

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS EN SISTEMAS DE
POTENCIA IMPLEMENTANDO UN ALGORITMO DE BÚSQUEDA DE LA
ARMONÍA**

JUAN PABLO SANMARTIN BURBANO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

**FACULTAD DE INGENIERÍAS: ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, FÍSICA Y
CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

LÍNEA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

PEREIRA, 2013

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE DISPOSITIVOS FACTS EN SISTEMAS DE
POTENCIA IMPLEMENTANDO UN ALGORITMO DE BÚSQUEDA DE LA
ARMONÍA**

PROYECTO DE GRADO

JUAN PABLO SANMARTIN BURBANO

DIRECTOR

Ph.D. (C) Alexander Molina Cabrera

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

**FACULTAD DE INGENIERÍAS: ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, FÍSICA Y
CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN**

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

LÍNEA EN ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

PEREIRA, 2013

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Pereira, Diciembre de 2013

AGRADECIMIENTOS

Si bien es requerido el esfuerzo y la dedicación por parte del autor de la tesis, no sería posible culminar este trabajo sin la cooperación de todas y cada una de las personas que estuvieron siempre a mi lado y fortalecieron un camino labrado de arduo trabajo.

Por esta razón quiero citar algunas líneas de agradecimiento puntual, sin dejar de llevar en mi corazón y agradecerles eternamente a todas esas personas que me apoyaron incondicionalmente.

Primero y antes que nada, dar gracias a Dios, por acompañarme siempre en todas los momentos de mi vida, por fortalecer cada paso que doy, por iluminar mi mente para culminar un eslabón más de esta cadena de logros.

A mi madre Stella Burbano por apoyarme incondicionalmente en mis estudios, desde el estudio de pregrado, hasta este nuevo paso; nunca dejaste de creer en mí y siempre me empujaste a un mejor mañana.

A toda mi Familia por el cariño y colaboración que de alguna u otra forma incidieron en la continua lucha de este sueño que hoy culmina.

Debo agradecer de manera muy especial y sincera al asesor de esta tesis, el Ph.D.(c) Alex Molina Cabrera a quien admiro por su inteligencia y conocimientos, y quien realizo un importante aporte y participación activa en el desarrollo de esta tesis.

CONTENIDO

	pág.
1 INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 Marco referencial.....	9
1.2 Justificación.....	9
1.3 Contenido de la tesis.....	10
2 ALGORITMO DE BÚSQUEDA DE LA ARMONÍA.....	11
2.1 Introducción.....	11
2.2 Generalidades de las técnicas metaheurísticas.....	11
2.3 El algoritmo de búsqueda de la armonía.....	12
2.4 Conclusiones.....	15
3 UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS FACTS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.....	17
3.1 Introducción.....	17
3.2 Los dispositivos FACTS.....	17
3.3 Tipos de dispositivos FACTS.....	19
3.3.1 Controladores en serie.....	19
3.3.2 Controladores en paralelo.....	21
3.3.3 Compensadores combinados.....	23
3.4 Importancia de la ubicación óptima de dispositivos FACTS.....	25
3.5 Metodología propuesta utilizando el HSA.....	26
3.5.1 Modelo del SVC.....	28
3.5.2 Modelo del STATCOM.....	28
3.6 Conclusiones.....	29
4 PRUEBAS Y RESULTADOS.....	30
4.1 Introducción.....	30
4.2 Sistemas de prueba.....	30
4.3 Resultados.....	32
4.3.1 Pruebas realizadas en el sistema de 4 barras.....	32
4.3.2 Pruebas realizadas en el sistema de 9 barras.....	34
4.3.3 Pruebas realizadas en el sistema de 30 barras.....	36
4.3.4 Pruebas realizadas en el sistema de 57 barras.....	38
4.3.5 Pruebas realizadas en el sistema de 118 barras.....	40
4.4 Conclusiones.....	42
5 CONCLUSIONES.....	43
5.1 Conclusiones generales.....	43

5.2	Recomendaciones	43
5.3	Trabajo futuro	44
6	BIBLIOGRAFÍA.....	45
7	ANEXOS.....	47
7.1	Manual de usuario de la herramienta HSA_FACTS	47
7.1.1	Introducción.....	47
7.1.2	Como utilizarlo.....	49

LISTADO DE TABLAS

	pág.
Tabla 3.1. Aplicaciones de FACTS en estado estable.....	25
Tabla 3.2. Aplicaciones dinámicas de FACTS.	26

LISTADO DE FIGURAS

	pág.
Figura 3.1. Compensador en paralelo ideal. (8).....	27
Figura 3.2. Arquitectura básica de un dispositivo SVC (8).....	28
Figura 3.3. Arquitectura básica de un dispositivo STATCOM (8).....	29
Figura 4.1. Diagrama unifilar del sistema de 14 barras (16).	30
Figura 4.2. Diagrama unifilar del sistema de 30 barras (16).	31
Figura 4.3. Diagrama unifilar del sistema de 57 barras (16).	31
Figura 4.4. Diagrama unifilar del sistema de 118 barras (16).	32
Figura 4.5. Interfaz de la herramienta HSA para el sistema de 4 barras.	32
Figura 4.6. Evolución del HSA para el sistema de 4 barras.....	33
Figura 4.7. Compensación reactiva para el sistema de 4 barras.	33
Figura 4.8. Magnitud de las tensiones nodales en el sistema de 4 barras....	34
Figura 4.9. Interfaz de la herramienta HSA para el sistema de 9 barras.	34
Figura 4.10. Evolución del HSA para el sistema de 9 barras.	35
Figura 4.11. Compensación reactiva para el sistema de 9 barras.	35
Figura 4.12. Magnitud de las tensiones nodales en el sistema de 9 barras..	36
Figura 4.13. Interfaz de la herramienta HSA para el sistema de 30 barras. .	36
Figura 4.14. Evolución del HSA para el sistema de 30 barras.....	37
Figura 4.15. Compensación reactiva para el sistema de 30 barras.	37
Figura 4.16. Magnitud de las tensiones nodales en el sistema de 30 barras	38
Figura 4.17. Interfaz de la herramienta HSA para el sistema de 57 barras. .	38
Figura 4.18. Evolución del HSA para el sistema de 57 barras.....	39
Figura 4.19. Compensación reactiva para el sistema de 57 barras.	39
Figura 4.20. Magnitud de las tensiones nodales en el sistema de 57 barras	40
Figura 4.21. Interfaz de la herramienta HSA para el sistema de 118 barras.	40
Figura 4.22. Evolución del HSA para el sistema de 118 barras.....	41
Figura 4.23. Compensación reactiva para el sistema de 118 barras.	41
Figura 4.24. Magnitud de las tensiones nodales en el sistema de 118 barra	42
Figura 7.1. Interfaz gráfica de la aplicación HSA_FACTS.	47
Figura 7.2. Cargando sistema de prueba.....	49
Figura 7.3. Cargando sistema de prueba directamente.	49
Figura 7.4. Datos del sistema de 14 Barras.....	50
Figura 7.5. Datos del sistema de 30 Barras.....	51
Figura 7.6. Datos del sistema de 57 Barras.....	54

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Marco referencial

El crecimiento de los sistemas eléctricos de potencia (SEP), está directamente relacionado al crecimiento económico de un país y este crecimiento se ve reflejado en el aumento de la carga, la cual en algunos puntos del sistema es desproporcionada, de manera que las empresas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica se ven en la necesidad de cubrir este crecimiento de la demanda cumpliendo con el marco regulatorio, los criterios de confiabilidad y seguridad, mediante el uso de tecnologías en protección, monitoreo y control.

Adicionalmente el esquema usual de funcionamiento del mercado eléctrico, que en muchos casos es desregularizado, provoca incrementos en los contratos bilaterales entre las empresas y los usuarios debido a la competencia que existe entre dichas empresas, y si esos contratos no son controlados, algunas líneas pueden sobrecargarse ya que el sistema no es capaz de transportar este incremento de potencia; y si además se suma la regulación ambiental que restringe la construcción de nuevas líneas o corredores, los SEP se ven condicionados para abastecer de manera oportuna la demanda.

Es así como los SEP operan cerca de sus límites de estabilidad y cargabilidad, provocando que se invierta un poco más en la operación y mantenimiento del sistema por parte de las empresas, bajo estas condiciones pueden ocurrir contingencias como un colapso en la tensión o una interrupción del servicio dentro del sistema [1].

De este modo, para obtener una operación estable y segura del SEP, se hace necesario ejercer un control sobre el mismo utilizando algunos dispositivos de electrónica de potencia llamados Sistemas de Transmisión Flexible en Corriente Alterna (Flexible AC Transmission System, FACTS), los cuales pueden mejorar la estabilidad del sistema controlando los transitorios, la estabilidad de baja señal y los flujos de potencia en las líneas sobrecargadas, reflejándose a su vez en menores pérdidas así como en una operación más segura del SEP [2].

1.2 Justificación

En la última década los FACTS han recibido una especial atención de las empresas encargadas de la operación del SEP, debido a que son dispositivos electrónicos que pueden controlar flujos de potencia y tensiones en las diferentes barras del sistema, proporcionando una operación más confiable y segura.

Para las empresas, el uso de los FACTS en los SEP les permite tener otras opciones para afrontar los problemas causados por el aumento de la carga, diferentes a la de inversiones en infraestructura, la construcción de nuevas líneas de transmisión y el impacto ambiental que esto conlleva. Para ello, se debe alcanzar un equilibrio entre la confiabilidad que se requiere y la inversión económica necesaria para lograrlo.

Es claro entonces que se debe contar con estudios técnicos para determinar la ubicación de los FACTS en los lugares más apropiados del SEP, para que mediante el uso de los FACTS las empresas puedan tener una operación más eficiente, de alta confiabilidad operacional y buena rentabilidad.

Por tanto este trabajo hace referencia precisamente a la ubicación óptima de dispositivos FACTS, de modo que las empresas encargadas de la transmisión de energía operen los SEP de una manera óptima y rentable.

1.3 Contenido de la tesis

En este documento se presenta los resultados obtenidos en la investigación desarrollada, entregando como producto final, una herramienta de software que permite ubicar dispositivos FACTS en un sistema de Potencia.

El documento se estructura de la siguiente forma: en el capítulo 1 se realiza una introducción al tema de investigación. En el capítulo 2 se presenta la técnica a utilizar para dar solución al tema investigado, mostrando las generalidades y la fundamentación matemática de la técnica. En el capítulo 3 se describe la teoría básica de los dispositivos FACTS, los diferentes tipos y sus principales características de operación, además se presenta la metodología propuesta y los dispositivos FACTS utilizados en esta propuesta, así como también los modelos matemáticos de dichos dispositivos. En el capítulo 4 se presentan las simulaciones y pruebas realizadas.

Luego, en el capítulo 5 se discuten las conclusiones y sugerencias para darle continuidad a este tema de investigación. Por último, en el capítulo 7 se incluye como anexos la herramienta de software desarrollada y el manual de usuario de dicha herramienta.

2 ALGORITMO DE BÚSQUEDA DE LA ARMONÍA

2.1 Introducción

En las últimas cuatro décadas, un gran número de algoritmos se han desarrollado para resolver varios problemas en ingeniería, pero las desventajas computacionales existentes en los métodos numéricos han hecho que los investigadores se fijen en algoritmos metaheurísticos para enfrentar diversos problemas en ingeniería [3]. Es así como el Algoritmo de Búsqueda de la Armonía (HSA), surge como respuesta a los inconvenientes que se presentan en los métodos numéricos actuales.

2.2 Generalidades de las técnicas metaheurísticas

Según [4], los algoritmos heurísticos típicamente intentan encontrar una buena solución en un problema de optimización por medio de prueba y error en un razonable tiempo computacional. En este caso el término “heurístico” está asociado con “encontrar” o “buscar” soluciones por medio de prueba y error. Esta estrategia no garantiza encontrar la solución óptima, pero si una mejor solución que haciendo uso de opiniones o conceptos determinísticos.

A menudo las soluciones encontradas por estas técnicas, resultan ser óptimos locales o ser cercanas al óptimo global. En términos generales los métodos de búsqueda local son heurísticos ya que sus parámetros de búsqueda están enfocados en variaciones locales, y el óptimo o la mejor solución puede encontrarse fuera de la región de búsqueda. De esta forma se obtienen soluciones factibles pero no de alta calidad, y son aceptadas en muchos problemas de optimización ya que en la práctica el tiempo computacional es la mayor restricción.

Los algoritmos metaheurísticos son algoritmos heurísticos de alto nivel, en este caso “meta” indica que está asociado a un “alto nivel” o al “ir más allá” en la búsqueda de soluciones, aunque sigue existiendo cierta dosis de prueba y error. En términos generales las metaheurísticas son consideradas técnicas o estrategias las cuales intentan combinar tácticas de exploración y explotación para encontrar soluciones óptimas. Dentro de las técnicas metaheurísticas más usuales se encuentran: Particle Swarm Optimization (PSO), Simulated Annealing (SA), Genetic Algorithms (GA), Tabu Search (TS), Ants Colony Optimization, y por supuesto el Harmony Search Algorithm (HSA).

Para que un algoritmo de optimización sea efectivo y eficiente, debe ser capaz de generar un rango diverso de soluciones incluyendo las potenciales soluciones óptimas, de esta forma se explora efectivamente todo el espacio

solución. De acuerdo a [4], para cumplir con dicho objetivo las técnicas metaheurísticas hacen uso de dos conceptos:

- **Diversificación:** este concepto está asociado a la forma de realizar la búsqueda en el espacio solución, de manera que sea posible acceder a todo el espacio durante la búsqueda, a menudo la diversificación tiene un componente de aleatoriedad atado a un criterio determinístico, con el fin de explorar el espacio de solución de una forma efectiva y eficiente.
- **Intensificación:** está relacionada con la explotación de soluciones anteriores, intensificando la búsqueda en la vecindad de un óptimo o cerca de la solución óptima, con el objeto de seleccionar buenas soluciones por medio del elitismo o uso de la memoria.

Por tanto un algoritmo metaheurístico exitoso requiere de un buen balance de estos dos aspectos, aunque puedan parecer opuestos, ya que si la intensificación es muy fuerte, solo una fracción del espacio de búsqueda será visitada, y existe el riesgo de quedar atrapados en óptimos locales, por otro lado si la diversificación es muy fuerte la convergencia del algoritmo es muy lenta debido a que se realizan grandes saltos en el espacio de solución perdiendo de vista potenciales soluciones óptimas. Típicamente en un algoritmo metaheurístico la solución inicial es generada de forma aleatoria, y gradualmente se reduce la diversificación mientras se incrementa la intensificación a medida que el algoritmo avanza en la búsqueda de la solución óptima.

Otro aspecto importante de las técnicas metaheurísticas, es el hecho de que para obtener la solución óptima, pueden hacer uso ya sea de una trayectoria o de una población, por ejemplo la técnica de SA es un algoritmo basado en la trayectoria, porque el camino de búsqueda de soluciones sigue una trayectoria que se desplaza hacia soluciones más atractivas. Por otro lado los GA son técnicas poblacionales, ya que la búsqueda se lleva a cabo por medio de múltiples generaciones de individuos. Es difícil decidir cuál de estos dos principios es más eficiente ya que los dos trabajan de manera exitosa bajo determinadas condiciones, aunque en algunos estudios se concluye que para problemas de optimización multiobjetivo y multimodal, las técnicas basadas en población resultan ser más eficientes que las basadas en trayectoria, pero parece que una buena combinación de estos dos aspectos puede llevar a encontrar mejores soluciones [4].

2.3 El algoritmo de búsqueda de la armonía

El HSA es una nueva técnica de optimización metaheurística que se inspira en el proceso de improvisación musical donde el objetivo de los músicos es encontrar una armonía agradable. Esta armonía en música es comparable a encontrar el óptimo en un proceso de optimización. Una armonía musical

perfectamente placentera está determinada por un patrón estético donde cada nota musical suena con un tono dentro de un rango posible, un músico intenta siempre producir una pieza musical con una perfecta armonía, al igual que sucede en un problema de optimización donde la solución puede ser la mejor solución disponible del problema bajo ciertas restricciones y objetivos [5].

Estas similitudes entre los dos procesos puede ser usado para desarrollar nuevos algoritmos, siendo el HSA un ejemplo exitoso donde un proceso cualitativo de improvisación como la belleza y armonía de la música, se ha transformado en algunas reglas cuantitativas para un proceso de optimización a través de la búsqueda de una armonía perfecta. Las etapas en [6], que conforman el HSA son las siguientes:

Etapla 1: inicializar los parámetros del algoritmo y el problema de optimización.

Se formula el problema de optimización como lo muestra la expresión (2.1).

$$\begin{aligned} & \text{Min } F(x) \\ & \text{s. a. } x_i \in X_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N. \end{aligned} \tag{2.1}$$

Donde:

$F(x)$: Función objetivo.

x : Conjunto de las variables de decisión (x_i).

X_i : Conjunto de rango de posibles valores para cada variable ($Lx_i < X_i < Ux_i$).

N : Número de variables de decisión.

En esta etapa también se especifican los diferentes parámetros utilizados en el algoritmo como:

- Número de vectores solución en la memoria de armonía (HMS , Harmony Memory Size).
- Tasa de selección de los elementos almacenados en la memoria ($HMCR$, Harmony Memory Considering Rate).
- Tasa de ajuste de tono (PAR , Pitch Adjusting Rate).
- Número de variables de decisión (N).
- Número de improvisaciones (NI).
- Criterio de parada.

Etapla 2: inicializar la memoria de armonía (HM , Harmony Memory).

En esta etapa del algoritmo el HM , es una memoria de localización donde todos los vectores solución (conjunto de variables de decisión), están almacenados en un arreglo matricial donde sus elementos son generados

aleatoriamente (vectores solución), de tamaño HMS , tal como se muestra en la expresión (2.2).

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_{N-1}^1 & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_{N-1}^2 & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS-1} & x_2^{HMS-1} & \dots & x_{N-1}^{HMS-1} & x_N^{HMS-1} \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_{N-1}^{HMS} & x_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Etapa 3: improvisar una nueva armonía.

En esta etapa se genera un nuevo vector de armonía $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$, basado en tres reglas:

- Considerar la HM .
- Ajustar el tono
- Realizar una selección aleatoria.

A la acción de generar este vector se le denomina improvisación. El valor de la primera variable de decisión (x'_1) para el nuevo vector puede ser elegido de cualquier valor en el rango específico del HM ($x_1^1 - x_1^{HMS}$). Los valores de las otras variables de decisión (x'_2, x'_3, \dots, x'_n) se eligen de la misma manera.

El $HMCR$, el cual puede variar entre 0 y 1, es la tasa de selección de un valor de los valores históricos almacenados en la HM , mientras $(1 - HMCR)$, es la tasa de selección aleatoria de un valor dentro de un posible rango de valores, como se muestra en (2.3).

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} x'_i \in \{x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{HMS}\} & \text{con probabilidad } HMCR \\ x'_i \in X_i & \text{con probabilidad } (1 - HMCR) \end{cases} \quad (2.3)$$

Por ejemplo, un $HMCR$ de 0.90 indica que el HSA escogerá el valor de la variable de decisión de los valores históricos almacenados en la HM con un 90% de probabilidad de todo el rango posible de valores con 100-90% de probabilidad.

Cada componente del nuevo vector de armonía, $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ es examinado para determinar si debe o no ser ajustado su tono. Esta operación usa el parámetro PAR , el cual es la tasa de ajuste y se presenta en la expresión (2.4).

$$x'_i \leftarrow \begin{cases} SI & \text{con probabilidad } PAR \\ NO & \text{con probabilidad } (1 - PAR) \end{cases} \quad (2.4)$$

El conjunto de valores de $(1 - PAR)$ ajusta la tasa de no hacer nada, si la decisión para el ajuste de tono de x'_i es positiva, entonces x'_i es reemplazada de acuerdo a la expresión (2.5).

$$x'_i \leftarrow x' + bw * U(-1,1) \quad (2.5)$$

Donde:

bw : Distancia arbitraria del ancho de banda para variable de decisión.

$U(-1,1)$: Distribución uniforme entre -1 y 1.

En esta etapa las tres reglas son aplicadas a cada variable del nuevo vector de armonía sucesivamente.

Etapa 4: actualizar la *HM*.

En esta etapa si el nuevo vector de armonía, $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$ es mejor que el peor vector almacenado en la *HM*, desde el punto de vista del valor de la función objetivo, el nuevo vector se incluye en la *HM* y se excluye el peor vector existente en la *HM*.

Etapa 5: verificar el criterio de parada

En esta etapa se verifica si el criterio de parada es alcanzado (máximo número de improvisaciones), en cuyo caso se finaliza la optimización, de lo contrario se retorna a las etapas 3 y 4.

2.4 Conclusiones

Si se analiza y compara el HSA en contexto con la mayoría de la técnicas metaheurísticas, se puede identificar aspectos que permiten tener un mejor manejo de los parámetros de intensificación y diversificación que la hacen exitosa con respecto a otras metaheurísticas.

En el HSA la diversificación es principalmente controlada por el parámetro ajuste de tono y la aleatoriedad (dos componentes importantes si se piensa en la eficiencia del método), la aleatoriedad explora el espacio de una forma más eficiente y efectiva, mientras el ajuste de tono asegura que las nuevas soluciones generadas sea lo suficientemente buenas, o que éstas no estén muy alejadas de las soluciones de buena calidad existentes en el espacio de solución.

La intensificación es principalmente controlada por la *HMCR*. Una *HMCR* alta significa más posibilidades de seleccionar buenas soluciones dentro la memoria, por el contrario, si la *HMCR* es baja la solución convergerá de una forma más lenta.

En resumen, la implementación del HSA es menos complicada que otras técnicas metaheurísticas. Las aplicaciones presentadas por los diferentes investigadores muestran que esta técnica es menos sensible a la elección de los parámetros, lo cual significa que no es necesario de un ajuste fino de los parámetros para obtener soluciones de buena calidad.

3 UBICACIÓN DE DISPOSITIVOS FACTS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

3.1 Introducción

Debido al crecimiento de los SEP y a la desregulación, surgieron problemáticas que han causado serias perturbaciones en los sistemas, que generan medidas adicionales para el control de flujo de carga y para suplir el servicio con confiabilidad en todo el sistema.

Con el objeto de superar estas circunstancias e incrementar el amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas, son necesarios otros equipos efectivos como apoyo auxiliar a los dispositivos convencionales. Los dispositivos FACTS, por sus características de versatilidad de control, y de velocidad de respuesta ante las perturbaciones, son el mejor dispositivo adicional de control en un SEP [7].

3.2 Los dispositivos FACTS

Como se presenta en [8], las innovaciones en tecnología de semiconductores han permitido la construcción de nuevos y poderosos tiristores como los tiristores de apagado de puerta, GTOs (Gate Turn-off Thyristors) y como los transistores bipolares de puerta aislada, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

El desarrollo basado en esos dispositivos semiconductores primero estableció la tecnología de transmisión DC a alta tensión (HVDC), como una alternativa para la transmisión AC a largas distancias, y esta tecnología, a su vez, estableció la base para el desarrollo de los sistemas de transmisión flexible en AC (FACTS).

Los controladores FACTS son el resultado de una combinación de equipos convencionales de compensación, tecnología de punta en electrónica de potencia y de microelectrónica. Estos aspectos sumados al uso de los avances en el área de las comunicaciones, hacen que los dispositivos FACTS sean equipos que contribuyen a una operación óptima de un SEP.

Es así que los FACTS pueden ser definidos como elementos en el sistema de transmisión basados en electrónica de potencia, y en otros controladores estáticos, cuyo fin es aumentar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transferencia de potencia de un sistema eléctrico.

Los dispositivos FACTS tienen como base operativa el desarrollo de dispositivos semiconductores con poderosas características en cuanto a capacidad de potencia, tamaño y relación costo/beneficio.

Los más poderosos dispositivos semiconductores para aplicaciones de potencia siguen siendo los tiristores, los cuales tienen la capacidad de manejar más de 10 kV y llevar corrientes superiores a los 5 kA. Algunos de estos dispositivos, como el GTO, ofrecen ventajas adicionales para interrupción de corriente, lo que permite el uso de convertidores de conmutación forzada, que es una de las ventajas constructivas y de las características avanzadas de los dispositivos FACTS [9].

Los dispositivos IGBT son utilizados en convertidores de baja capacidad nominal de potencia, principalmente son utilizados en redes de medio y baja tensión y son parte importante de muchos dispositivos empleados para incrementar la calidad de la potencia en estos niveles de tensión, gracias a sus características de rapidez de respuesta ya que permiten la conmutación con frecuencias en un rango entre los 3kHz y los 10kHz.

Aunque los tiristores son parte fundamental de la operación de un dispositivo FACTS, es posible realizar simplificaciones circuitales a la hora de analizar el impacto de un dispositivo FACTS en los flujos de potencia en un sistema. Estas simplificaciones suponen la operación adecuada del equipo FACTS como un todo, y no requieren detallar las dinámicas de un tiristor en la operación de un SEP.

En términos generales, los dispositivos FACTS pueden generar los siguientes impactos sobre el sistema de potencia:

- Pueden proporcionar un control rápido y continuo del flujo de potencia en los sistemas de transmisión controlando las tensiones en los nodos críticos, cambiando la impedancia de las líneas de transmisión o controlando el ángulo de fase al final de las líneas.
- Permiten el incremento de la cargabilidad de las líneas de transmisión a niveles cercanos a los límites térmicos. Por ello pueden aumentar la transferencia de potencia a través de sistemas de transmisión que tienen restricciones en la actualidad, optimizando el uso de la infraestructura disponible y suministrando potencia a bajos costos a un gran número de consumidores.
- Permiten la disminución de las oscilaciones que pueden dañar equipos y/o limitar la capacidad de transmisión de potencia eléctrica. Por esto pueden ser aplicados para manejo de la congestión e incremento de la estabilidad.
- Permiten al sistema mayor habilidad para transferir potencia eléctrica entre áreas controladas, de forma que los márgenes de generación de reserva se reduzcan de 18% a 15%.

- Permiten la prevención de salidas en cascada al evitar los efectos de fallas y de equipos dañados.
- Permiten disminución de pérdidas de potencia activa, menores costos de producción de energía y cumplimiento de requerimientos contractuales mediante el control de los flujos de potencia en la red.

Es importante notar que el aprovechamiento de las ventajas de los sistemas de comunicación actuales en las redes de potencia y las altas velocidades de respuesta de los dispositivos tiristores que conforman la dinámica de los FACTS, son esenciales para que estos dispositivos puedan operar sobre los flujos de potencia cuando se quieren resolver problemas de inestabilidad en el SEP. Por otro lado, es un factor crucial el seleccionar la mejor solución desde los puntos de vista técnico y económico, dado que hay una gran variedad de dispositivos que pueden ser utilizados para estos efectos.

3.3 Tipos de dispositivos FACTS

a) Primera generación de equipos FACTS

Los primeros desarrollos de la tecnología FACTS consistieron en la adición de las nuevas tecnologías en electrónica de potencia a los transformadores desfasadores y con cambio de derivación. También son considerados como pertenecientes a esta primera generación de equipos FACTS, los compensadores serie y paralelo controlados por tiristores.

b) Segunda generación de equipos FACTS

En la actualidad, la investigación está más enfocada a los equipos de la segunda generación, los cuales están basados en Conversores de Fuentes de Tensión, VSC (Voltage Source Converters), y cuyas capacidades de control, funcionalidad, y versatilidad en la interacción con el sistema, son más sofisticadas que sus pares de la primera generación. Esta segunda generación ha tenido como base una de las ventajas de los dispositivos FACTS: se pueden obtener nuevos equipos más completos y versátiles mediante la combinación de una variedad de diferentes equipos de la familia FACTS.

A continuación se presentan los distintos tipos de compensación, los cuales, según su forma de conexión a la red, se clasifican como controladores serie, controladores paralelo, y combinaciones de controladores serie-paralelo.

3.3.1 Controladores en serie

El controlador serie puede ser una impedancia variable, como un condensador, un reactor, o un convertidor estático con frecuencias

fundamental, sub-síncrona y armónicas. En principio, todos los controladores serie inyectan una tensión en serie con la línea ya que una impedancia variable en serie, multiplicada por el flujo de corriente, representa una tensión serie inyectada a la línea. Mientras que la tensión esté en cuadratura con la corriente de línea, el controlador serie solo consume o inyecta potencia reactiva. Cualquier otra combinación de fase involucrará también el manejo de potencia activa. Así, el efecto fundamental de este tipo de equipos es controlar la corriente en la línea de transmisión [10].

Los dispositivos FACTS para compensación serie son los siguientes:

a) Compensador Serie Conmutado por Tiristores (TSSC): Este dispositivo es una reactancia capacitiva que consiste en un arreglo de bancos de condensadores en serie con la línea y en paralelo con un interruptor formado por tiristores para lograr una variación escalonada de la reactancia. El grado de compensación varía sólo entre valores discretos. En este caso la capacitancia equivalente se controla con el número de interruptores cerrados

b) Compensador Serie Controlado por Tiristores (TCSC): Este controlador es, en esencia, un condensador en serie con la línea y en paralelo con un reactor controlado por un arreglo de tiristores. Controlando el ángulo de encendido del tiristor, se puede modificar la impedancia efectiva del reactor en paralelo. De esta forma, con el TCSC puede obtenerse un rango continuo de variación para el grado de compensación

c) Compensador Serie de VAR Estático (SSVC): Consiste en un arreglo de compensadores en serie con la línea (TSSC, TCSC), manejados por un controlador con una estrategia de control específica, típicamente mantiene un flujo determinado de potencia activa por una línea. El sistema de control requiere datos de corriente y de tensión que se obtienen de transformadores de medida como TC y TP.

d) Compensador Serie Sincrónico Estático (SSSC): Es uno de los controladores FACTS más importantes. Este permite la inyección de una tensión serie en cuadratura con la corriente de línea e independientemente de ésta. Su propósito es aumentar o disminuir la caída de tensión reactiva de la línea y controlar así la potencia transferida.

Este equipo puede incluir dispositivos de almacenamiento o absorción de energía para mejorar el desempeño dinámico del sistema de potencia por medio de la compensación adicional de potencia activa temporal, incrementando o disminuyendo temporalmente la caída de tensión resistiva de la línea. Y puede estar basado en convertidores de tensión o de corriente pero su conexión es en serie con la línea. La tensión inyectada será relativamente pequeña comparada con la tensión de la línea y el aislamiento a tierra deberá de ser bastante elevado.

Este compensador, a diferencia de otros equipos serie, no utiliza dispositivos de conmutación para controlar la circulación de corriente del elemento de compensación (condensador, bobina). La inyección de tensión en cuadratura se obtiene con un condensador en corriente continua, conectado a la línea de transmisión a través de un convertidor de fuente de tensión (VSC) y un transformador serie. El grado de compensación se controla modificando la tensión de salida del VSC, pudiendo incluso invertirse la fase, obteniéndose así compensación inductiva. El SSSC puede entregar una tensión de salida independiente de la corriente de línea, por lo tanto su impedancia es esencialmente cero en la frecuencia fundamental. El sistema de control requiere muestreos de corriente y de tensión que se obtienen de transformadores de medida como TC y TP.

e) Reactor serie controlado por tiristores (TCSR): Es básicamente un compensador de reactancia inductiva que se conforma de un reactor en serie con la línea y en paralelo a un reactor controlado por tiristores. Este dispositivo logra una variación continua de la reactancia inductiva. Hay una versión conocida como TSSR, que corresponde a un reactor serie conmutado por tiristores que solo permite una variación discreta de la reactancia inductiva.

f) Compensadores por ángulo de fase: La compensación por ángulo de fase corresponde a un caso especial de la compensación serie. La idea es introducir una tensión controlable en magnitud y fase, en serie, en la rama en la que se quiere controlar transferencia de potencia.

El módulo de la tensión inyectada, se controla mediante un arreglo de tiristores entre ambos transformadores (cambiador de taps basado en tiristores). Existen distintos arreglos de tiristores que dan lugar a cambiadores de taps continuos, discretos, de paso constante o en progresión geométrica, etc. A toda esta familia de reguladores se le conoce como Reguladores de Ángulo de Fase Controlados por Tiristor, TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator). El TCPAR puede influenciar un rápido cambio en el ángulo de fase y está basado en tiristores típicos o en dispositivos GTO.

3.3.2 Controladores en paralelo

Los controladores en paralelo son dispositivos que mediante la inyección de corriente reactiva, permiten controlar la tensión en un nodo, independientemente de las líneas conectadas a éste, (a diferencia de un controlador serie, que en algunos casos podría requerir controladores independientes para cada línea, sobre todo en el supuesto fallo de una de ellas). Así, el principio de operación de un controlador paralelo consiste en suministrar potencia reactiva a la línea, buscando aumentar la transferencia de potencia activa por ella mediante una mejora en su factor de potencia, y manteniendo a la vez los niveles de tensión dentro de los rangos de seguridad bajo condiciones de carga extremas.

Los dispositivos FACTS diseñados para realizar compensación en paralelo, más relevantes, son:

a) Reactor Controlado por Tiristores (TCR): Es un reactor en serie con un arreglo bidireccional de tiristores, conectado en paralelo al sistema y cuya reactancia es variada de manera continua mediante el control del ángulo de disparo de los tiristores del arreglo. De esta manera se logra un control de la corriente de compensación.

En un sistema de potencia se utilizan dispositivos TCR trifásicos que utilizan filtros y otros arreglos de cancelación de armónicos para prevenir que las corrientes armónicas generadas por las conmutaciones de los tiristores alcancen el lado de alta tensión de la red.

b) Condensador Conmutado por Tiristores (TSC): Consiste en un condensador en serie con una inductancia. Éstos a su vez están en serie con un arreglo bidireccional de tiristores. El capacitor es de capacidad fija y la inductancia es para limitar sobrecorrientes, controlando el ciclo de trabajo del tiristor se puede variar la corriente de compensación inyectada en la línea.

c) Compensador de VAR Estático (SVC): En su forma simple, el SVC consiste de un TCR en paralelo con banco de capacitores. Puede contar, en lugar de un TCR con un TSC de manera que permite realizar compensación capacitiva o inductiva.

Desde el punto de vista operacional, el SVC se comporta como una reactancia variable conectada en paralelo, la cual genera o absorbe potencia reactiva con el objeto de regular la magnitud de la tensión en el punto de conexión a la red. Son usados ampliamente para proveer de manera rápida potencia reactiva, dar soporte en la regulación del tensión, controlar sobretensiones ante la salida de carga, mejorar la estabilidad de los sistemas de AC y dar amortiguamiento ante las oscilaciones de potencia. Los compensadores operan coordinados por un sistema de control, y tienen velocidad de respuesta casi instantánea.

d) Compensador Estático de VAR (STATCOM): Es un controlador que proporciona una corriente capacitiva o inductiva que puede ser controlada independientemente de la tensión del sistema. Es uno de los controladores FACTS más importantes y no utiliza dispositivos de conmutación directamente sino que está basado en un convertor estático de fuente de tensión (VSC). La inyección de corriente se obtiene con un condensador en corriente continua, conectado a la línea de transmisión mediante el VSC y un transformador en paralelo. La salida de tensión es controlada de manera que se puede mantener la corriente requerida. La tensión del condensador se ajusta automáticamente para que sirva de fuente de corriente directa al inversor que conforma el STATCOM.

El STATCOM puede proporcionar compensación capacitiva o inductiva, según sea la necesidad, controlando la magnitud relativa entre la tensión de línea y la tensión de salida del inversor. Este compensador se comporta esencialmente como un compensador sincrónico, permitiendo un control continuo de la potencia reactiva, y ofreciendo una mayor velocidad de respuesta, mayor estabilidad y mejor manejo de perturbaciones dinámicas que un SVC.

e) Generador Síncrono Estático, SVG: Es en esencia un dispositivo que produce tensiones polifásicas, acoplado a la línea, puede intercambiar potencia activa y reactiva con ésta. Es una combinación de un STATCOM y una fuente de energía para poder suministrar o absorber energía. La fuente de energía puede ser un banco de baterías o un elemento de almacenamiento superconductor, entre otros.

3.3.3 Compensadores combinados

Son varios los dispositivos FACTS que combinan las ventajas de los dispositivos serie y paralelo buscando mejores prestaciones técnicas y financieras en su aplicación en un SEP. Los tres más relevantes son: el Controlador Interlínea de Flujos de Potencia, el Controlador Unificado de Flujos de Potencia Generalizado y el Controlador Unificado de Flujos de Potencia.

Los dos primeros, a diferencia del tercero, pueden controlar los flujos de dos o más líneas y son considerados dispositivos teóricos ya que en la actualidad no se han instalado en un sistema de potencia [7].

a) Controlador Interlínea de Flujos de Potencia, IPFC (Interline Power Flow Controller): El IPFC, propuesto por Gyugyi, Sen y Schauder en 1998, básicamente consiste en un dispositivo que controla un arreglo de compensadores serie (como mínimo dos), cada uno de los cuales está instalado en líneas diferentes. Los compensadores serie son del tipo SSSC, los cuales comparten un enlace común en corriente continua, por lo cual, al igual que en el UPFC, la suma de la potencia activa intercambiada entre los convertidores debe ser igual a cero si se desprecian las pérdidas en los circuitos de los convertidores.

El esquema IPFC, junto con la compensación reactiva serie independientemente controlable de cada línea individual, permite manipular la potencia activa entre las líneas controladas. Esto permite estabilizar potencia activa y reactiva entre las líneas, reducir la carga de líneas sobrecargadas mediante la transferencia de potencia activa permitiendo hacer un manejo adecuado de la congestión, compensar contra caídas de tensión resistivas en la línea y la correspondiente demanda de potencia reactiva, e incrementar la efectividad del sistema de compensación global para perturbaciones dinámicas. En otras palabras, el IPFC puede proveer un

esquema altamente efectivo para el manejo de la transmisión de potencia en una subestación donde converjan múltiples líneas.

b) Controlador Unificado de Flujos de Potencia Generalizado, GUPFC (Generalized Unified Power Flow Controller). El dispositivo GUPFC, propuesto por Gyugyi y colaboradores en 1998, combina tres o más convertidores serie y paralelo trabajando juntos para incrementar las ventajas del control de tensión y del control de flujo de potencia. El GUPFC más simple tiene tres convertidores. Uno de los tres convertidores es conectado en paralelo con un nodo y los otros dos están en serie, a través de transformadores, con dos líneas de transmisión, conectados todos en una subestación.

c) Controlador Unificado de Flujos de Potencia, UPFC: El concepto de controlador unificado de flujo de potencia fue introducido en la literatura mundial en 1991 por Gyugyi, y fue concebido para el control en tiempo real y la compensación dinámica de los sistemas de transmisión AC mediante el suministro de la flexibilidad multifuncional requerida para el control de un sistema de potencia moderno. El UPFC es capaz de controlar simultánea o selectivamente todos los parámetros, que afectan el flujo de potencia en una línea de transmisión.

Adicionalmente, el dispositivo es capaz de controlar de manera independiente la potencia activa y la potencia reactiva, a diferencia de los dispositivos serie o paralelo, en los que el control de potencia activa es asociado con un cambio similar en potencia reactiva, es decir, en estos dispositivos simples incrementar el flujo de potencia activa también involucra un incremento de la potencia reactiva en la línea.

Los dispositivos FACTS serie o paralelo pueden realizar algún tipo de compensación que modifica el flujo de potencia de una línea. Sin embargo, cada uno presenta ciertas limitaciones en cuanto a la generación de reactivos y el intercambio de potencia activa con la línea. En los equipos basados en tiristores y válvulas convencionales, estas capacidades se encuentran separadas. Los equipos son, o bien generadores de reactivos como el SVC y el TCSC, incapaces de intercambiar potencia activa con el sistema, o reguladores como el TCPAR, que pueden intercambiar potencia activa pero no pueden generar reactivos.

En cambio, los equipos basados en convertidores de fuente de tensión, VSC, como el STATCOM y el SSSC, tienen la capacidad inherente de intercambiar potencia activa y reactiva con el sistema. Estos equipos generan o absorben automáticamente la potencia reactiva requerida y, por lo tanto, pueden realizar compensación de reactivos sin necesidad de condensadores o reactores en corriente alterna. Sin embargo, la potencia activa intercambiada con el sistema debe ser suministrada por ellos o absorbida desde ellos.

3.4 Importancia de la ubicación óptima de dispositivos FACTS

Los dispositivos FACTS pueden proporcionar un control rápido y continuo del flujo de potencia en los sistemas de transmisión controlando las tensiones en los nodos críticos, cambiando la impedancia de las líneas de transmisión o controlando el ángulo de fase al final de las líneas. La tecnología FACTS se ha implementado gracias a los grandes desarrollos realizados en términos de capacidad de manejo de potencia y de velocidad de respuesta en dispositivos tiristores de electrónica de potencia que permiten la construcción de equipos que se pueden adicionar con altos niveles de seguridad y eficiencia a los SEP.

Uno de los conceptos básicos para mitigar el enorme desbalance de potencia entre la potencia mecánica del generador y la carga eléctrica durante una perturbación, está basado en la habilidad de los controladores FACTS para variar rápidamente los parámetros afectados por el flujo de potencia tales como la reactancia de la línea [11].

Entre algunas de las ventajas de los dispositivos FACTS se pueden mencionar, un mayor control de potencia, la habilidad de cargar las líneas de transmisión en niveles cercanos a sus límites térmicos y una mayor facilidad para transferir potencia entre áreas controladas, de tal forma que se pueden reducir los márgenes de reserva de generación. Los dispositivos FACTS han probado ser efectivos para aumentar o disminuir el amortiguamiento de algunos modos de oscilación que pueden variar dependiendo de algunas condiciones de operación.

TEMA	PROBLEMA	ACCIÓN CORRECTIVA	CONTROLADOR FACTS
LÍMITES DE TENSIÓN	Baja tensión debido a gran consumo	Suministrar potencia reactiva	STATCOM, SVC
	Alta tensión debido a consumo ligero	Absorber potencia reactiva	STATCOM, SVC, TCR
	Alta tensión luego de una contingencia	Absorber potencia reactiva, prevenir sobrecarga	STATCOM, SVC, TCR
	Baja tensión luego de una contingencia	Suministrar potencia reactiva	STATCOM, SVC
LÍMITES TÉRMICOS	Circuito de transmisión sobrecargado	Reducir sobrecarga	TCSC, SSSC, UPFC, IPFC, TCPAR
	Desconexión de un circuito paralelo	Limitar carga de circuitos restantes	TCSC, SSSC, UPFC, IPFC, TCPAR
FLUJOS CIRCULANTES	Reparto de carga en líneas paralelas	Ajustar reactancia serie	IPFC, SSSC, UPFC, TCSC, TCPAR
	Reparto de flujos de potencia post-falla	Reordenar red	IPFC, TCSC, SSSC, UPFC, TCPAR
	Inversión de sentido de flujo de potencia	Ajustar ángulo de fase	IPFC, SSSC, UPFC, TCPAR

Tabla 3.1. Aplicaciones de FACTS en estado estable [8].

En la tabla 3.1 se muestran en resumen algunas aplicaciones de controladores FACTS, bajo condiciones de estado estable, en temas como límites de tensión y límites térmicos de las líneas de transmisión. En la tabla 3.2 se muestran aplicaciones de tipo dinámico y se discriminan los sistemas como sistemas de tipo A, aquellos que tienen generación remota y líneas radiales, sistemas tipo B, aquellos que tienen áreas interconectadas, sistemas tipo C, aquellas redes altamente enmalladas, y como sistemas tipo D, aquellas redes débilmente enmalladas.

TEMA	TIPO DE SISTEMA	ACCIÓN CORRECTIVA	CONTROLADOR FACTS
ESTABILIDAD TRANSITORIA	A, B, D	Incrementar torque sincronizante	TCSC, TSSC, UPFC
	B, C, D	Control dinámico de flujos	IPFC, TCPAR, UPFC, TCSC
AMORTIGUAMIENTO DE OSCILACIONES	A	Amortiguamiento de oscilaciones de 1 Hz	TCSC, STATCOM
	B, D	Amortiguamiento de oscilaciones de baja frecuencia	IPFC, TCPAR, UPFC; TCSC, STATCOM
CONTROL DE TENSIÓN POST CONTINGENCIA	A, B, D	Soporte dinámico de tensión	STATCOM, UPFC, IPFC
		Control dinámico de flujos	UPFC, IPFC, TCPAR
		Soporte de tensión y control de flujos dinámicos	IPFC, UPFC, TCSC
	A, B, C, D	Reducir impacto de la contingencia	TCSC, STATCOM, UPFC
ESTABILIDAD EN TENSIÓN	B, C, D	Soporte reactivo	STATCOM, UPFC
		Acciones de control sobre la red	UPFC, TCSC, STATCOM

Tabla 3.2. Aplicaciones dinámicas de FACTS [8].

3.5 Metodología propuesta utilizando el HSA

En esta propuesta se han seleccionado dos diferentes tipos de dispositivos FACTS para ser ubicados en un sistema de potencia, los cuales son el STATCOM y el SVC, que se pueden utilizar para controlar la potencia activa y reactiva en una red de transmisión.

Como se mencionó anteriormente estos dispositivos pertenecen al grupo de controladores en paralelo, para comprender mejor el principio de compensación en paralelo, se hace uso del diagrama circuital mostrado en la figura 3.1, en donde se desprecia las pérdidas debido a la componente resistiva de la línea, el compensador es ubicado en el punto medio de la línea de transmisión dividiéndola en dos segmentos iguales [8].

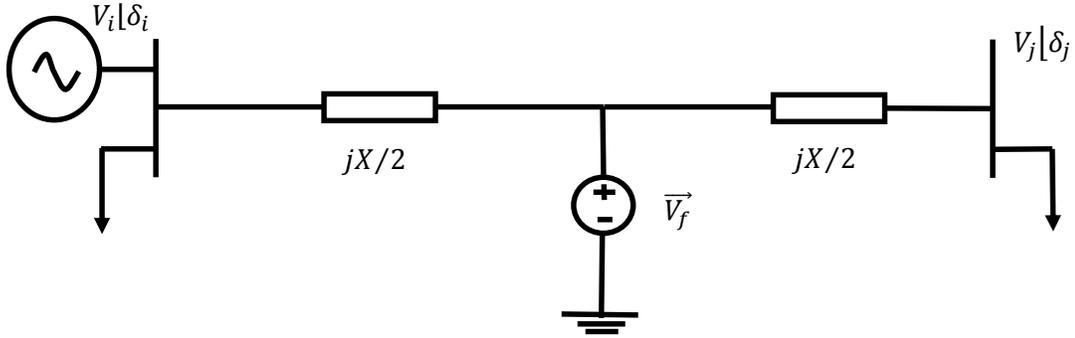


Figura 3.1. Compensador en paralelo ideal. [8].

Considerando que el compensador paralelo inyecta una corriente tal que las tensiones en los extremos y el punto medio de la línea son de la misma magnitud, es decir que $|V_i| = |V_j| = |V_f| = V$, la potencia activa y reactiva compensadas en el nodo i estarían dadas por la expresión (3.1), en dicha expresión se evidencia que la compensación en paralelo puede incrementar la transferencia de potencia en una línea de transmisión.

$$\begin{aligned} P_i^{COMP} &= \frac{2V^2}{X} \sin(\delta/2) \\ Q_i^{COMP} &= \frac{4V^2}{X} [1 - \cos(\delta/2)] \end{aligned} \quad (3.1)$$

Para incluir los dispositivos FACTS dentro de la formulación del problema, el modelamiento utilizado es el de inyección de potencia, ya que resulta ser el más adecuado para incluir dichos dispositivos en los cálculos de flujo de potencia [12].

En general el flujo de potencia en una línea de transmisión entre las barras i y j , a través de una línea de transmisión, depende de las tensiones nodales V_i , V_j y del desfase angular entre en el nodo de envío y el nodo de recibo $\delta_i - \delta_j$, de este modo se puede plantear el flujo de potencia reactiva y activa como se presenta en (3.2).

$$\begin{aligned} P_{ij} &= V_i^2 G_{ij} - V_i V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \\ Q_{ij} &= -V_i^2 (B_{ij} + B_{sh}) - V_i V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \end{aligned} \quad (3.2)$$

De manera similar el flujo desde la barra j hacia la barra i se formula de acuerdo a la expresión (3.3).

$$\begin{aligned} P_{ji} &= V_i^2 G_{ij} - V_i V_j [G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)] \\ Q_{ji} &= -V_i^2 (B_{ij} + B_{sh}) + V_i V_j [G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)] \end{aligned} \quad (3.3)$$

3.5.1 Modelo del SVC

Según [13], como el SVC puede ser utilizado como compensador capacitivo o inductivo, este dispositivo se puede modelar como una inyección de potencia reactiva ideal en la barra i tal como se muestra en la expresión (3.4). La arquitectura básica de un dispositivo SVC es mostrada en la figura 3.2.

$$\Delta Q_i = Q_{SVC} \quad (3.4)$$

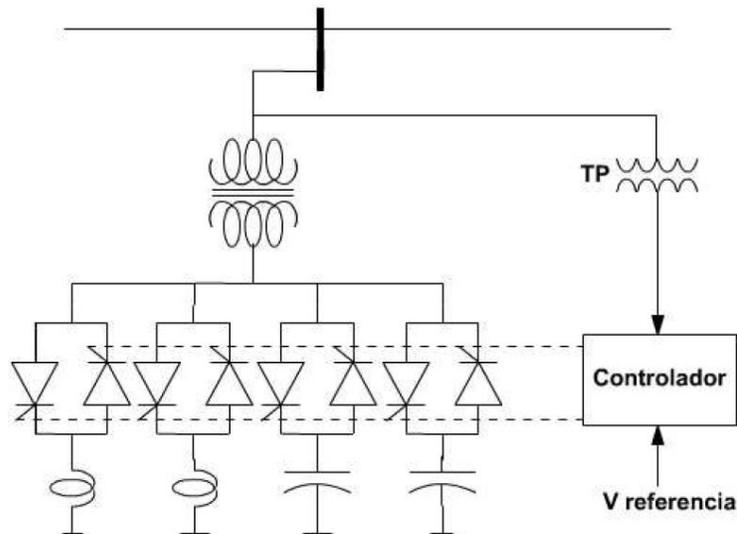


Figura 3.2. Arquitectura básica de un dispositivo SVC [8].

En la formulación propuesta, el dispositivo SVC es incluido en la función objetivo como lo muestra la expresión (3.5), esta formulación es una versión modificada de la referencia [14], en dicho trabajo los autores desprecian las pérdidas debidas a la componente resistiva. De esta forma se plantea el problema de optimización, al cual se le dará solución por medio del HSA.

$$\min f(Q_{SVC}) = \sum Perd(V, \theta) + \sum_{i=1}^{n_{scv}} 0.003Q_{SVC_i}^2 - 0.3015Q_{SVC_i} + 127.38 \quad (3.5)$$

sa

1. *Leyes de Kirchoff (flujo de carga)*
2. *Restricciones de voltaje*
3. *Restricciones de generación*

3.5.2 Modelo del STATCOM

La arquitectura básica de un dispositivo STATCOM es mostrada en la figura 3.3. De acuerdo a [15], el tratamiento que se le da a este dispositivo dentro de la formulación es igual al del SVC, es decir, como una inyección de

potencia reactiva en la barra i , por tanto la función objetivo del problema es similar a la presentada anteriormente.

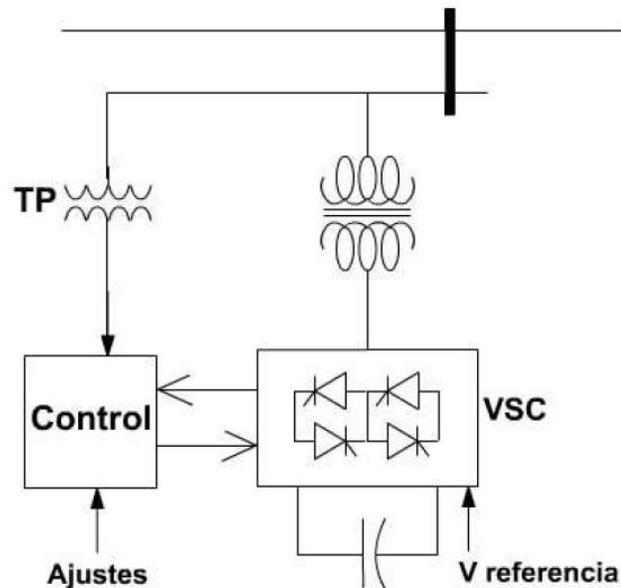


Figura 3.3. Arquitectura básica de un dispositivo STATCOM [8].

3.6 Conclusiones

En este capítulo se expusieron los diferentes dispositivos disponibles para ser ubicados en un sistema de potencia, encontrando que dentro del grupo de compensadores FACTS en paralelo el de mejor versatilidad de control y mayores prestaciones es el dispositivo STATCOM, seguido por el SVC, por esta razón estos dispositivos fueron los elegidos para ser tenidos en cuenta dentro de la formulación del problema a tratar.

Aunque uno de los dispositivos desarrollados en los últimos años es el UPFC, el cual tiene un alto desempeño para tratar con diferentes problemáticas que se presentan en los sistemas de potencia, es también un dispositivo que presenta dificultades a la hora de modelar e incluir dentro de un software de simulación.

Además se planteó una formulación matemática adecuada desde el punto de vista computacional, para luego ser tomada por la técnica metaheurística propuesta para tratar el problema de investigación.

4 PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1 Introducción

Para evaluar la efectividad del HSA para la ubicación de dispositivos FACTS en sistemas de potencia, se utilizaron sistemas de prueba de la IEEE como el 4, 9, 14, 30, 57 y 118 barras [16]. Se evaluaron aspectos como el tiempo de simulación, el costo de la ubicación de los dispositivos, las pérdidas en el sistema y si se presentaba violaciones de tensión observando la magnitud de la tensión en todas las barras del sistema.

4.2 Sistemas de prueba

Para las simulaciones en todos los sistemas de prueba, se utilizaron valores altos para el número de improvisaciones (*NI*), y valores bajos para el tamaño de la memoria de armonía (*HMS*), ya que el HSA tiene un mejor comportamiento con esta configuración de parámetros. Cuando el sistema presenta un número considerable de barras se toma los límites entre -0.5 y 0.5. En las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 se presentan los diagramas unifilares de los sistemas de prueba utilizados.

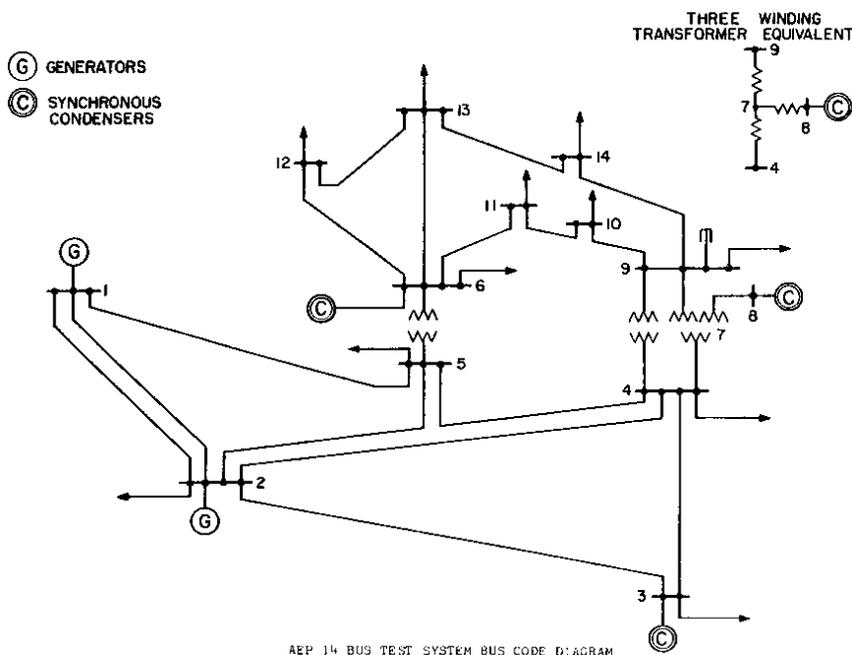


Figura 4.1. Diagrama unifilar del sistema de 14 barras [16].

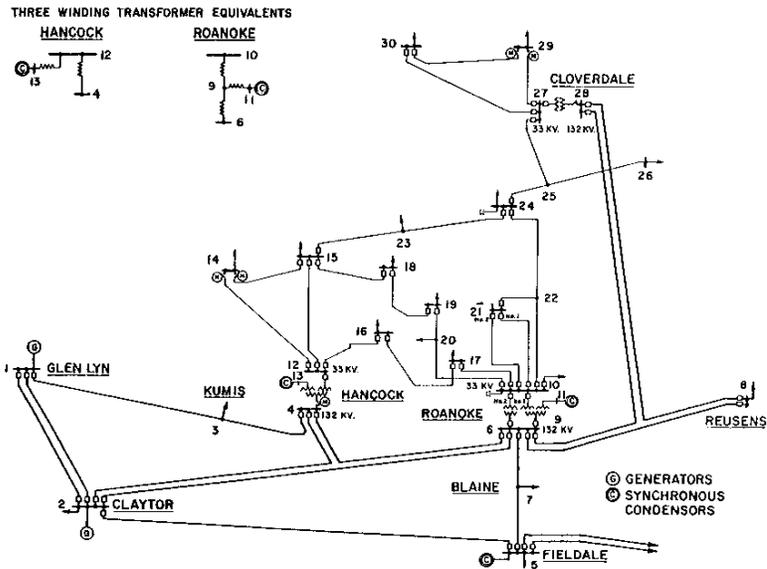


Figura 4.2. Diagrama unifilar del sistema de 30 barras [16].

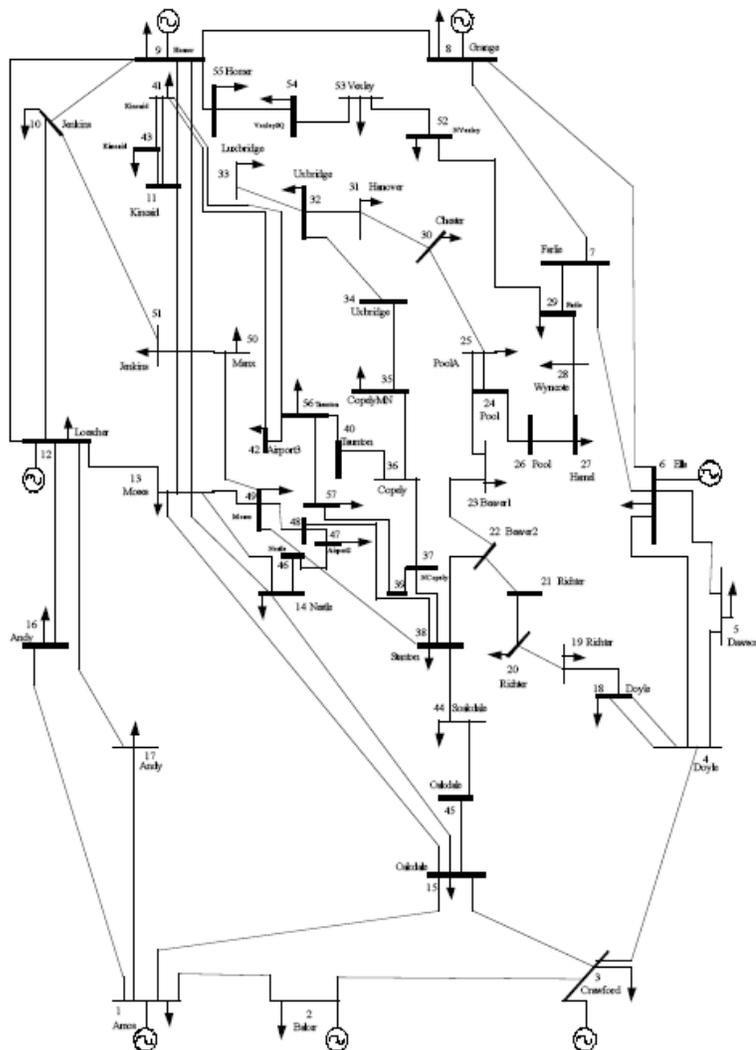


Figura 4.3. Diagrama unifilar del sistema de 57 barras [16].

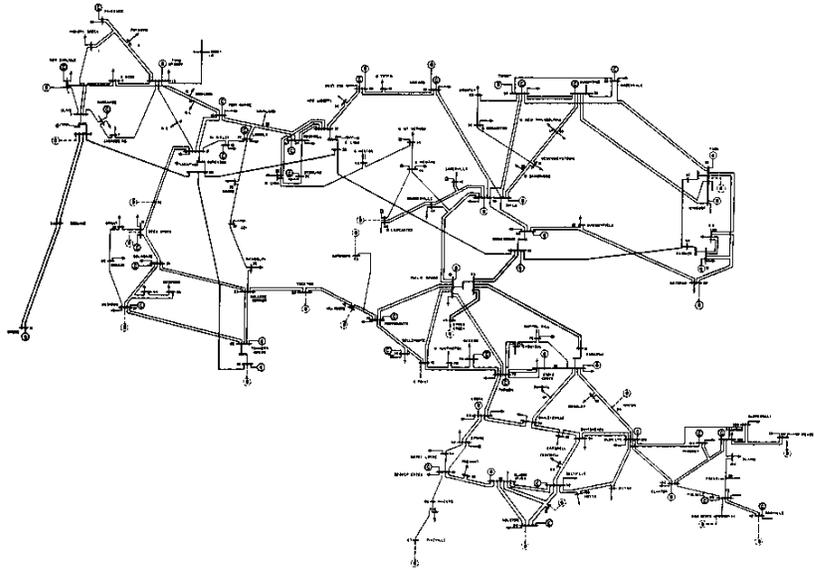


Figura 4.4. Diagrama unifilar del sistema de 118 barras [16].

4.3 Resultados

4.3.1 Pruebas realizadas en el sistema de 4 barras

Los resultados obtenidos para este sistema, muestran que no es necesario realizar alguna compensación reactiva de algún tipo, es decir no se ubican dispositivos FACTS dentro del sistema, además el HSA tomó un tiempo de 35.06 segundos para entregar una respuesta. En la figura 4.5 se puede observar los parámetros utilizados para este sistema de prueba. La evolución del método, compensación en las barras y la magnitud de tensión en las barras se pueden observar en las figuras 4.6, 4.7 y 4.8 respectivamente.

Figura 4.5. Interfaz de la herramienta HSA para el sistema de 4 barras.

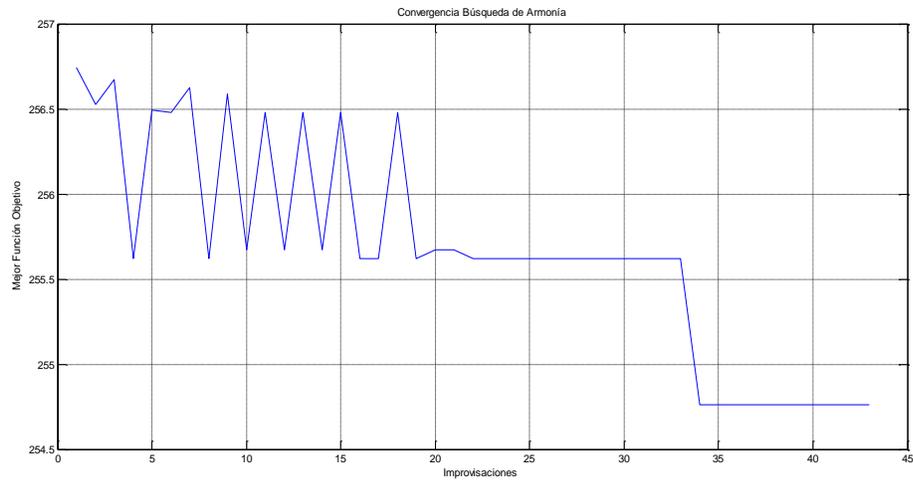


Figura 4.6. Evolución del HSA para el sistema de 4 barras.

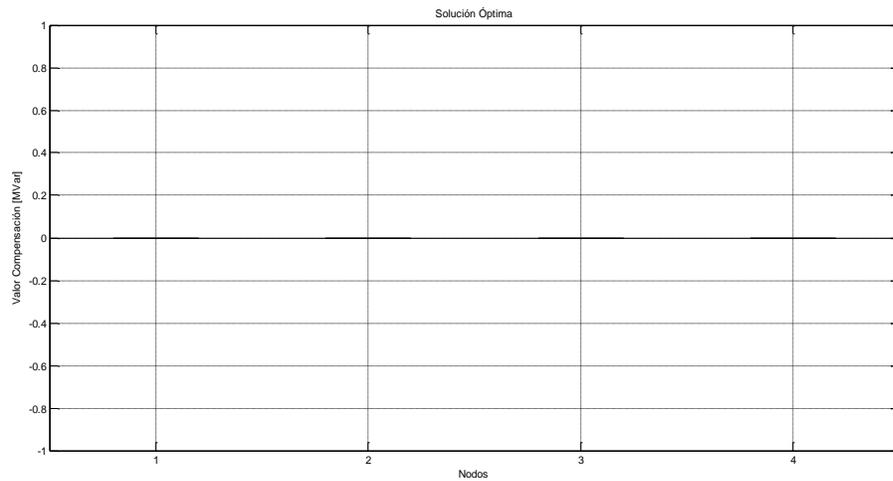


Figura 4.7. Compensación reactiva para el sistema de 4 barras.

De la figura 4.7 se puede notar que este sistema no necesita de compensación en ninguna de las barras.

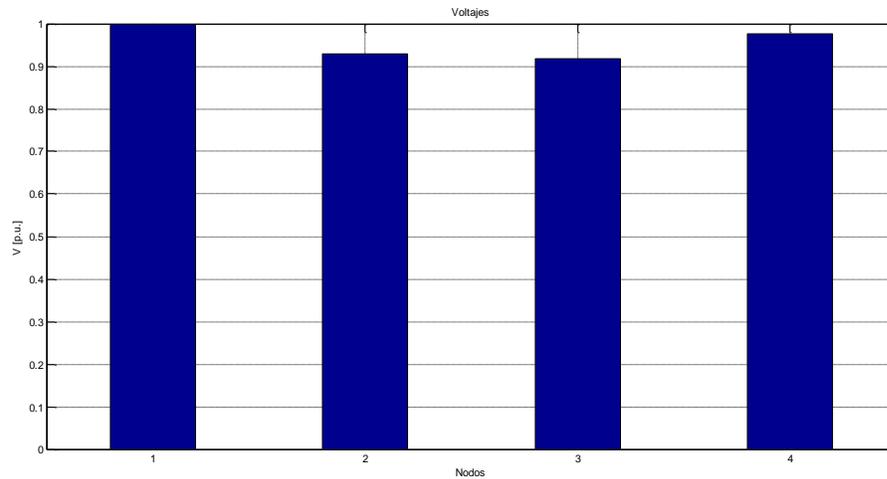


Figura 4.8. Magnitud de las tensiones nodales en el sistema de 4 barras.

4.3.2 Pruebas realizadas en el sistema de 9 barras

Para este sistema la herramienta HSA empleó 120.18 segundos para encontrar una solución óptima tal como lo muestra la figura 4.9, además se ajustaron los parámetros número de improvisaciones y tamaño de la memoria de armonía de acuerdo a lo mencionado anteriormente (valor alto para las improvisaciones y bajo para la memoria), el valor del parámetro PAR_{max} se ajustó a un valor de 0.75, que es adecuado para sistemas de este tamaño.



Figura 4.9. Interfaz de la herramienta HSA para el sistema de 9 barras.

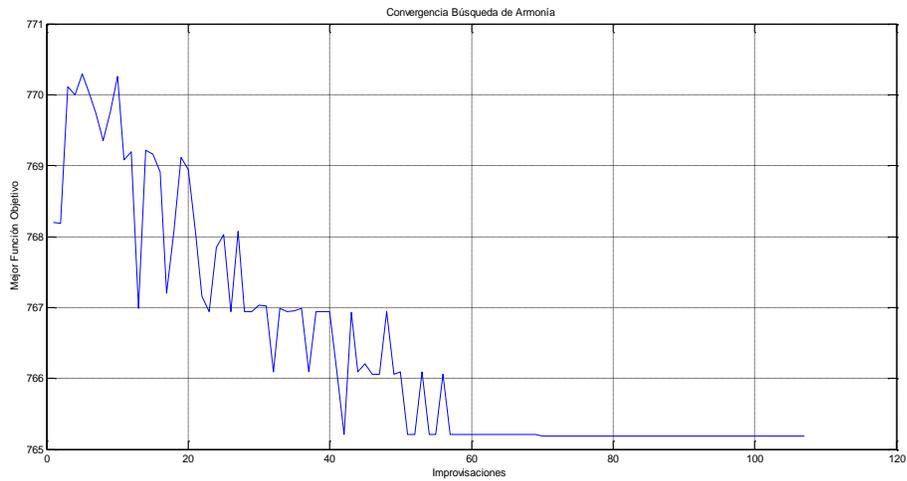


Figura 4.10. Evolución del HSA para el sistema de 9 barras.

De la figura 4.10 se puede notar que la solución óptima se alcanza con un número inferior a 200 improvisaciones, pero esto es gracias al buen ajuste que se tiene de los demás parámetros del HSA, como el *HMCR*, etc.

Además se encuentra que solo se debe hacer compensación inductiva en la barra 9 del sistema, obteniendo una mejora en las magnitudes de tensión en las barras del sistema, este comportamiento se puede observar en las figuras 4.11 y 4.12.

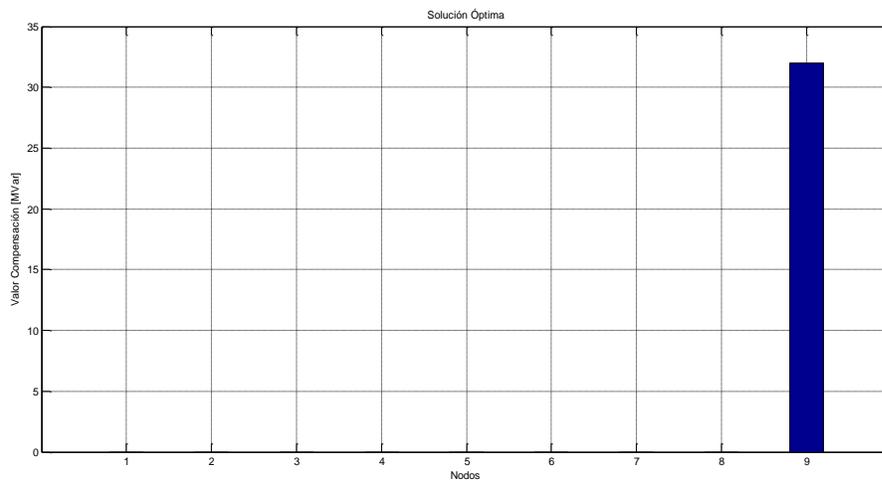


Figura 4.11. Compensación reactiva para el sistema de 9 barras.

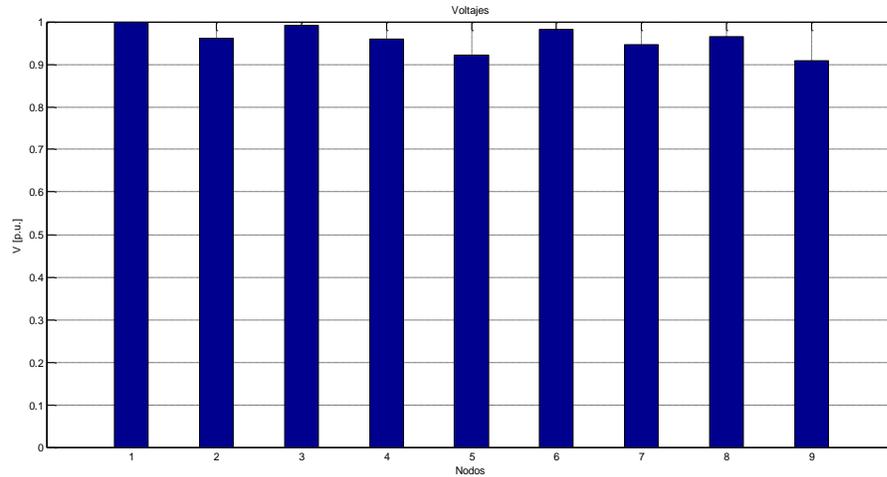


Figura 4.12. Magnitud de las tensiones nodales en el sistema de 9 barras.

4.3.3 Pruebas realizadas en el sistema de 30 barras

En este caso el HSA tomó 11584.18 segundos para entregar una respuesta, el parámetro *HMS* se ajustó igual que el caso anterior y el número de improvisaciones de 2500, tal como se observa en la figura 4.13. En la figura 4.14 se observa la evolución del HSA donde se nota que después de 1000 improvisaciones, no se mejora la respuesta.

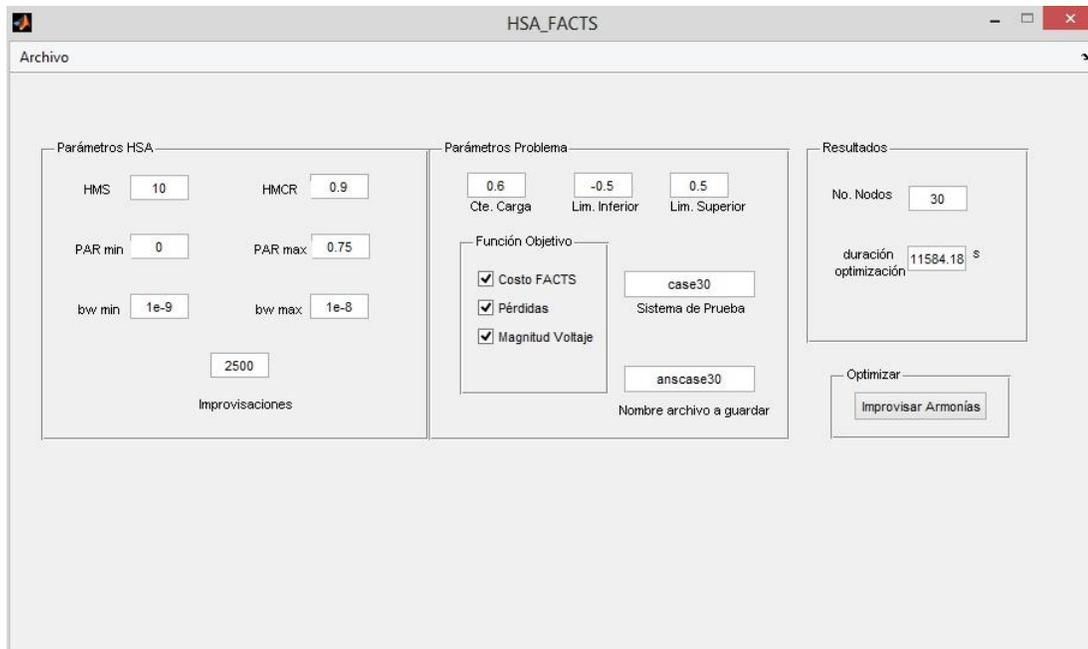


Figura 4.13. Interfaz de la herramienta HSA para el sistema de 30 barras.

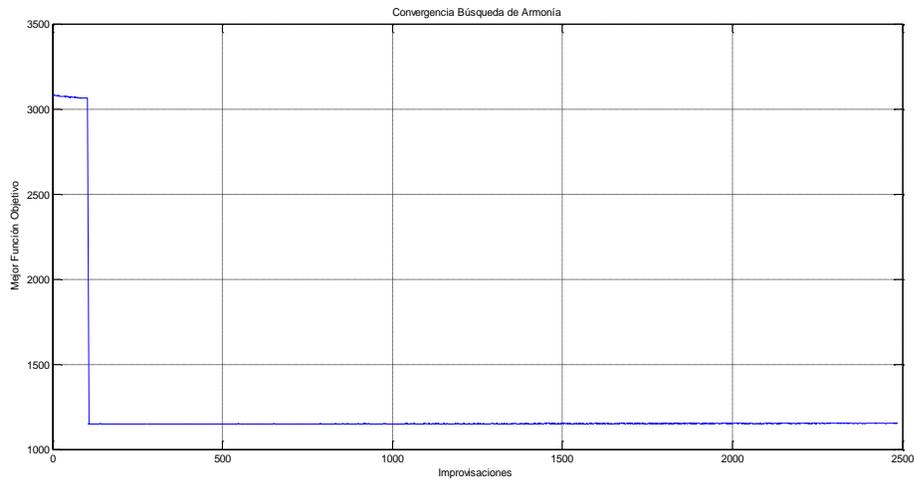


Figura 4.14. Evolución del HSA para el sistema de 30 barras.

En la figura 4.15 y 4.16 se puede observar la compensación reactiva y las magnitudes de tensión en las barras, notándose que en las barras 29 y 30 se tiene un problema de sobretensión.

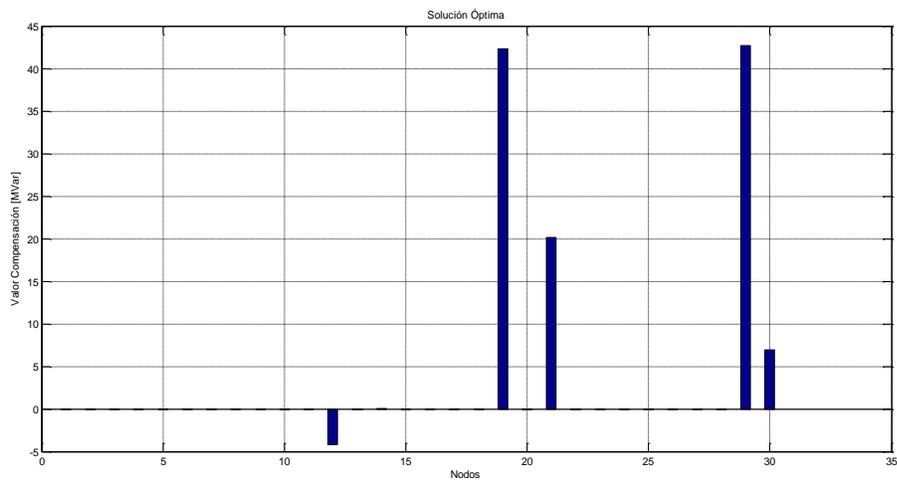


Figura 4.15. Compensación reactiva para el sistema de 30 barras.

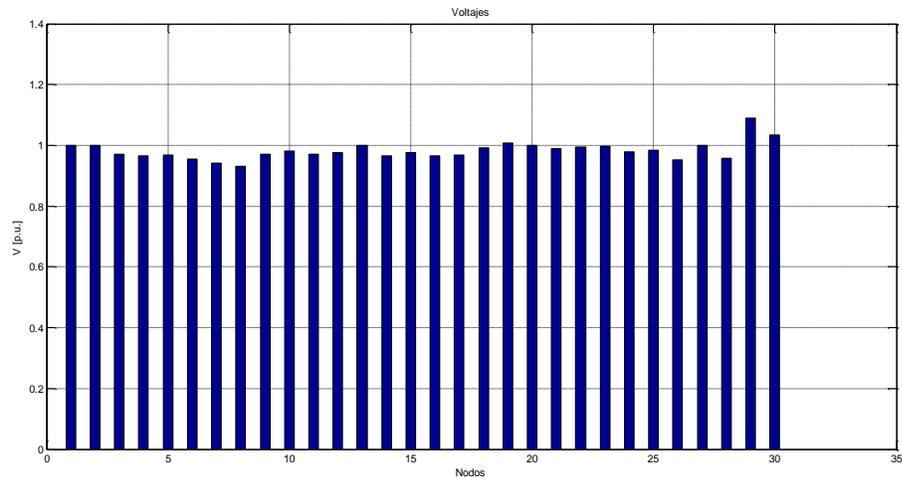


Figura 4.16. Magnitud de las tensiones nodales en el sistema de 30 barras.

4.3.4 Pruebas realizadas en el sistema de 57 barras

En este caso, el HSA empleó 111.28 segundos para entregar una solución con 1000 improvisaciones y una HMS de 15, el parámetro PAR_{max} fue seleccionado con un valor de 0.5, ya que se evidenció que con sistemas de más de 14 barras la convergencia del HSA se hace más lenta, inclusive con un número alto de improvisaciones, además de no alcanzar una solución óptima, en la figura 4.17 se muestra la interfaz de la herramienta.

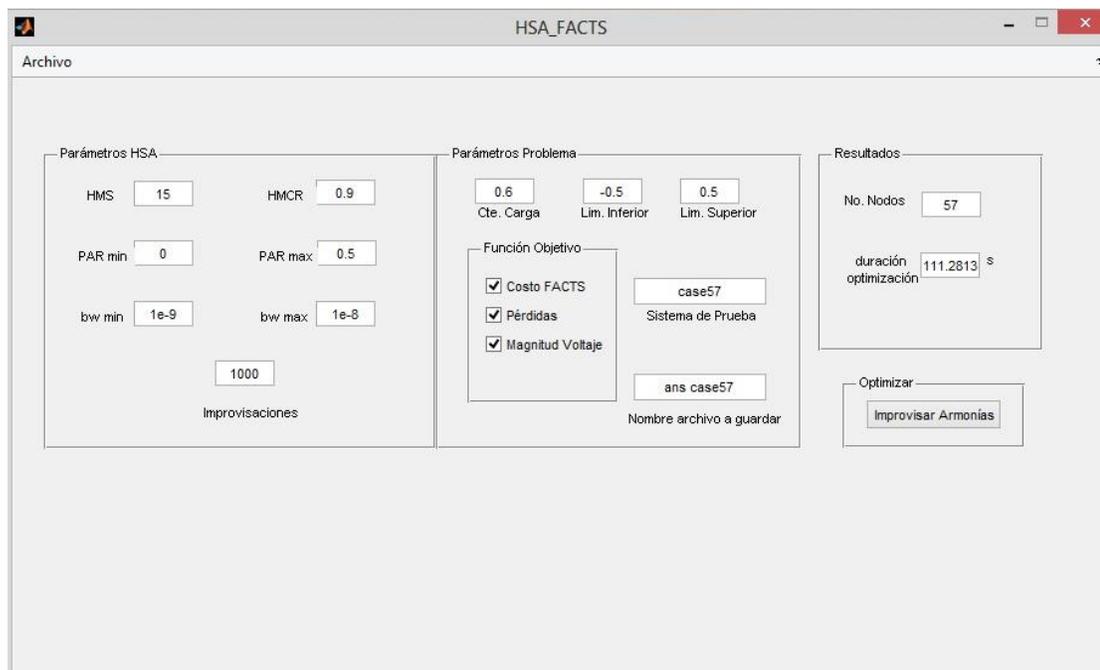


Figura 4.17. Interfaz de la herramienta HSA para el sistema de 57 barras.

Inicialmente el sistema de 57 barras presenta un total de seis barras con violaciones de tensión sin compensación reactiva. Cinco de estas barras presentan una tensión menor a 0,95 pu (25, 30, 31, 32, 33), y solo una barra tiene una tensión mayor a 1,05 pu (barra 46).

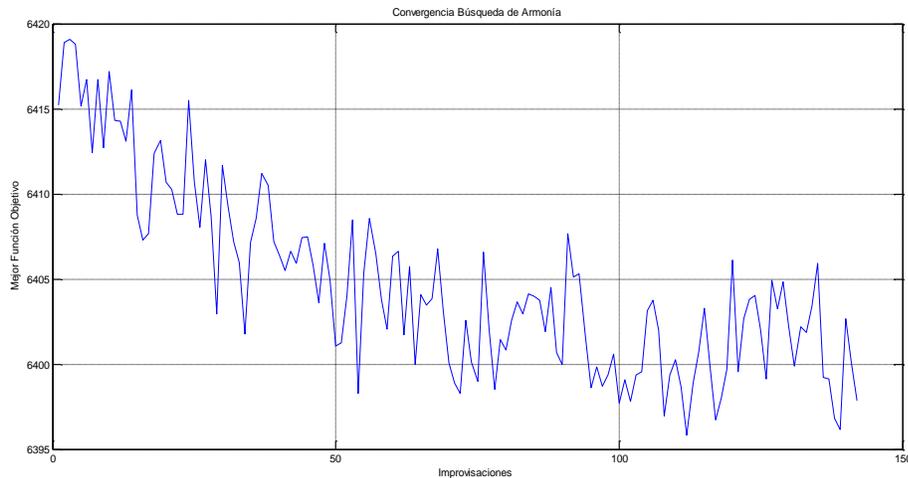


Figura 4.18. Evolución del HSA para el sistema de 57 barras.

La respuesta entregada por el HSA, muestra que se debe ubicar dispositivos FACTS en diferentes nodos del sistema, tal como se muestra en la figura 4.19, allí se puede observar que se realiza una compensación de reactivos en múltiples barras el sistema, por ejemplo en la barra 29 y 43 se realiza una compensación capacitiva de 20 y 43 MVAR respectivamente y en la barra 36 una compensación capacitiva de 25 MVAR, esta respuesta es una alternativa de solución diferente a la reportada en [10], en donde los autores mencionan que la solución obtenida por su propuesta, para este sistema consta de una compensación inductiva en la barra 46 y capacitiva en la barra 31. En la figura 4.18 y 4.20 se puede observar la evolución del HSA y la magnitud de las tensiones en el sistema respectivamente.

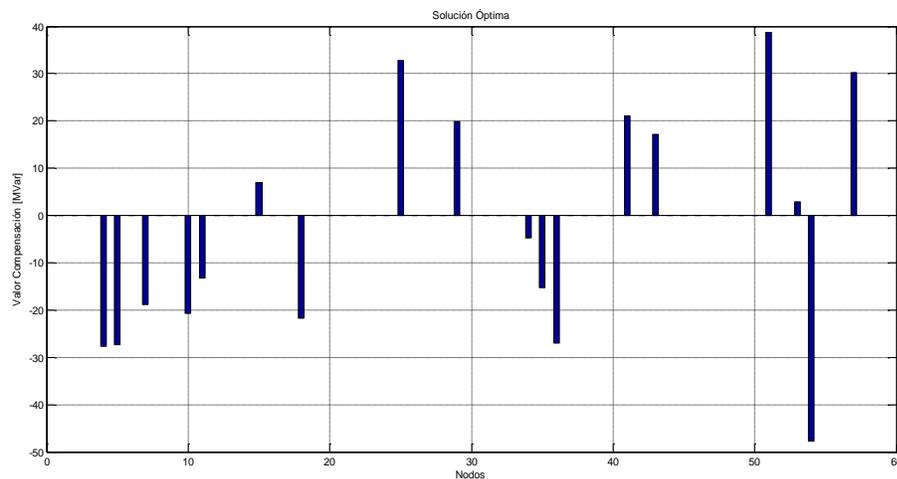


Figura 4.19. Compensación reactiva para el sistema de 57 barras.

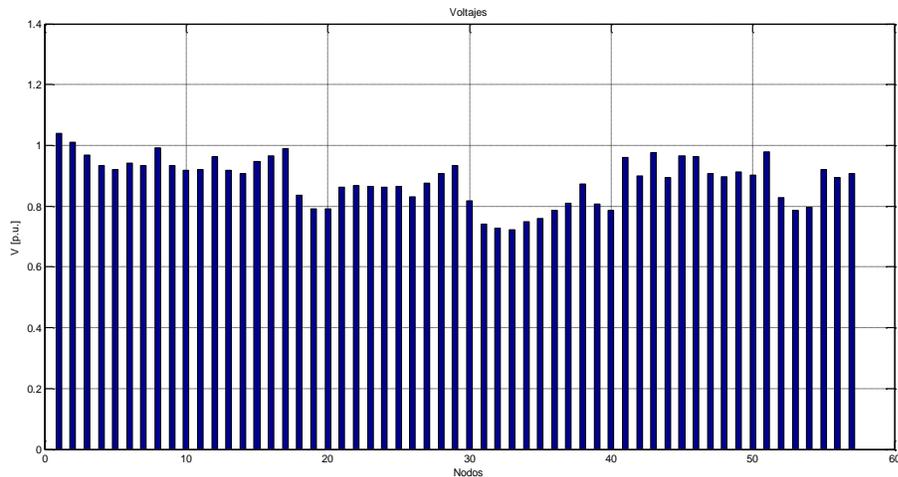


Figura 4.20. Magnitud de las tensiones nodales en el sistema de 57 barras.

4.3.5 Pruebas realizadas en el sistema de 118 barras

Para este sistema de pruebas de nuevo el parámetro PAR_{max} se seleccionó con un valor de 0.5, y para la HMS con valor de 15. El HSA empleó 5752.95 segundos para entregar una solución, en la figura 4.21 se muestra la interfaz de la herramienta.



Figura 4.21. Interfaz de la herramienta HSA para el sistema de 118 barras.

En la figura 4.22 se puede ver como evoluciona el HSA, en este caso se encontró que se encontraba una respuesta óptima en un menor número de improvisaciones, por debajo de 150 improvisaciones, por esta razón se ajustó este parámetro en un valor de 500. En las figuras 4.23 y 4.24 se

muestran la compensación reactiva y las magnitudes de las tensiones en el sistema, pudiéndose observar que persiste el problema operativo de tensión en algunas barras, ya que se encuentran por debajo de 0.95 pu. Siendo las más críticas las barras 10, 88 y 89.

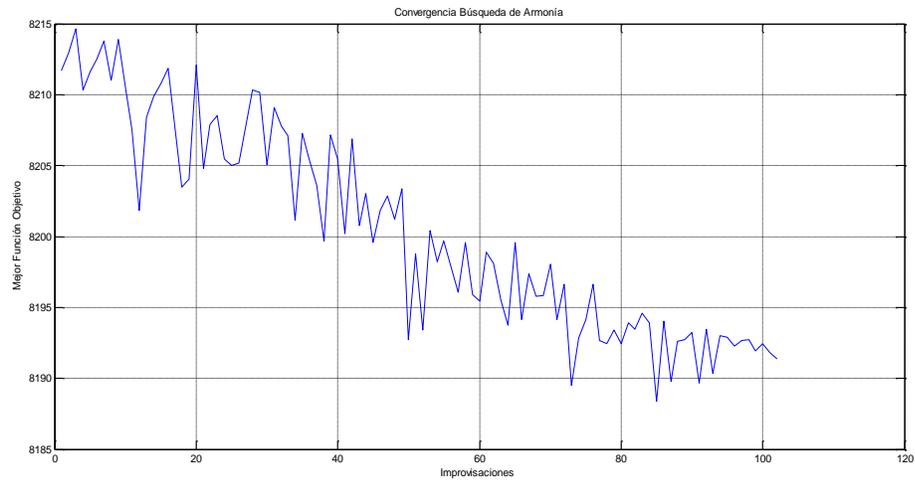


Figura 4.22. Evolución del HSA para el sistema de 118 barras.

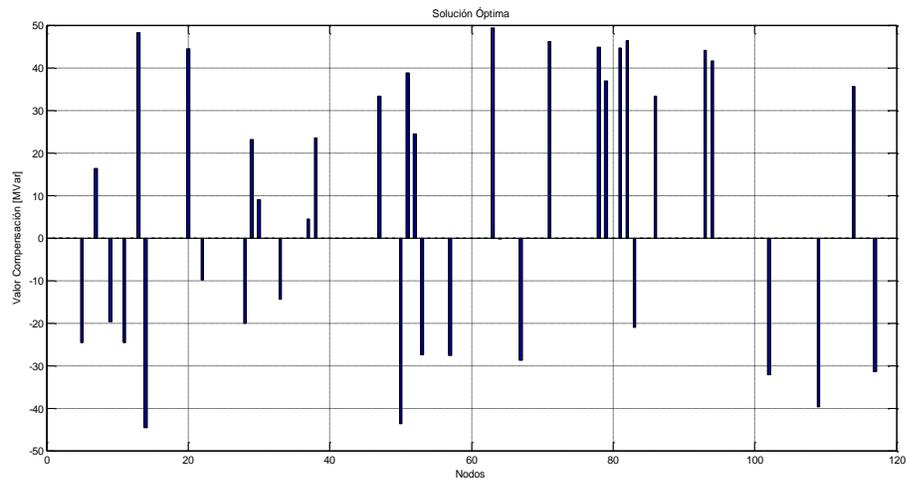


Figura 4.23. Compensación reactiva para el sistema de 118 barras.

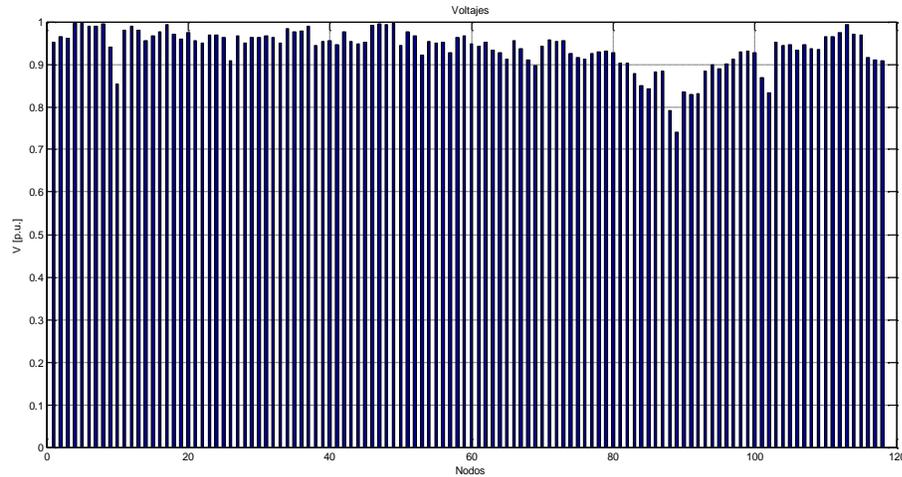


Figura 4.24. Magnitud de las tensiones nodales en el sistema de 118 barras.

4.4 Conclusiones

De los resultados presentados anteriormente, se debe mencionar que los parámetros mostrados para cada sistema de prueba, fueron obtenidos luego de haber realizado un gran número de simulaciones con diferentes configuraciones de parámetros, obteniendo un mejor desempeño para el HSA con los presentados para cada sistema de pruebas.

También se puede inferir que tanto la transferencia de potencia como la estabilidad del sistema, pueden ser mejorados si se ubica de forma óptima los dispositivos FACTS.

Además, se aconseja que de los dos dispositivos FACTS empleados en las simulaciones (SVC y STATCOM), se utilice en aplicaciones reales en mayor grado el STATCOM, ya que mejora el desempeño del SEP en situaciones donde las magnitudes de la tensión se encuentren muy por debajo del límite permitido, asimismo la respuesta en tiempo de este dispositivo es más rápida que la del SVC. Claro está que desde el punto de vista económico los SVC tienen mayores ventajas.

5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones generales

En este trabajo se ha presentado una aplicación del Algoritmo de Búsqueda de la Armonía (HSA) para ubicar de forma óptima dispositivos FACTS en un sistema de potencia, dos tipos de dispositivos fueron seleccionados y modelados para ser incluidos en las simulaciones.

Se utilizaron los circuitos de prueba que se encuentran en la base de datos de la Universidad de Washington en la referencia bibliográfica [15], para evaluar la efectividad de la técnica propuesta, los resultados obtenidos de las simulaciones presentadas en el capítulo 4 indican que se puede lograr un balance entre seguridad e inversión económica.

Se muestra que la aplicación de una herramienta computacional novedosa, puede presentar mejoras para algunos problemas específicos como el presentado en este trabajo de grado, esto se debe principalmente a que cada problema en los sistemas eléctricos requiere de cantidad y tipos de variables que deben ser solucionados de diferente forma.

Se observa que una de las mayores ventajas del Algoritmo de Búsqueda de la Armonía es la generación de vectores aleatorios que simulan una armonía musical en procura de encontrar la armonía perfecta. Esto le permite al algoritmo pasar fácilmente de óptimos locales a globales, o al menos no quedarse atrapado en óptimos locales que pueden presentar resultados poco atractivos.

5.2 Recomendaciones

Aunque el Algoritmo de Búsqueda de la Armonía presenta resultados satisfactorios, se recomienda ensayar alguna combinación de este algoritmo con otras técnicas que puedan mejorar los resultados de la optimización o simplemente potenciar algunos aspectos propios de esta técnica, como el alto grado de almacenamiento de resultados temporales en la memoria del equipo de cómputo.

Pese a que la aplicación de este algoritmo en Matlab[®] no presentó muchas complicaciones, una de los mayores beneficios para lograr que dicho algoritmo funcionara de manera apropiada fue la integración con la herramienta Matpower4.1[®] para correr el inmenso número de flujos de carga requeridos para presentar los resultados que aquí se muestran. Sin embargo, es posible implementar esta integración en otros softwares de programación de menor nivel, de modo que se puedan ejecutar muchas simulaciones en menor tiempo.

5.3 Trabajo futuro

Sería adecuado implementar este trabajo de grado, incluyendo el efecto que pueda tener en la solución una restricción económica de inversión máxima permitida.

También se plantea la opción de incluir aspectos técnicos, entre otros como el incremento de circuitos en tramos de línea, la repotenciación de subestaciones o la inclusión de nuevos elementos en el sistema.

Finalmente, se puede observar el efecto de realizar compensación en el sistema mediante dispositivos FACTS en otros sistemas eléctricos de prueba y diferenciando más claramente el comportamiento entre los SVC Y los STATCOM.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, The EPRI power system engineering series: McGraw Hill, 1994.
- [2] N. Hingorani y L. Gyugy, *UNDERSTANDING FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Power Engineering Society: IEEE Press, 2000.
- [3] H. Sarvari y K. Zamanifar, «A Self Adaptive Harmony Search Algorithm for Engineering and Reliability,» de *Second International Conference on Computational Intelligence*, 2010.
- [4] R. Gallego, A. Escobar y R. Romero, *Técnicas Metaheurísticas de Optimización*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2010.
- [5] A. Parizad, A. Khazali y M. Kalantar, «Application of HSA and GA in Optimal Placement of FACTS Devices Considering Voltage Stability and Losses,» de *International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems, EPECS '09*, 2009.
- [6] M. Mahdavi, M. Fesanghary y E. Damangir, «An improved harmony search algorithm for solving optimization problems,» 2007.
- [7] I. Oumarou, D. Jiang y C. Yijia, «Optimal Placement of Paralelo Connected FACTS Device in a Series Compensated long Transmission Line,» 2009.
- [8] J. Rivera, *Modelamiento y simulación de dispositivos FACTS para estudios eléctricos de estado estable*, Medellín: Tesis de maestría. Universidad de Antioquia, 2008.
- [9] S. Gerbex, R. Cherkaoui y A. Germond, «Optimal Location of Multi-Type FACTS Devices in a Power System by Means of Genetic Algorithms,» 2001.
- [10] J. Vivas, G. Figueira y G. Solari, «Localización Óptima de Dispositivos FACTS en Sistemas de Transmisión Usando Algoritmos Genéticos,» de *Congreso Venezolano de redes de Energía Eléctrica*, 2007.
- [11] D. Lee, E. Lee, J. Lee y J. Kim, «Simulation of Static Synchronous Compensator (STATCOM),» de *IEEE Conference Publications. Electrical Machines and System*, 2005.

- [12] E. El-Araby, N. Yorino y H. Sasaki, «A Comprehensive Approach for FACTS Devices Optimal Allocation to mitigate Voltage Collapse,» 2002.
- [13] D. Jovcic, N. Pahalawaththa, M. Zavahir y H. Hassan, «SVC Dynamic Analytical Model,» 2003.
- [14] H. Baghaee, M. Jannati, B. Vahidi y S. Hosseinian, «Improvement of Voltage Stability and Reduce Power System Losses by Optimal GA-based Allocation of Multi-type FACTS Devices,» de *IEEE Conference Publications. Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, 2008.
- [15] C. Cañizares, M. Pozzi, S. Corsi y E. Uzunovic, «STATCOM Modeling for Voltage and Angle Stability Studies,» 2003.
- [16] University of Washington, «Power System Test Case Archive,» [En línea]. Available: <https://www.ee.washington.edu/research/pstca>.

7 ANEXOS

7.1 Manual de usuario de la herramienta HSA_FACTS

7.1.1 Introducción

HSA_FACTS es una aplicación desarrollada en Matlab®, para realizar ubicación óptima de dispositivos FACTS en conexión paralelo. El algoritmo de optimización utilizado es conocido como Algoritmo de Búsqueda de Armonía (HSA).

Dicho algoritmo está basado en la improvisación musical. En la figura 7.1 se muestra la interfaz gráfica de usuario de la aplicación.

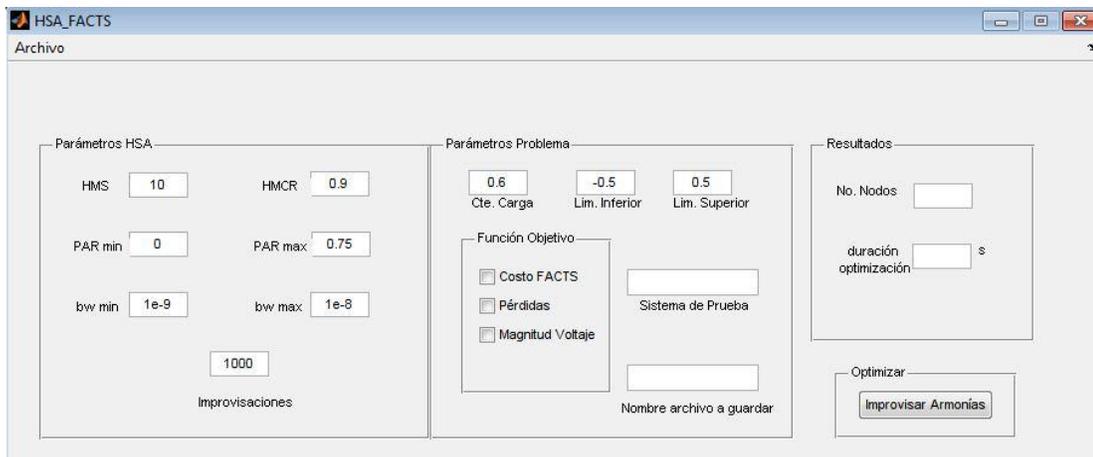


Figura 7.1. Interfaz gráfica de la aplicación HSA_FACTS.

En el panel “Parámetros HSA” se encuentran los siguientes campos:

- HMS (Harmony Memory Size). Representa la cantidad de tonos que cada intérprete (variable de decisión) puede tocar. El tamaño de la memoria de armonía es $[HMS] \times [\# \text{ de intérpretes}]$. Valor por defecto 10.
- HMCR (Harmony Memory Considering Rate). Indica la probabilidad de escoger una armonía (una fila determinada) existente en la memoria de armonía. El complemento de dicho valor, es decir, $1 - HMCR$, es la probabilidad de generar aleatoriamente una nueva armonía. Valor por defecto 0.9 (90%).
- $PAR_{min.}$ y $PAR_{max.}$. Representan los valores mínimo y máximo del parámetro PAR (Pitch Adjustment Rate). Indica la probabilidad de modificar una armonía existente. Para obtener mejores resultados, se desea que el PAR tome valores pequeños en las primeras improvisaciones y que adquiera valores grandes en las últimas. Lo

anterior quiere decir que PAR en la primera improvisación tenga el valor PAR_{min} y que aumente progresivamente hasta PAR_{max}. Valores por defecto 0 y 0.75.

- bw_{min} . y bw_{max} . Representan el rango de valores que puede tomar el parámetro bw (band width). Indica que tanto se va a modificar una armonía. Ejemplo:

$$x^{nuevo} = x^{viejo} \pm r * bw \quad (7.1)$$

Donde r es un número aleatorio uniformemente distribuido. Para obtener mejores resultados, se busca que bw asuma el valor bw_{max} en la primera improvisación y descienda gradualmente a bw_{min} .

- Improvisaciones. Indica el número máximo de iteraciones que ejecutará el HSA. Valor por defecto 1000.

En el panel “Parámetros problema”, se encuentran los siguientes campos:

- Cte. carga. Es el valor que representa que el aumento de la carga del sistema, a partir de su valor nominal. El incremento de la carga se hace de la siguiente forma:

$$P = P^{nominal}(1 + Cte. carga) \quad (7.2)$$

De igual forma para la potencia reactiva. Valor por defecto 0.6.

- Lim. Inferior. Valor mínimo del rango de potencia reactiva de compensación. Valor por defecto -0.5.
- Lim. Superior. Valor máximo del rango de potencia reactiva de compensación. Valor por defecto 0.5.
- Sistema de prueba. En éste Edit. box, se carga el nombre del archivo donde se encuentran los datos del sistema de potencia que se desea analizar.
- Nombre archivo a guardar. Se introduce un nombre cualquiera que será adoptado por un archivo XLS donde se guardarán los resultados de la optimización.
- Función objetivo. Se compone de tres check box donde se adicionan términos a la función objetivo. Se debe escoger por lo menos uno.

En el panel “Resultados”, se cargan el número de nodos del sistema y la duración en segundos de la optimización.

7.1.2 Como utilizarlo

Para cargar un sistema de prueba basta con ir al menú “Archivo” (figura 7.2) y dar clic en el submenú “Abrir”. Allí se abre una ventana donde aparecen varios sistemas de prueba tomados de Matpower4.1[©]. Dicha ventana también puede ser cargada ejecutando el comando Ctrl+A.

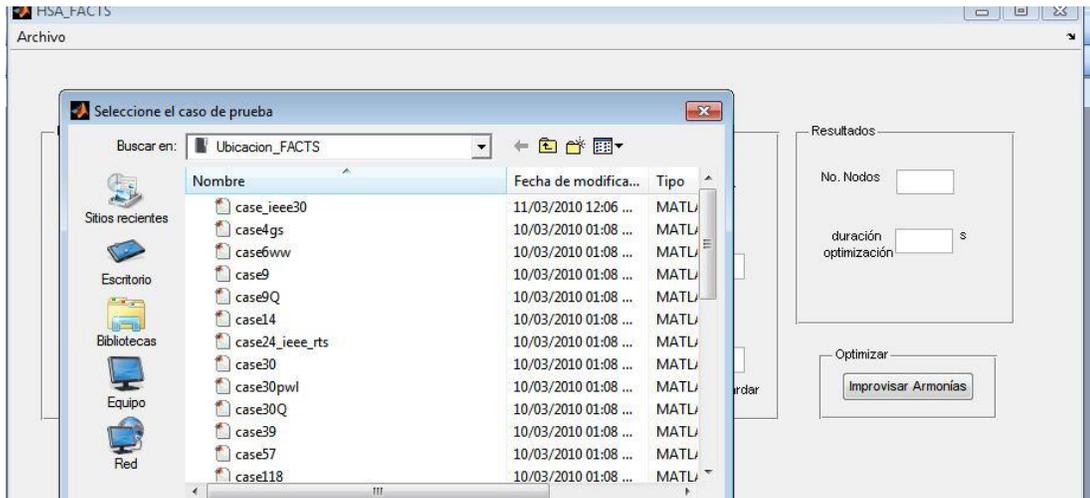


Figura 7.2. Cargando sistema de prueba.

Hay que tener en cuenta que los archivos se cargan con la extensión *.m, es necesario borrarla, de lo contrario se producirá error.

Otra opción es introducir directamente el nombre del archivo en la caja de texto (figura 7.3.).

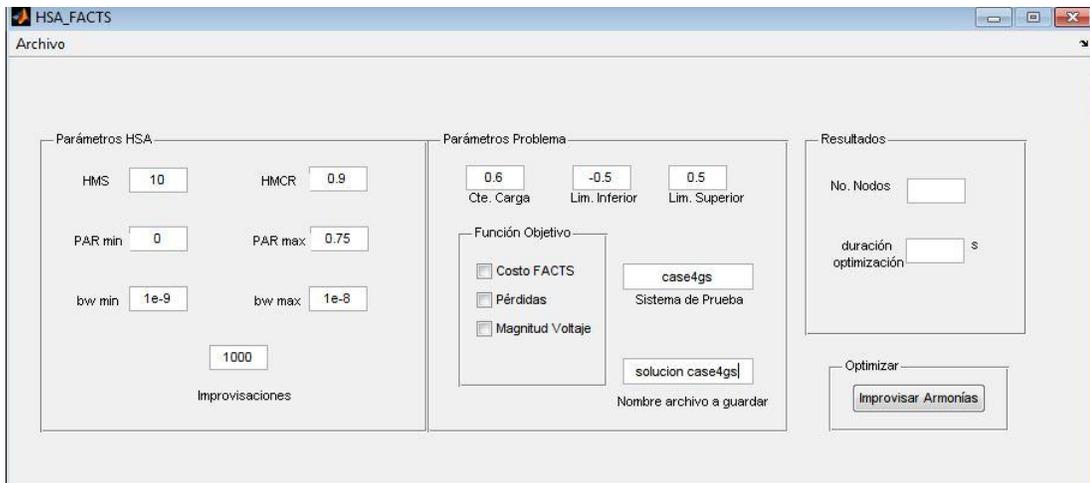


Figura 7.3. Cargando sistema de prueba directamente.

Luego de cargado el archivo se pulsa el botón “Improvisar Armonías” y listo.

```

08/19/93 UW ARCHIVE          100.0 1962 W IEEE 14 Bus Test Case
BUS DATA FOLLOWS              14 ITEMS
1 Bus 1   HV 1 1 3 1.060  0.0      0.0  232.4 -16.9  0.0  1.060  0.0  0.0  0.0  0.0  0
2 Bus 2   HV 1 1 2 1.045 -4.98    21.7  12.7  40.0  42.4  0.0  1.045  50.0 -40.0  0.0  0.0  0
3 Bus 3   HV 1 1 2 1.010 -12.72   94.2  19.0   0.0  23.4  0.0  1.010  40.0  0.0  0.0  0.0  0
4 Bus 4   HV 1 1 0 1.019 -10.33   47.8  -3.9   0.0   0.0  0.0  0.0   0.0  0.0  0.0  0.0  0
5 Bus 5   HV 1 1 0 1.020  -8.78    7.6   1.6   0.0   0.0  0.0  0.0   0.0  0.0  0.0  0.0  0
6 Bus 6   LV 1 1 2 1.070 -14.22   11.2   7.5   0.0  12.2  0.0  1.070  24.0  -6.0  0.0  0.0  0
7 Bus 7   ZV 1 1 0 1.062 -13.37    0.0   0.0   0.0   0.0  0.0  0.0   0.0  0.0  0.0  0.0  0
8 Bus 8   TV 1 1 2 1.090 -13.36    0.0   0.0   0.0  17.4  0.0  1.090  24.0  -6.0  0.0  0.0  0
9 Bus 9   LV 1 1 0 1.056 -14.94   29.5  16.6   0.0   0.0  0.0  0.0   0.0  0.0  0.0  0.19  0
10 Bus 10  LV 1 1 0 1.051 -15.10    9.0   5.8   0.0   0.0  0.0  0.0   0.0  0.0  0.0  0.0  0
11 Bus 11  LV 1 1 0 1.057 -14.79    3.5   1.8   0.0   0.0  0.0  0.0   0.0  0.0  0.0  0.0  0
12 Bus 12  LV 1 1 0 1.055 -15.07    6.1   1.6   0.0   0.0  0.0  0.0   0.0  0.0  0.0  0.0  0
13 Bus 13  LV 1 1 0 1.050 -15.16   13.5   5.8   0.0   0.0  0.0  0.0   0.0  0.0  0.0  0.0  0
14 Bus 14  LV 1 1 0 1.036 -16.04   14.9   5.0   0.0   0.0  0.0  0.0   0.0  0.0  0.0  0.0  0
-999
BRANCH DATA FOLLOWS          20 ITEMS
1  2 1 1 1 0 0.01938  0.05917  0.0528  0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
1  5 1 1 1 0 0.05403  0.22304  0.0492  0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
2  3 1 1 1 0 0.04699  0.19797  0.0438  0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
2  4 1 1 1 0 0.05811  0.17632  0.0340  0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
2  5 1 1 1 0 0.05695  0.17388  0.0346  0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
3  4 1 1 1 0 0.06701  0.17103  0.0128  0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
4  5 1 1 1 0 0.01335  0.04211  0.0      0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
4  7 1 1 1 0 0.0      0.20912  0.0      0  0  0  0  0  0.978  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
4  9 1 1 1 0 0.0      0.55618  0.0      0  0  0  0  0  0.969  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
5  6 1 1 1 0 0.0      0.25202  0.0      0  0  0  0  0  0.932  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
6  11 1 1 1 0 0.09498  0.19890  0.0      0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
6  12 1 1 1 0 0.12291  0.25581  0.0      0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
6  13 1 1 1 0 0.06615  0.13027  0.0      0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
7  8 1 1 1 0 0.0      0.17615  0.0      0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
7  9 1 1 1 0 0.0      0.11001  0.0      0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
9  10 1 1 1 0 0.03181  0.08450  0.0      0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
9  14 1 1 1 0 0.12711  0.27038  0.0      0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
10 11 1 1 1 0 0.08205  0.19207  0.0      0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
12 13 1 1 1 0 0.22092  0.19988  0.0      0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
13 14 1 1 1 0 0.17093  0.34802  0.0      0  0  0  0  0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0  0.0
-999
LOSS ZONES FOLLOWS           1 ITEMS
1 IEEE 14 BUS
-99
INTERCHANGE DATA FOLLOWS    1 ITEMS
1  2 Bus 2   HV  0.0  999.99  IEEE14  IEEE 14 Bus Test Case
-9
TIE LINES FOLLOWS           0 ITEMS
-999
END OF DATA

```

Figura 7.4. Datos del sistema de 14 Barras.

```

08/20/93 UW ARCHIVE          100.0 1961 W IEEE 30 Bus Test Case
BUS DATA FOLLOWS          30 ITEMS
1 Glen Lyn 132 1 1 3 1.060 0.0 0.0 0.0 260.2 -16.1 132.0 1.060 0.0 0.0 0.0 0.0 0
2 Claytor 132 1 1 2 1.043 -5.48 21.7 12.7 40.0 50.0 132.0 1.045 50.0 -40.0 0.0 0.0 0
3 Kumis 132 1 1 0 1.021 -7.96 2.4 1.2 0.0 0.0 132.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
4 Hancock 132 1 1 0 1.012 -9.62 7.6 1.6 0.0 0.0 132.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
5 Fieldale 132 1 1 2 1.010 -14.37 94.2 19.0 0.0 37.0 132.0 1.010 40.0 -40.0 0.0 0.0 0
6 Roanoke 132 1 1 0 1.010 -11.34 0.0 0.0 0.0 0.0 132.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
7 Blaine 132 1 1 0 1.002 -13.12 22.8 10.9 0.0 0.0 132.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
8 Reusens 132 1 1 2 1.010 -12.10 30.0 30.0 0.0 37.3 132.0 1.010 40.0 -10.0 0.0 0.0 0
9 Roanoke 1.0 1 1 0 1.051 -14.38 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
10 Roanoke 33 1 1 0 1.045 -15.97 5.8 2.0 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.19 0
11 Roanoke 11 1 1 2 1.082 -14.39 0.0 0.0 0.0 16.2 11.0 1.082 24.0 -6.0 0.0 0.0 0
12 Hancock 33 1 1 0 1.057 -15.24 11.2 7.5 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
13 Hancock 11 1 1 2 1.071 -15.24 0.0 0.0 0.0 10.6 11.0 1.071 24.0 -6.0 0.0 0.0 0
14 Bus 14 33 1 1 0 1.042 -16.13 6.2 1.6 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
15 Bus 15 33 1 1 0 1.038 -16.22 8.2 2.5 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
16 Bus 16 33 1 1 0 1.045 -15.83 3.5 1.8 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
17 Bus 17 33 1 1 0 1.040 -16.14 9.0 5.8 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
18 Bus 18 33 1 1 0 1.028 -16.82 3.2 0.9 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
19 Bus 19 33 1 1 0 1.026 -17.00 9.5 3.4 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
20 Bus 20 33 1 1 0 1.030 -16.80 2.2 0.7 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
21 Bus 21 33 1 1 0 1.033 -16.42 17.5 11.2 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
22 Bus 22 33 1 1 0 1.033 -16.41 0.0 0.0 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
23 Bus 23 33 1 1 0 1.027 -16.61 3.2 1.6 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
24 Bus 24 33 1 1 0 1.021 -16.78 8.7 6.7 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.043 0
25 Bus 25 33 1 1 0 1.017 -16.35 0.0 0.0 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
26 Bus 26 33 1 1 0 1.000 -16.77 3.5 2.3 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
27 Cloverdle 33 1 1 0 1.023 -15.82 0.0 0.0 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
28 Cloverdle132 1 1 0 1.007 -11.97 0.0 0.0 0.0 0.0 132.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
29 Bus 29 33 1 1 0 1.003 -17.06 2.4 0.9 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
30 Bus 30 33 1 1 0 0.992 -17.94 10.6 1.9 0.0 0.0 33.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0
-999
BRANCH DATA FOLLOWS          41 ITEMS
1 2 1 1 1 0 0.0192 0.0575 0.0528 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
1 3 1 1 1 0 0.0452 0.1652 0.0408 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
2 4 1 1 1 0 0.0570 0.1737 0.0368 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
3 4 1 1 1 0 0.0132 0.0379 0.0084 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
2 5 1 1 1 0 0.0472 0.1983 0.0418 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
2 6 1 1 1 0 0.0581 0.1763 0.0374 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
4 6 1 1 1 0 0.0119 0.0414 0.0090 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
5 7 1 1 1 0 0.0460 0.1160 0.0204 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
6 7 1 1 1 0 0.0267 0.0820 0.0170 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
6 8 1 1 1 0 0.0120 0.0420 0.0090 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
6 9 1 1 1 0 0.0 0.2080 0.0 0 0 0 0 0.978 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
6 10 1 1 1 0 0.0 0.5560 0.0 0 0 0 0 0.969 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
9 11 1 1 1 0 0.0 0.2080 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
9 10 1 1 1 0 0.0 0.1100 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
4 12 1 1 1 0 0.0 0.2560 0.0 0 0 0 0 0.932 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
12 13 1 1 1 0 0.0 0.1400 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
12 14 1 1 1 0 0.1231 0.2559 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
12 15 1 1 1 0 0.0662 0.1304 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
12 16 1 1 1 0 0.0945 0.1987 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
14 15 1 1 1 0 0.2210 0.1997 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
16 17 1 1 1 0 0.0524 0.1923 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
15 18 1 1 1 0 0.1073 0.2185 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
18 19 1 1 1 0 0.0639 0.1292 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
19 20 1 1 1 0 0.0340 0.0680 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
10 20 1 1 1 0 0.0936 0.2090 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
10 17 1 1 1 0 0.0324 0.0845 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
10 21 1 1 1 0 0.0348 0.0749 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
10 22 1 1 1 0 0.0727 0.1499 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
21 22 1 1 1 0 0.0116 0.0236 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
15 23 1 1 1 0 0.1000 0.2020 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
22 24 1 1 1 0 0.1150 0.1790 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
23 24 1 1 1 0 0.1320 0.2700 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
24 25 1 1 1 0 0.1885 0.3292 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
25 26 1 1 1 0 0.2544 0.3800 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
25 27 1 1 1 0 0.1093 0.2087 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
28 27 1 1 1 0 0.0 0.3960 0.0 0 0 0 0 0.968 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
27 29 1 1 1 0 0.2198 0.4153 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
27 30 1 1 1 0 0.3202 0.6027 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
29 30 1 1 1 0 0.2399 0.4533 0.0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
8 28 1 1 1 0 0.0636 0.2000 0.0428 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
6 28 1 1 1 0 0.0169 0.0599 0.0130 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
-999
LOSS ZONES FOLLOWS          1 ITEMS
1 IEEE 30 BUS
-99
INTERCHANGE DATA FOLLOWS    1 ITEMS
-9
1 2 Claytor 132 0.0 999.99 IEEE30 IEEE 30 Bus Test Case
TIE LINES FOLLOWS          0 ITEMS
-999
END OF DATA

```

Figura 7.5. Datos del sistema de 30 Barras.

08/25/93 UW ARCHIVE		100.0 1961 W IEEE 57 Bus Test Case																	
BUS DATA FOLLOWS		57 ITEMS																	
1	Kanawha	V1	1	1	3	1.040	0.0	55.0	17.0	128.9	-16.1	0.0	1.040	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	Turner	V1	1	1	2	1.010	-1.18	3.0	88.0	0.0	-0.8	0.0	1.010	50.0	-17.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	Logan	V1	1	1	2	0.985	-5.97	41.0	21.0	40.0	-1.0	0.0	0.985	60.0	-10.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	Sprigg	V1	1	1	0	0.981	-7.32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	Bus 5	V1	1	1	0	0.976	-8.52	13.0	4.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	Beaver Ck	V1	1	1	2	0.980	-8.65	75.0	2.0	0.0	0.8	0.0	0.980	25.0	-8.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	Bus 7	V1	1	1	0	0.984	-7.58	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	Clinch Rv	V1	1	1	2	1.005	-4.45	150.0	22.0	450.0	62.1	0.0	1.005	200.0	-140.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	Saltville	V1	1	1	2	0.980	-9.56	121.0	26.0	0.0	2.2	0.0	0.980	9.0	-3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	Bus 10	V1	1	1	0	0.986	-11.43	5.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	Tazewell	V1	1	1	0	0.974	-10.17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	Glen Lyn	V1	1	1	2	1.015	-10.46	377.0	24.0	310.0	128.5	0.0	1.015	155.0	-150.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	Bus 13	V1	1	1	0	0.979	-9.79	18.0	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	Bus 14	V1	1	1	0	0.970	-9.33	10.5	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	Bus 15	V1	1	1	0	0.988	-7.18	22.0	5.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	Bus 16	V1	1	1	0	1.013	-8.85	43.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	Bus 17	V1	1	1	0	1.017	-5.39	42.0	8.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	Sprigg	V2	1	1	0	1.001	-11.71	27.2	9.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.10	0.0
19	Bus 19	V2	1	1	0	0.970	-13.20	3.3	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	Bus 20	V2	1	1	0	0.964	-13.41	2.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	Bus 21	V3	1	1	0	1.008	-12.89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	Bus 22	V3	1	1	0	1.010	-12.84	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	Bus 23	V3	1	1	0	1.008	-12.91	6.3	2.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	Bus 24	V3	1	1	0	0.999	-13.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	Bus 25	V4	1	1	0	0.982	-18.13	6.3	3.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.059	0.0
26	Bus 26	V5	1	1	0	0.959	-12.95	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	Bus 27	V5	1	1	0	0.982	-11.48	9.3	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	Bus 28	V5	1	1	0	0.997	-10.45	4.6	2.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	Bus 29	V5	1	1	0	1.010	-9.75	17.0	2.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	Bus 30	V4	1	1	0	0.962	-18.68	3.6	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	Bus 31	V4	1	1	0	0.936	-19.34	5.8	2.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	Bus 32	V4	1	1	0	0.949	-18.46	1.6	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	Bus 33	V4	1	1	0	0.947	-18.50	3.8	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	Bus 34	V3	1	1	0	0.959	-14.10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	Bus 35	V3	1	1	0	0.966	-13.86	6.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	Bus 36	V3	1	1	0	0.976	-13.59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	Bus 37	V3	1	1	0	0.985	-13.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	Bus 38	V3	1	1	0	1.013	-12.71	14.0	7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	Bus 39	V3	1	1	0	0.983	-13.46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	Bus 40	V3	1	1	0	0.973	-13.62	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	Tazewell	V6	1	1	0	0.996	-14.05	6.3	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	Bus 42	V6	1	1	0	0.966	-15.50	7.1	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	Tazewell	V7	1	1	0	1.010	-11.33	2.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	Bus 44	V3	1	1	0	1.017	-11.86	12.0	1.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	Bus 45	V3	1	1	0	1.036	-9.25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	Bus 46	V3	1	1	0	1.050	-11.89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	Bus 47	V3	1	1	0	1.033	-12.49	29.7	11.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	Bus 48	V3	1	1	0	1.027	-12.59	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	Bus 49	V3	1	1	0	1.036	-12.92	18.0	8.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	Bus 50	V3	1	1	0	1.023	-13.39	21.0	10.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
51	Bus 51	V3	1	1	0	1.052	-12.52	18.0	5.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
52	Bus 52	V5	1	1	0	0.980	-11.47	4.9	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
53	Bus 53	V5	1	1	0	0.971	-12.23	20.0	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.063	0.0
54	Bus 54	V5	1	1	0	0.996	-11.69	4.1	1.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
55	Saltville	V5	1	1	0	1.031	-10.78	6.8	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
56	Bus 56	V6	1	1	0	0.968	-16.04	7.6	2.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
57	Bus 57	V6	1	1	0	0.965	-16.56	6.7	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

-999

BRANCH DATA FOLLOWS

80 ITEMS

1	2	1	1	1	0	0.0083	0.0280	0.1290	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	3	1	1	1	0	0.0298	0.0850	0.0818	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	4	1	1	1	0	0.0112	0.0366	0.0380	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	5	1	1	1	0	0.0625	0.1320	0.0258	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	6	1	1	1	0	0.0430	0.1480	0.0348	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	7	1	1	1	0	0.0200	0.1020	0.0276	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	8	1	1	1	0	0.0339	0.1730	0.0470	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	9	1	1	1	0	0.0099	0.0505	0.0548	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	10	1	1	1	0	0.0369	0.1679	0.0440	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	11	1	1	1	0	0.0258	0.0848	0.0218	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	12	1	1	1	0	0.0648	0.2950	0.0772	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	13	1	1	1	0	0.0481	0.1580	0.0406	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	14	1	1	1	0	0.0132	0.0434	0.0110	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	15	1	1	1	0	0.0269	0.0869	0.0230	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	15	1	1	1	0	0.0178	0.0910	0.0988	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	16	1	1	1	0	0.0454	0.2060	0.0546	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	17	1	1	1	0	0.0238	0.1080	0.0286	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	15	1	1	1	0	0.0162	0.0530	0.0544	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	18	1	1	1	0	0.0	0.5550	0.0	0	0	0	0	0.970	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	18	1	1	1	0	0.0	0.4300	0.0	0	0	0	0	0.978	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	6	1	1	1	0	0.0302	0.0641	0.0124	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	8	1	1	1	0	0.0139	0.0712	0.0194	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	12	1	1	1	0	0.0277	0.1262	0.0328	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	13	1	1	1	0	0.0223	0.0732	0.0188	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	13	1	1	1	0	0.0178	0.0580	0.0604	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	16	1	1	1	0	0.0180	0.0813	0.0216	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	17	1	1	1	0	0.0397	0.1790	0.0476	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	15	1	1	1	0	0.0171	0.0547	0.0148	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	19	1	1	1	0	0.4610	0.6850	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	20	1	1	1	0	0.2830	0.4340	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	20	1	1	1	0	0.0	0.7767	0.0	0	0	0	0	1.043	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	22	1	1	1	0	0.0736	0.1170	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	23	1	1	1	0	0.0099	0.0152	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	24	1	1	1	0	0.1660	0.2560	0.0084	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	25	1	1	1	0	0.0	1.1820	0.0	0	0	0	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	25	1	1	1	0	0.0	1.2300	0.0	0	0	0	0	1.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	26	1	1	1	0	0.0	0.0473	0.0	0	0	0	0	1.043	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	27	1	1	1	0	0.1650	0.2540	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	28	1	1	1	0	0.0618	0.0954	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	29	1	1	1	0	0.0418	0.0587	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	29	1	1	1	0	0.0	0.0648	0.0	0	0	0	0	0.967	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	30	1	1	1	0	0.1350	0.2020	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	31	1	1	1	0	0.3260	0.4970	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	32	1	1	1	0	0.5070	0.7550	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	33	1	1	1	0	0.0392	0.0360	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	32	1	1	1	0	0.0	0.9530	0.0	0	0	0	0	0.975	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	35	1	1	1	0	0.0520	0.0780	0.0032	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	36	1	1	1	0	0.0430	0.0537	0.0016	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	37	1	1	1	0	0.0290	0.0366	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	38	1	1	1	0	0.0651	0.1009	0.0020	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	39	1	1	1	0	0.0239	0.0379	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	40	1	1	1	0	0.0300	0.0466	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	38	1	1	1	0	0.0192	0.0295	0.0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	41	1	1	1	0	0.0	0.7490	0.0	0	0	0	0	0.955	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

