**TCSC x 2**			
Coeficiente de Carga	Ubicación	Magnitud	Ubicación		Magnitud	
			TCSC1	TCSC2	TCSC1	TCSC2
1,11	7	-0,757	5	4	-0,721	-0,796
1,12	16	-0,257	4	3	-0,797	-0,758
1,13	3	-0,692	4	5	-0,799	-0,634
1,14	3	-0,672	17	4	0,3	-0,798
1,15	3	0,704	5	4	-0,418	-0,8
1,16	3	-0,747	5	4	-0,697	-0,785
1,17	5	-0,355	4	5	-0,796	-0,543
1,18	20	0,4	4	5	-0,763	-0,516
1,19	5	-0,451	5	4	-0,73	-0,772
1,20	5	-0,528	5	19	-0,736	-0,128
1,21	5	-0,556	4	5	-0,798	-0,754
1,22	5	-0,632	4	5	-0,798	-0,784
1,23	5	-0,665	5	4	-0,715	-0,79

Tabla 4.18: Máxima capacidad de Carga con uno y dos TCSC

En la tabla 4.18, para un TCSC con un coeficiente de carga de 1,17 se ve un ejemplo de máximo local; este máximo local ya no se vuelve a presentar con valores de carga mas elevados regresando a la tendencia de mantenerse en el ramal 5 que es en el que al final converge la máxima carga.

Las pruebas con UPFC tanto en esta sección como en las anteriores, tienen la característica de mostrar los mejores valores de bondad y tiempos de simulación mas largos, por ello se considera para las ejecuciones con uno y dos UPFC coeficientes de carga inicialies de 1,20, un poco inferior a los mejores resultados con TCSC.

	UPFC x 1		**UPFC x 2**			
Coeficiente de Carga	Ubicación	Magnitud	Ubicación		Magnitud	
			UPFC1	UPFC2	UPFC1	UPFC2
1,20	4	0,056∠0,018^o	3	4	0,059∠-18,93^o	0,035∠-1,902^o
1,21	4	0,055∠20°	4	6	0,034∠-1,906^o	0,009∠5,726^o
1,22	4	0,056∠20°	16	4	0,011∠-10,01^o	0,028∠0,757^o
1,23	4	0,055∠18,59^o	4	6	0,035∠-14,65^o	0,009∠11,84^o
1,24	4	0,056∠20°	16	4	0,011∠-16,18^o	0,029∠2,181^o
1,25	4	0,056∠4,617^o	4	19	0,060∠-6,806^o	-0,034∠-11,85^o
1,26	16	0,015∠13,85^o	4	6	0,035∠18,00^o	0,009∠19,49^o
1,27	4	0,057∠19,38^o	2	4	0,086∠-17,85^o	0,034∠0,901^o
1,28	16	0,018∠16,88^o	4	12	0,031∠-7,572^o	0,01∠-5,277^o
1,29	6	0,016∠19,78^o	-	-	-	-
1,3	16	0,017∠-17,41^o	-	-	-	-

Tabla 4.19: Máxima capacidad de Carga con uno y dos UPFC

La tabla 4.19 presenta los resultados de las simulaciones que incluyen uno y dos UPFC, lo mas notorio es el descenso de la capacidad de transmisión al agregar un segundo UPFC. Mientras que en los datos con un solo UPFC, la tendencia cambia de converger en el ramal 4 a converger en el ramal 16 con mas frecuencia según se incrementa el coeficiente de carga, una suposición de este comportamiento es que según aumenta la carga el numero de máximos locales decrece por las penalizaciones aplicadas en la asignación de bondad. Los voltajes de las maximas cargas alcanzadas pra uno y dos UPFC muestran una superioridad para el uso de dos UPFC, aunque es comprensible ya que el nivel de carga sobre el sistema es menor.

A continuación se muestran las pruebas que combinan dos y tres tipos de compensadores funcionando simultáneamente sobre el mismo sistema, para comprobar si su combinación mejora la respuesta del sistema, en máxima capacidad de carga, no se emplean combinaciones mas de mas de un compensador de cada tipo ya que los mejores resultados en mejora de capacidad de carga se presentaron con un solo compensador.

Primero se probara la combinación de un SVC y un TCSC, los resultados son los mostrados en la tabla 4.20.

TCSC x 1 + SVC x 1				
Coeficiente de Carga	Ubicación		Magnitud	
	SVC	TCSC	SVC	TCSC
1,11	17	17	0,5	0,398
1,12	17	17	0,5	0,354
1,13	17	3	0,5	-0,641
1,14	17	3	0,5	-0,745
1,15	17	3	0,5	-0,77
1,16	17	5	0,5	-0,705
1,17	17	5	0,5	-0,632
1,18	17	5	0,5	-0,643
1,19	17	5	0,5	-0,669
1,20	17	5	0,5	-0,621
1,21	17	5	0,5	-0,631
1,22	17	5	0,5	-0,629
1,23	17	5	0,5	-0,669

Tabla 4.20: Máxima capacidad de Carga Combinando TCSC y SVC

En este caso la extensión de capacidad de transmisión la proporciona el TCSC que se ubica en la misma posición que cuando funcionaba por su cuenta, lo mismo se aprecia para el SVC que con un comportamiento capacitivo tendía a ubicarse en la barra 17 para mejorar el nivel de voltaje de ese nodo. De manera general la combinación de dos tipos de compensadores no dio mejores resultados que cuando se usaban dos del mismo tipo, refiriéndose al TCSC.

La combinación de TCSC y UPFC, cuyos resultados son mostrados en la tabla 4.21, tampoco muestran una mejora a cuando se usaba un solo UPFC.

TCSC + UPFC				
Coeficiente de Carga	Ubicación		Magnitud	
	TCSC	UPFC	TCSC	UPFC
1,11	2	4	-0,640	$0{,}033\angle 6{,}55^o$
1,12	2	4	-0,641	$0{,}033\angle 5{,}59^o$
1,13	4	4	0,4	$0{,}050\angle 10{,}09^o$
1,14	5	4	-0,725	$0{,}034\angle 6{,}70^o$
1,15	2	4	-0,598	$0{,}034\angle 6{,}77^o$
1,16	2	4	-0,504	$0{,}039\angle 7{,}75^o$
1,17	4	6	-0,794	$0{,}016\angle 3{,}14^o$
1,18	4	4	0,4	$0{,}054\angle 10{,}80^o$
1,19	5	4	-0,698	$0{,}035\angle 7{,}01^o$
1,20	2	4	-0,582	$0{,}035\angle 7{,}09^o$
2,21	4	6	-0,590	$0{,}016\angle 3{,}25^o$
1,22	2	4	-0,579	$0{,}036\angle 7{,}18^o$
1,23	4	6	-0,799	$0{,}016\angle 3{,}20^o$
1,24	4	16	-0,799	$0{,}014\angle 2{,}74^o$
1,25	4	4	0,4	$0{,}056\angle 11{,}125^o$
1,26	2	4	-0,558	$0{,}037\angle 7{,}4^o$
1,27	4	6	-0,8	$0{,}016\angle 3{,}25^o$

Tabla 4.21: Máxima capacidad de Carga Combinando TCSC y UPFC

Los resultados de las tablas 4.21 muestran con los TCSC y UPFC la ramal que tiene tendencia a ser objetivo de ubicación de compensadores es el ramal 4. Finalmente para este escenario de distribución de cargas se muestran los resultados para la combinación de un compensador de cada tipo en la tabla 4.22, el coeficiente de carga máximo alcanzado no es nada sorprendente, pero el ajuste del voltaje en las barras es mejor que en todas las combinaciones anteriores teniendo un voltaje mínimo en la barra 17 de 0,991 *p.u.*

TCSC x 1 + SVC x 1 + UPFC x 1						
Coeficiente	Ubicación			Magnitud		
de Carga	SVC	TCSC	UPFC	SVC	TCSC	UPFC
1,20	14	5	4	0,5	-0,686	$0{,}036\angle 7{,}246^o$
1,21	16	5	4	0,5	-0,687	$0{,}036\angle 7{,}199^o$
1,22	17	4	6	0,5	-0,773	$0{,}016\angle 3{,}198^o$
1,23	15	3	4	0,318	-0,779	$0{,}042\angle 8{,}487^o$
1,24	16	5	4	0,5	-0,671	$0{,}036\angle 7{,}221^o$
1,25	17	4	12	0,5	-0,797	$0{,}013\angle 2{,}634^o$
1,26	17	4	6	0,499	-0,763	$0{,}018\angle 2{,}656^o$
1,27	17	4	6	0,497	-0,796	$0{,}016\angle 3{,}286^o$
1,28	16	5	4	0,495	-0,61	$0{,}038\angle 7{,}787^o$
1,29	17	4	16	0,5	-0,797	$0{,}013\angle 2{,}634^o$

Tabla 4.22: Máxima capacidad de Carga Combinando TCSC, SVC y UPFC

Con la máxima carga alcanzada y en base a las magnitudes de operación mostradas en la tabla 4.22, el SVC continua mejorando solo el nivel de voltaje, el TCSC y UPFC giran en torno a la compensación sobre el ramal 4, guiando a una preconclusión de que esta barra y ramal son los que necesitan mayor atención.

4.4.2.2. Pruebas sobre sistema con distribución de cargas, ajustado a la lectura del sistema SCADA del portal electrónico de Transelectric

Para el grupo de pruebas con la distribución de cargas ajustada, se omitirán la presentación de tablas de resultados completas, en su lugar se mostraran solo los resultados de máximos niveles de carga alcanzados para cada configuración.

En este escenario de distribución de carga es evidente que se alcanzan limites de carga mas elevados para todas las combinaciones que incluyen los UPFC, haciendo notable el impacto que tendría un operador de sistema en la vida real, sobre el rendimiento de los compensadores; dejando de lado los limites de carga alcanzados, el incremento de capacidad de carga al usar un solo TCSC o UPFC se repite en este escenario indicando que para un sistema de este tamaño no se requerirá de una gran cantidad de compensadores para obtener un buen resultado. Los resultados al seguir aumentando compensadores de un mismo tipo, aunque muestran mejoría con respecto al escenario de distribución de carga anterior, siguen siendo con variaciones pequeñas con respecto al inicial.

El compensador SVC muestra una característica mas de regulación de voltaje, que se hace mas evidente cuando opera conjuntamente con otros compensadores y de cierta manera se complementan al trabaja juntos en la red.

	Coeficiente de Carga	Vmin		Vmax		Ubicación	Magnitud
		Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo		
SVCx1	1,05	0,981 p.u. Barra 14	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	28,49 grad Barra 2	SVC=>Barra 17	SVC=> 0,5
SVCx2	1,05	0,995 p.u. Barra 16	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	28,42 grad Barra 2	SVC1=> Barra 14 SVC2=>Barra 17	SVC1=> 0,5 SVC2=> 0,5
SVCx3	1,05	0,994 p.u. Barra 16	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	28,42 grad Barra 2	SVC1=>Barra 17 SVC2=>Barra 14 SVC3=>Barra 15	SVC1=> 0,5 SVC2=> 0,5 SVC3=> 0,5
TCSCx1	1,16	0,968 p.u. Barra 17	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	28,21 grad Barra 2	TCSC=>Ramal 5	TCSC=> -0,749
TCSCx2	1,21	0,9671 p.u. Barra 17	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	27,97 grad Barra 2	TCSC1=>Ramal 16 TCSC2=>Ramal 5	TCSC1=> -0,4981 TCSC2=> -0,6009
TCSCx3	1,22	0,989 p.u. Barra 14	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	27,72 grad Barra 2	TCSC1=> Ramal 16 TCSC2=>Ramal 5 TCSC3=>Ramal 4	TCSC1=> -0,463 TCSC2=> -0,730 TCSC3=> -0,799
UPFCx1	1,38	0,9622 p.u. Barra 17	-3,86 grad Barra 7	1,008 p.u. Barra 16	18,17 grad Barra 2	UPFC=>Ramal 6	UPFC=> $0{,}024\angle 7{,}227^o$
UPFCx2	1,37	0,9928 p.u. Barra 16	-4,768 grad Barra 10	1,00 p.u. Barra 1	16,66 grad Barra 2	UPFC1=>Ramal 16 UPFC2=>Ramal 4	UPFC1=> $0{,}011\angle -0{,}419^o$ UPFC2=> $0{,}038\angle 20^o$
UPFC+SVC+TCSC	1,38	0,994 p.u. Barra 15	-3,733 grad Barra 7	1,014 p.u. Barra 17	21,77 grad Barra 2	SVC=>Barra 17 TCSC=>Ramal 6 UPFC=>Ramal 4	SVC=>-0,095 TCSC=>-0,682 UPFC=>$0{,}055\angle 11{,}045^o$
TCSC+UPFC	1.37	0,9928 p.u. Barra 16	-6,87 grad Barra 17	1,008 p.u. Barra 17	20,16 grad Barra 2	TCSC=>Ramal 5 UPFC=>Ramal 4	TCSC=> -0,678 UPFC=>$0{,}038\angle 7{,}18^o$
SVC+TCSC	1,23	0,9817 p.u. Barra 14	0,00 grad Barra 17	1,00 p.u. Barra 17	29,98 grad Barra 2	SVC=>Barra 17 TCSC=>Ramal 5	SVC=>0,5 TCSC=>-0,791

Tabla 4.23: Resumen de Máxima Capacidad de Carga en Combinaciones de FACTS para Sistema con Distribución de Cargas Ajustada

4.4.2.3. Pruebas sobre sistema con distribución de cargas ajustado y cambio de barras PV a PQ cuando la capacidad de generación es menor a la carga en el nodo.

Con respecto al anterior escenario, el propuesto para este caso tiene, en comparación, una deficiencia de compensación reactiva por parte de los generadores que pasaron a estar en barras de tipo PQ, esto se debe a que en la asignación de unidades la carga de potencia activa sigue distribuyéndose como lo hacia en el caso anterior pero la asignación de potencias reactivas era producto del flujo de potencia, lo que produce que dichos generadores solo provean potencia activa.

Los resultados de esta configuración en la distribución de cargas en general mostraron la misma tendencia de que el primer compensador fue el que mayor mejora introdujo en la capacidad de transmisión del sistema y mientras se seguían agregando mas compensadores del mismo tipo los resultados mejoraban mas lentamente hasta llegar un punto que no se apreciaba mejora.

Al combinar distintos tipos de compensadores no se obtiene una mejora sustancial o en algunos casos ninguna mejora en la capacidad de transmisión de carga, pero si se tiene un mejor ajuste de voltajes, o sea la otra variable de evaluación de la funcion de bondad .

	Coeficiente de Carga	Vmin		Vmax		Ubicación	Magnitud
		Magnitud	Angulo	Magnitud	Angulo		
SVCx1	1,05	0,9623 p.u. Barra 7	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	29,01 grad Barra 2	SVC=>Barra 16	SVC=> 0,466
SVCx2	1,05	0,964 p.u. Barra 16	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	28,96 grad Barra 2	SVC1=> Barra 7 SVC2=>Barra 8	SVC1=> 0,463 SVC2=> 0,438
SVCx3	1,05	0,962 p.u. Barra 7	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	29,00 grad Barra 2	SVC1=>Barra 3 SVC2=>Barra 8 SVC3=>Barra 16	SVC1=> 0,327 SVC2=> 0,369 SVC3=> 0,497
TCSCx1	1,15	0,952 p.u. Barra 17	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	28,70 grad Barra 2	TCSC=>Ramal 5	TCSC=> -0,752
TCSCx2	1,18	0,956 p.u. Barra 7	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	28,15 grad Barra 2	TCSC1=>Ramal 5 TCSC2=>Ramal 16	TCSC1=>-0,626 TCSC2=> -0,448
TCSCx3	1,21	0,955 p.u. Barra 7	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	28,40 grad Barra 2	TCSC1=> Ramal 21 TCSC2=>Ramal 5 TCSC3=>Ramal 16	TCSC1=> -0,077 TCSC2=> -0,574 TCSC3=> -0,529
UPFCx1	1,30	0,9541 p.u. Barra 16	-0,351 grad Barra 7	1,00 p.u. Barra 1	26,97 grad Barra 9	UPFC=>Ramal 15	UPFC=> 0,069$\angle$-1,776^o
UPFCx2	1,33	0,963 p.u. Barra 17	-1,646 grad Barra 7	1,026 p.u. Barra 14	13,99 grad Barra 2	UPFC1=>Ramal 18 UPFC2=>Ramal 10	UPFC1=> 0,026$\angle$20^o UPFC2=> -0,012$\angle$-19,98^o
UPFC+SVC+TCSC	1,33	0,963 p.u. Barra 17	-1,646 grad Barra 7	1,026 p.u. Barra 14	13,99 grad Barra 2	SVC=>Barra 8 TCSC=>Ramal 1 UPFC=>Ramal 5	SVC=>0,431 TCSC=>0,329 UPFC=>0,047$\angle$9,35^o
TCSC+UPFC	1.33	0,9569 p.u. Barra 16	-2,87 grad Barra 7	1,00 p.u. Barra 1	15,39 grad Barra 2	TCSC=>Ramal 11 UPFC=>Ramal 18	TCSC=> -0,333 UPFC=>0,018$\angle$3,664^o
SVC+TCSC	1,16	0,9576 p.u. Barra 7	0,00 grad Barra 1	1,00 p.u. Barra 1	33,13 grad Barra 2	SVC=>Barra 16 TCSC=>Ramal 17	SVC=>0,484 TCSC=>0,236

Tabla 4.24: Resumen de Máxima Capacidad de Carga en Combinaciones de FACTS para Sistema con Distribución de Cargas Ajustada y Cambios en Tipos de Barras

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Siguiendo la línea planteada en el proyecto, que es la determinación de un nivel máximo de carga, el sistema de transmisión en estudio para efectos de la simulación, se reduce a un arreglo de elementos de transmisión de 230kV, se excluyen elementos de transformación que pueden introducir desfase angular de voltaje en los puntos de conexión de sistemas con otros de distinto nivel de tensión.

Las simplificaciones del sistema hacen que el análisis de carga máxima pueda ser realizado para un escenario en particular, los resultados que se obtengan pueden variar según la distribución de cargas entre las empresas distribuidoras o la asignación de la capacidad de generación ante circunstancias de contingencia. El escenario planteado para las pruebas cuyos resultados se plasman en este documento, consideró una demanda de potencia máxima confirmada y los porcentajes de participación en el consumo de energía anual por parte de cada empresa distribuidora del país, los dos datos son provistos por el centro de control de energía CENACE.

La reducción del sistema a generadores equivalentes también tiene consecuencias en la definición de un costo para la producción de energía en cada barra, si cada generador equivalente agrupa a más de una central con diferentes costos de producción y por ende diferente orden en la lista de despacho, no se puede asignar un costo a cada barra ya que su respuesta en el sistema sería la de generar a máxima capacidad y saturar tempranamente las barras ligadas al generador equivalente de menor costo; por lo tanto se optó por simular un crecimiento de generación equilibrado al otorgar a todos los generadores un costo igual de producción. El asignar un costo de generación igual a todos los generadores equivalentes en el esquema de simulación, deja sin efecto una sección del algoritmo para determinación de máxima capacidad de carga, que se encargaría de comparar un crecimiento de carga únicamente, o de carga y capacidad de generación; sin embargo esta opción queda abierta para cuando se trabajen con unidades de generación de distintos precios y definir, entonces, un crecimiento equilibrado entre carga y capacidad de generación o crecimiento solo de carga que afecta en mayor o menor medida la capacidad de transmisión restante sobre una capacidad constante de transmisión.

Durante el planteamiento y la simulación de la función de bondad se tuvieron dos aspectos importantes a mencionar que son:

- La función de bondad para el algoritmo genético de ubicación de compensadores tiene otorgado mayor peso al control del voltaje que al de potencia sobre ramales, esto es resultado de las características propias utilizadas durante el cálculo de la bondad; aunque, como una posible mejora o un cambio de la orientación del algoritmo genético puede otorgársele mayor importancia a las potencias sobre las líneas, de modo que se torne un algoritmo genético para ubicación de FACTS que tenga como objetivo principal la reducción de potencias sobre las líneas, que se traduce como pérdidas para el sistema.
- La función que bondad sea capaz de evaluar en cada iteración los limites de operación y penalizar el valor de bondad al detectar una transgresión de limites, la penalización se lleva a cabo dividiendo el valor de bondad calculado por un factor de 10, no se recomienda eliminar el valor de bondad penalizándolo a un valor cero, porque eliminaría individuos que pueden aportar a la diversidad de alelos en futuros cruces, en su lugar solo tienen menos posibilidades de cruce si se usa un operador de selección de tipo determinista. La necesidad del cambio realizado en la evaluación de bondad se origino durante una de las simulaciones preliminares para determinar la máxima capacidad de carga del sistema, usando únicamente compensadores de tipo TCSC, en este caso la cargabilidad del sistema no avanzaba mas allá de un coeficiente de carga de 1.00 hasta que mostraba violaciones en condiciones de operación, mas concretamente potencia sobre los ramales, estos resultados hicieron evidentes que se necesitaba una mejora en cuanto a la evaluación de la bondad, ya que hasta ese momento esta no consideraba las violaciones en los parámetros de operación del sistema y aunque el algoritmo genético convergía en un valor de bondad máximo, este no estaba de acuerdo a las condiciones de operación del sistema.

Flujo de potencia

Los problemas principales que presenta el flujo de potencia fueron dos principalmente, el primero es el método iterativo de solución de flujo, que puede variar según lo prefiera el usuario, el mismo que sea compatible con los modelos que se planeen para los FACTS y el nivel de restricciones que se planteen para un flujo más real de potencia.

El presente trabajo no exploro mayores posibilidades en cuanto a los métodos para solución de flujos de potencia o las restricciones aplicables para un flujo más real. Existen softwares especializados para este propósito y al no ser un tema de interés actual para la investigación desarrollada se dejo en un somero análisis. En su lugar se eligió desarrollar un método de solución que sea rápido y cumpla las características básicas de un flujo de potencia, el método fue utilizado reiterativamente durante el proceso de evaluación de bondad en el algoritmo genético.

Los algoritmos para el flujo de potencia pueden dividirse en tres grupos:

- Cálculo de elementos a utilizar durante la solución del método iterativo de flujo de potencia, como la matriz de impedancia, evaluación de ecuaciones de potencia, evaluación de matriz Jacobiana.

- Algoritmos que calculan las modificaciones que introducen los compensadores flexibles en el cálculo del flujo de potencia, cada algoritmo de este tipo debe estar ubicado correctamente según la variable sobre la que tiene efecto. Las variables de control para el UPFC en particular puede cambiarse a voltaje y su ángulo o magnitud de voltaje serie y magnitud de corriente paralelo del compensador, durante el análisis de las formulas se optó por incluir dentro del análisis del ángulo del voltaje la expresión que representa la corriente en paralelo del compensador UPFC.

- Algoritmos para evaluar restricciones en los flujos de potencia como, los límites de generadores, despacho económico y límite de generación de reactivos.

  La divergencia más importante del algoritmo desarrollado con respecto a métodos de cálculo para restricciones de flujo, que comúnmente se encentran en la literatura relacionada a flujos óptimos de potencia, es la asignación de unidades, los métodos comunes de cálculo funcionan con funciones de costo cuadráticas que al derivarlas respecto a la potencia dan una función de incremento de costo marginal lineal, pero para el caso del SNT las funciones de costo de por sí eran lineales y al derivarlas daban un costo marginal constante. Entonces el algoritmo propuesto para solución de despacho es fruto de apegarse a la teoría de minimizar costos, y a pesar de que al final se terminó utilizando un costo de generación igual para todos los generadores y no se llegó a hacer un despacho económico acorde a lo que el algoritmo fue diseñado, las consideraciones para una repartición de carga equitativa entre generadores de mismo costo, fue útil para simular el crecimiento equilibrado de generación que se analizaron en puntos anteriores.

Algoritmo Genético

La codificación del problema en números reales acorta la longitud del cromosoma y ayudó a resolver algunos problemas relacionados con una de las características más importantes de este algoritmo genético, que es el de adaptarse a un número indefinido de cada tipo de compensador. En comparación con los números reales, para representar la ubicación de un compensador en números binarios se necesitaban de varios caracteres, por no mencionar el caso de representar las magnitudes de los FACTS, que podían tomar valores con precisión de hasta milésimas de unidad, una ventaja adicional de los números reales para el problema planteado es que hacen más fácil de entender y programar las restricciones de ubicación y generación de números aleatorios.

Un aspecto crucial durante la codificación de los cromosomas es la parametrizacion del gen que contiene las magnitudes de los compensadores, esta operación permitió que todos los operadores genéticos trabajen con un mismo rango de valores y a su vez permite el libre cambio en los rangos de los compensadores.

Las funciones de bondad a diferencia de una idea primaria que se desarrolló no debería permitir la eliminación directa de individuos poco adaptados, durante las pruebas mientras se desarrollaba el algoritmo se probó una función de bondad que evaluaba los límites de operación para cada bondad y en caso de detectar una violación eliminaba esa bondad asignándole un valor nulo, este rumbo eliminaba o dejaba sin probabilidades de reproducción a los individuos menos aptos, los resultados que se obtuvieron fueron que casi siempre de convergió a los valores de bondades iniciales y no había mejoría notable en la bondad además de una convergencia prematura en pocas generaciones

Los cruces basados en promedios de números reales prometen un método de diversificar los valores a los que converge el algoritmo genético, pero en la realidad cuando se aumenta la presión sobre el algoritmo al incrementar el número de variables de control no fue hasta incluir la mutación diferencial cuando estos tipos de cruce mostraron mejoría.

La implementación de conceptos de algoritmo genéticos diferenciales mejora la capacidad del algoritmo para ubicación de FACTS al dirigirse a un mejor valor, en cuanto a tiempos de simulación es una mejor opción a aumentar el tamaño de población inicial para mejorar el algoritmo genético.

Simulaciones para comprobar funcionalidad del algoritmo Genetico

El problema de flujos de potencia combinado con la posición y magnitud de compensadores FACTS se tornó un problema multiobjetivo ambicioso, no solo porque el universo de posibilidades que ofrece la combinación entre ubicaciones y magnitudes de los compensadores sino en las condiciones mismas del análisis que se haga del sistema. El análisis del sistema fue orientado a la determinación de la máxima cargabilidad de la red de transmisión a 230kV y la comprobación de que una correcta ubicación de compensadores FACTS ayudarían a incrementar el límite de esta frontera máxima de carga, este concepto fue probado exitosamente con distintas combinaciones de compensadores y varias simulaciones del mismo caso.

La primera etapa de las simulaciones se dedico a comprobar le efectividad del algoritmo genético a converger en un resultado común en el menor tiempo, en esta etapa la escala de medicion la da el valor de bondad del sistema sin compensadores y los tiempos de simulacion en segundos.

Durante estas simulaciones realizadas con un solo compensador flexible, el algoritmo converge para el caso de los SVC en el 100 por ciento de las ocasiones en una posición y magnitud, para los TCSC en una posición y una magnitud cuyo error no varía en más de una décima de unidad mientras que para los UPFC, que a diferencia de los otros compensadores usados tiene dos variables de control, los resultados mostraron variaciones en más de una unidad y un aparente máximo local. De los resultados se puede concluir que el algoritmo genético con la configuración establecida por defecto cuando se ejecuta el algoritmo efectivamente cumple con su propósito al no converger en valores aleatorios o muy distantes en cada simulación, también se puede saber que la introducción de una variable adicional causa un aumento considerable en el universo de posibilidades de soluciones ya que incluso hace que se lleguen a presentar máximos locales en un número reducido de ejecuciones. En lo que respecta al tamaño de la población, la conclusión incluso antes de las pruebas se podía

intuir que a un grupo poblacional más grande los resultados serían mejores, ya que se dispondrían de un grupo más grande de individuos y una diversidad más grande de genes, la desventaja son los tiempos de ejecución que se extienden según aumentan las poblaciones, por tanto es conveniente aumentar el tamaño de población según lo hace el número de variables de control con los que trabajara el algoritmo genético.

Las estrategias de evolución de competencia entre padres e hijos son los que mejores resultados dieron para el problema de algoritmos genéticos con números reales, a diferencia de los operadores de cruce y selección que no mostraron una clara tendencia de un método superior a los otros, es más, en ciertas ocasiones con un número de compensadores había mejores resultados con una configuración de cruce y selección que con otra, en base a esas circunstancias se puede concluir que los mejores métodos de selección y cruce dependen del número de variables de control evaluadas.

A lo largo de las simulaciones con un solo compensador fue claro el efecto positivo que tuvo la inclusión del operador de mutación diferencial , los resultados mostraron que un porcentaje de mutación diferencial de 20 por ciento bastaba para mejorar la tendencia hacia los máximos globales y puntos de convergencia, porcentajes más altos de mutación del 50 por ciento mejoran aún más las respuestas pudiendo llegar al punto que una simulación solo con mutación diferencia puede converger a un resultado aceptable, aunque se sigue recomendando el uso del operador de cruce para generar descendencia.

Para las secciones de pruebas con dos compensadores, se puede concluir que si un compensador que se ubique en una barra y esté funcionando a cerca de su capacidad máxima, no es recomendable distribuir la misma capacidad del compensador en varios puntos, esto es comprobable al menos en términos de la bondad evaluada. Así mismo si un compensador tiene libre un rango considerable antes de estar funcionando a su capacidad nominal se recomendaría usar compensadores de menor capacidad en puntos diferentes y mejorar la bondad como fue el caso del UPFC para estas pruebas.

En contraparte con no utilizar un solo compensador con mucha capacidad disponible y en su lugar varios funcionando cerca de sus capacidades máximas para mejorar el valor de bondad del sistema, está el utilizar demasiados compensadores, para las pruebas con más de dos FACT se compararon los incrementos de bondad al adicionar cada vez más compensadores del mismo tipo como resultado los aumentos marginales de bondad cada vez se hacían menores después de alcanzar un máximo.

Simulaciones para determinar Máxima capacidad de carga del sistema

El punto que se pretendía comprobar con este documento, que era el aumento de la capacidad de transmisión al ubicar óptimamente FACTS en el sistema demuestra ser verdadero, la medida en la que se incremente dichas capacidad dependerá de las condiciones en la distribución de carga que se haga en el sistema, por ello un estudio mas exhaustivo sobre las distribución de cargas y porcentajes de crecimiento en demanda serian de gran importancia para complementar este análisis.

Durante las pruebas para determinar la máxima capacidad de carga, los resultados revelaron que en muchos de los casos incluso entre los escenarios planteados, la mayor mejora en la capacidad de transmisión se da cuando se ingresa el primer compensador al sistema, el adicionar mas compensadores de un mismo tipo podía mejorar en algo las características de operación de sistema, lo que incluye la capacidad de transmisión, pero al combinar varios tipos de compensadores las mejoras mas notables se producen en los voltajes. Cuando se combinaban varios tipos de compensadores, es común que el SVC se encargue de la compensación de voltaje, mientras que los TCSC y UPFC aumentaban la capacidad de carga.

El compensador UPFC es el que mejor resultados muestra, aunque el nivel de complejidad en su operación por implicar dos variables de control simultaneas es poco deseado, por otra parte el TCSC demostró manejar los flujos de potencia para mejorar la capacidad de carga del sistema con el control de una sola variable.

Pruebas adicionales con mayor numero de compensadores SVC y TCSC no se muestran porque, el uso de mas de dos compensadores no incrementaba la capacidad de carga, o en el peor de los casos la reducía, las mejoras al aumentar su numero solo se aprecian en los perfiles de voltaje.

De los resultados en las ejecuciones de máximo nivel de carga soportado por el sistema, se concluye que en efecto es posible extender la capacidad de transmisión de un sistema al modificar algunas de las variables de control del sistema, aunque esto no implica que sea necesaria una cantidad elevada de compensadores para aumentar la cargabilidad del sistema de transmisión, al menos en la etapa de transmisión de 230kV del sistema analizado.

RECOMENDACIONES

En los flujos de potencia los métodos que se elijan para introducir las modificaciones de los compensadores deben ser compatibles con el método de solución del flujo de potencia, en el caso de este proyecto el algoritmos de modificaciones introducidas por los UPFC crea vectores de potencias y activas y reactivas y los componentes de una matriz Jacobiana.

Considerar el orden de los procesos y las variables ya calculadas o en cola antes de decidir donde introducir los algoritmos de modificación introducida por los FACTS, esta recomendación apunta a que las variables modificadas por los compensadores se cambien oportunamente, un ejemplo de esta situación es el manejo de TCSC que tiene que ser introducido luego de que se haya calculado la matriz de admitancias y esta matriz de admitancias contendrá dicha modificación por lo que deberá ser arrastrada a cada instancia en la que se necesite ya que si se escoge calcularla de nuevo podrá no incluir los cambios realizados por la función de modificaciones introducidas por los TCSC.

Como mejora del proyecto en general se pueden:

- Incluir otros métodos de solución de flujos de potencia.
- Desarrollar un método de asignación para las unidades contenidas dentro de los generadores equivalentes, para que puedan representar más fielmente la diversidad de costos de producción.
- Mejora del algoritmo optando por reunir ciertas características que están dispersas en algunos m-files y reunirlas en uno solo como se lo hizo con el cruce multipunto, que agrupa los algoritmos de cruce de 1 punto y cruce de 2 puntos que no se incluyeron en el documento por haber sido ya substituidos.

Como Análisis Posteriores:

- Analizar el impacto que tendría el mejorar la parte de mutación diferencial usando como tercer vector uno de los mejores individuos de la población de padres.
- Análisis de si el incluir la ubicación de compensadores en el esquema de parametrización utilizado con las magnitudes de los compensadores, mejoraría las respuestas en los cruces de medias reales en lo que respecta a los rangos definidos para las ubicaciones o los conflictos de ubicación.
- Modificación de la función de bondad para asegurar igual importancia a la evaluación de magnitudes de voltaje o potencia sobre las líneas a través de una parametrización de la bondad y/o incluya factores de penalización con bondades que produzcan violaciones de operación.
- Estructura de un complemento adicional que permita incluir la colocación automática de FACTS y evaluar la mejor opción por si mismo, aprovechando la simplicidad de que al ubicar un FACTS a la vez la presión ejercida sobre el algoritmo genético se reduce y se alcanza el máximo global con más frecuencia, simultáneamente a este análisis se plantea otro que compare la funcionalidad de los FACTS según se ingresan al sistema uno por uno o se los hace simultáneamente.
- Efecto que tendrían los algoritmos genéticos especializados en trabajar con números reales

Investigaciones Complementarias

- Incorporación del algoritmo genético a un software especializado de flujos de potencia
- Determinar un parámetro ideal para monitorear la maximización de carga
- Distribución detallada de carga en el SNT e investigacion estadística del incremento de consumo de energía en cada punto de consumo.

Bibliografía

[1] A Lashkar Ara. Multiobjective optimal location of FACTS shunt-series controllers for power system operation planning. *Power Delivery, IEEE ...*, 27(2):481–490, 2012.

[2] Transelectric Celec. PLAN DE EXPANSIÓN DE TRANSMISIÓN PERIODO 2010-2020. 2010.

[3] CENACE. Sistema Nacional Interconectado del Ecuador a Diciembre de 2013 Diagrama Unifilar. *Portal Web - www.cenace.org.ec, Sep-2013*, page 1, 2012.

[4] CENACE. Informe Anual 2012. *Portal Web - www.cenace.org.ec, Sep-2013*, (1):38–230, 2013.

[5] L. C. Cisneros. Sistemas Eléctricos de Potencia Modelado y Operación de Líneas de Transmisión. 2006.

[6] Conelec, Cenace, Celec-EP, and MEER. Plan maestro de electrificación 2012- 2021. 2012.

[7] R. del Carmen Ramon. Estudio emprico de variantes de Evolucion Diferencial en optimizacion con restricciones. *Centro de Ensenanza LANIA (Laboratorio Nacional de Informatica Avanzada)*, 4, 2007.

[8] S. Gerbex, R. Cherkaoui, and a.J. Germond. Optimal location of multi-type FACTS devices in a power system by means of genetic algorithms. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(3):537–544, 2001.

[9] M. Gestal, D. Rivero, J. Rabuñal, J. Dorado, and A. Pazos. Introducción a los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética. *Universidad da coruna*, 2010.

[10] Esmaeil Ghahremani and Innocent Kamwa. Optimal Placement of Multiple-Type FACTS Devices to Maximize Power System Loadability Using a Generic Graphical User Interface. *IEEE Transactions on Power Systems*, pages 1–1, 2012.

[11] Mohsen Gitizadeh and Mohsen Kalantar. Optimum allocation of FACTS devices in Fars Regional Electric Network using genetic algorithm based goal attainment. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, 10(4):478–487, April 2009.

[12] J. J. Grainger, W. D. Stevenson, and C. L. Sousa. *Análisis de sistemas de potencia.* 1996.

[13] RM Idris, A Khairuddin, and MW Mustafa. Optimal allocation of FACTS devices in deregulated electricity market using bees algorithm. *WSEAS Transactions on Power ...*, 5(2):108–119, 2010.

[14] Marouani Ismail, Guesmi Tawfik, and Hadj Abdallah Hsen. Optimal Location of Multi Type FACTS Devices for Multiple Contingencies Using Genetic Algorithms. *International Journal of Energy Engineering*, 2(2):29–35, April 2012.

[15] R Jahani. Optimal Placement of Unified Power Flow Controller in Power System Using Imperialist Competitive Algorithm. 8(6):999–1007, 2011.

[16] D. P. Kothari and J. S. dhillon. Power Systems Optimization. *Prentice-Hall-India*, pages 232 – 236, 2006.

[17] M Alonso Martínez. Gestión óptima de potencia reactiva en sistemas eléctricos con generación eólica. 2010.

[18] Juan Pablo, Rivera Barrera, Jaime Alejandro, and Valencia Vel. Modelamiento y Simulacion de dispositivos FACTS para. 2008.

[19] W. F. P. Reinoso, J. L. M. Silva, et al. Despacho económico de potencia diaria aplicado al Sistema nacional ecuatoriano. *Universidad Politecnica Salesiana*, 2011.

[20] NM Tabatabaei and G Aghajani. Optimal Location of Facts Devices Using Adaptive Particle Swarm Optimization Mixed with Simulated Annealing. *International Journal on ...*, (June):60–70, 2011.

[21] Isidro Castillo Toledo. Un criterio óptimo para coordinar estabilizadores en sistemas eléctricos de potencia. *CINESTAV del IPN Unidad Guadalajara*, December 2002.

[22] Jose Hector vivas Nava. Sistemas Flexibles de transmisión en corriente alterna basados en convertidores tipo fuente de voltaje. modelación matemática y características operativas. *Universidad Simon Bolivar, Dpto. de Conversion y transporte de Energia*, November 2008.

[23] R. D. Zimmerman and C. E. Murillo-Sánchez. MATPOWER 4.1 User Manual. *Power Systems Engineering Research Center (PSERC)*, 2011.