

AJUSTE COORDINADO DE CONTROLADORES DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA UTILIZANDO ALGORITMOS EVOLUCIONARIOS PARALELOS

Abstract— Power Electric Systems (PES) are composed of a highly interconnected transmission system, offering greater reliability in the operation and high quality in the electric power supply for the consumption centers. However, the electrical distances between substations are reduced due to the mesh interconnection system; and, when large contingencies occur in a specific region, they rapidly affect, with the same intensity, neighboring regions, producing electromechanical oscillations with low, or negative, damping, followed by a significant and continuous degradation of the voltage profile. For this reason, in this work is proposed a coordinated tuning methodology of the exciter controller's dynamic parameters, in each generator, and the specific group of static var compensators, belonging to a multi-machine system. The static compensators are located into voltage sensitive substations to control the injection of reactive power, for voltage regulating. The coordinated adjustment problem was considered as an optimization problem, maximizing the minimum damping coefficient of the system, considering several critical operating conditions. The Genetic Algorithm (GA) was used in the optimization process, and due to the complexity and high dimension of the optimization problem, the AG was adapted for paralleling computing.

Keywords— Electromechanical Oscillations, Damping Coefficient, Exciter Controllers, Static Var Compensators, Genetic Algorithm, Parallel Computing.

Resumen— Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) están compuestos por sistemas de transmisión altamente interconectados, ofreciendo mayor confiabilidad en la operación y alta calidad en el suministro de energía eléctrica, para los centros de consumo. Sin embargo, las distancias eléctricas entre subestaciones se reducen debido al sistema mallado de interconexión; y, cuando ocurren grandes contingencias en una región afectan rápidamente, y con la misma intensidad, a regiones vecinas, produciendo oscilaciones electromecánicas con bajo, o negativo, amortiguamiento, acompañado de una degradación significativa y continua del perfil de tensión. Por esa razón, en el presente trabajo, se propone una metodología para ajuste coordinado de los parámetros dinámicos de los controladores de la excitatriz de cada generador, de un sistema multi-maquina, y a la vez, de un determinado grupo de compensadores estáticos de reactivos, localizados en determinadas subestaciones sensibles a la tensión, para el control de la potencia reactiva del SEP. El referido problema de ajuste coordinado fue considerado como un problema de optimización, maximizando el mínimo coeficiente de amortiguamiento del sistema, considerando diversas condiciones de operación críticas. Fue utilizado el Algoritmo Genético en el proceso de optimización, y debido a la complejidad y alta dimensión del problema fue adaptado el AG para computación paralela.

Palavras-chave— Oscilaciones Electromecánicas, Coeficiente de Amortiguamiento, Controladores de la Excitatriz, Compensadores Estáticos de Reactivos, Algoritmos Genéticos, Computación Paralela.

1 Introducción

Los SEP están caracterizados por un sistema de transmisión altamente interconectado, entre subestaciones y centrales de generación, ofreciendo una alta confiabilidad en la operación y suministro de energía eléctrica, para los centros de consumo. Sin embargo, debido a la interconexión mallada, la distancia eléctrica entre las subestaciones se reduce, de manera que cualquier contingencia grande que ocurra en una región (desconexión de importantes líneas de transmisión, fuera de operación de grupos de generadores, entre otros), afecta rápidamente a las subestaciones vecinas, con intensidad similar, produciendo oscilaciones electromecánicas y variaciones en el perfil de voltaje del sistema eléctrico (Kundur, 1994). Si los parámetros de los controladores de la excitatriz, de cada generador, y los parámetros dinámicos de cada Compensador Estático de Reactivos (CER), no están debidamente ajustados, teniendo en cuenta diversas condiciones de operación, las oscilaciones electromecánicas, debido a grandes contingencias, serán poco amortiguadas, o incluso, no amortiguadas, perdiendo estabilidad (Rogers, 2000).

Además, con el progresivo incremento de la demanda, la mayoría de los SEP operan cerca de sus límites de sobrecarga, requiriendo un desempeño robusto de los controladores del generador y de los CER, para

mantener la estabilidad angular y de voltaje, en diferentes escenarios de operación críticos.

Las oscilaciones electromecánicas están asociadas a las variaciones en la potencia activa y en el ángulo del rotor de cada generador, que son amortiguadas a través de *Estabilizadores de Sistemas de Potencia* (ESP), los cuales dan una señal adicional a la tensión de referencia del *Regulador Automático de Tensión* (RAT), localizados en la excitatriz de los generadores. De esa manera, el ESP actúa en conjunto con el RAT, para amortiguar oscilaciones electromecánicas y, a la vez, regular la tensión terminal del generador (Kundur, 1994).

Ya existen en la literatura científica trabajos que implementaron métodos para ajuste coordinado de RAT, ESP y CER, utilizando métodos determinísticos (Maslennikov, 1996), y métodos metaheurísticos (Sosa, 2014). Sin embargo, cuando son considerados sistemas eléctricos de gran porte, los referidos métodos comienzan a requerir grandes recursos computacionales, para los estudios de planificación de la operación y expansión de sistemas eléctricos.

Por consiguiente, en el presente trabajo se propone una metodología computacional para ajuste óptimo y simultáneo de parámetros del RAT y del ESP, localizados en la excitatriz de cada generador, así como también, los parámetros de cada CER instalado en un SEP, considerando diversas condiciones de operación crítica.

El método de ajuste coordinado está basado en el Algoritmo Genético (AG), debido a su comprobada eficacia para optimización de problemas de optimización complejos, representando sistemas dinámicos e industriales (Goldberg, 1989). Además, el AG fue adaptado para computación paralela, obteniendo un AG Paralelo (AGP), para aplicación en sistemas eléctricos de gran porte (Borges, 2004).

Para validar la metodología propuesta de ajuste coordinado, fue considerado el sistema eléctrico de medio porte *New England*. Los resultados obtenidos presentan altos coeficientes de amortiguamiento, considerando diversas condiciones de operación críticas, superior a la versión secuencial, con perfil de tensión aceptable, y notable reducción de tiempo computacional.

2 Modelos Matemáticos de los Controladores

2.1 Regulador Automático de Tensión

Fue considerado un modelo de RAT de primero orden, tal como ilustrado en la Figura 1. El referido modelo corresponde a una variante del IEEE ST1A (IEEE PES, 2009). La ganancia K_A y la constante de tiempo T_A son variables que deberán ser ajustadas con el procedimiento propuesto.

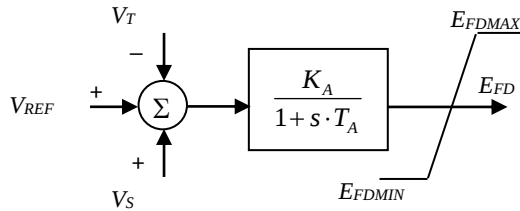


Figura 1. Modelo de primer orden del RAT.

2.2 Estabilizador de Sistemas de Potencia

El modelo de ESP utilizado en el presente trabajo se ilustra en la Figura 2, el cual, posee una ganancia, K_S , y dos bloques idénticos de avance-atraso (IEEE PES, 2009). La señal de entrada del ESP es la velocidad angular del rotor (ω). Las constantes de tiempo T_1 y T_2 , de los bloques de avance-atraso son calculados por el método de ajuste propuesto. La constante de tiempo, T_w , del bloque *Washout*, se considera conocido y está fijado en 3s ($T_w = 3s$). Los parámetros del ESP, que serán ajustados, son: K_S , T_1 , y T_2 . La señal de salida del ESP, V_S , corresponde al valor de tensión que se añadirá a la tensión de referencia del RAT, V_{REF} .

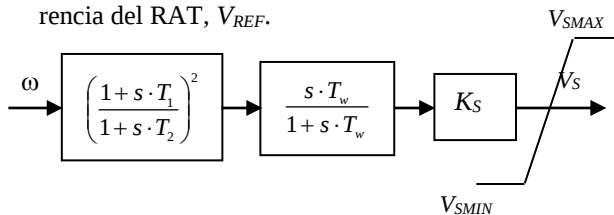


Figura 2. Modelo del ESP.

2.3 Compensador Estático de Reactivos

El modelo de primer orden del CER está ilustrado en la Figura 3, en el cual, la ganancia K_C y la constante de tiempo T_C son los parámetros dinámicos que serán ajustados. La señal de entrada V_C representa la tensión de la barra monitoreada, correspondiente a la subestación en donde el CER fue instalado. Esa tensión monitoreada es comparada con la tensión de referencia del regulador del CER, V_{RCER} , y produce una señal de control B_C , correspondiente a la susceptancia variable del compensador. Dicha susceptancia determina la necesaria potencia reactiva que deberá ser inyectada al SEP, a través del CER, para control de la tensión (IEEE Working Group, 1994).

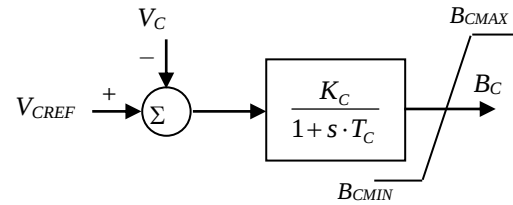


Figura 3. Modelo del CER.

Los valores de B_C pueden variar dentro del siguiente rango de valores: $B_{CMIN} \leq B_C \leq B_{CMAX}$, correspondientes a la susceptancia mínima y máxima, respectivamente. Las magnitudes V_{RCER} , B_{CMIN} , y B_{CMAX} determinan el rango de valores óptimos entre los cuales se puede inyectar la necesaria y correcta potencia reactiva al sistema, con la finalidad de mantener un buen perfil de tensiones ante un variado escenario de operación. Esas magnitudes también pueden ser optimizadas, y fueron ajustadas previamente siguiendo procedimiento descrito en (Chaparro, 2011).

3 Planteamiento del Ajuste Coordinado

Para estudios de estabilidad de pequeña señal, un SEP es representado a través de las ecuaciones de espacio de estado (Kundur, 1994):

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} \quad (1)$$

Las sub-matrices J_1 , J_2 , J_3 y J_4 , en la ecuación (1), forma el Jacobiano expandido del SEP. La expresión matemática (1) puede simplificarse, para obtener la matriz de estado del SEP, para una condición específica de operación.

$$A_{CL} = J_1 - J_2 \cdot J_4^{-1} \cdot J_3 \quad (2)$$

Entonces, la matriz A_{CL} contiene los coeficientes que multiplican a las variables de estado del SEP. Si la matriz A_{CL} contiene a los parámetros de los ESP y de los CER, entonces a dicha matriz se lo denomina Matriz de estado de lazo cerrado.

En el presente trabajo, la matriz A_{CL} contiene los coeficientes de las ecuaciones diferenciales del RAT, ESP y de los compensadores estáticos:

$$\dot{E}_{FD} = (V_S + V_{REF} - V_{TR} - V_{TI}) \cdot \frac{K_A}{T_A} \cdot \frac{E_{FD}}{T_A} \quad (3)$$

$$\dot{x}_1 = -\frac{1}{T_2} \cdot x_1 + \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2^2} \right) \cdot \omega \quad (4)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{T_2} \cdot x_2 + \left(\frac{T_2 - T_1}{T_2^2} \right) \cdot x_1 \quad (5)$$

$$x_3 = K_S \cdot x_2 \quad (6)$$

$$\dot{B} = -\frac{1}{T_C} \cdot B + \frac{K_C}{T_C} \cdot V_{CREF} \quad (7)$$

En el procedimiento de ajuste coordinado propuesto los coeficientes de las ecuaciones (3), (4), (5), (6) y (7) son modificados directamente dentro de la matriz A_{CL} , por el AG a través de sus operadores genéticos.

Entonces, el procedimiento de ajuste coordinado fue considerado un problema de optimización, cuya función objetivo está relacionada con el mínimo coeficiente de amortiguamiento, ζ_{MIN} , obtenido de la matriz de estado de malla cerrada, A_{CL} , definida para cada condición de operación crítica considerada.

De esa manera, para cada condición de operación i , se tiene la matriz de estado $A_{CL,i}$, tal que $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ donde m es el número de escenarios de operación críticos considerados; y, por consiguiente, se tiene el correspondiente coeficiente mínimo de amortiguamiento, $\zeta_{MIN,i}$, para escenario de operación. Por consiguiente, el coeficiente de amortiguamiento mínimo, considerando todos esos escenarios de operación, se calcula de la siguiente manera:

$$\zeta_{MIN} = \min\{\zeta_{MIN,1}, \zeta_{MIN,2}, \dots, \zeta_{MIN,m}\} \quad (8)$$

La ecuación (8) asegura la robustez en el ajuste coordinado, debido a que cuanto mayor sea el valor de ζ_{MIN} , el SEP poseerá un amortiguamiento rápido para las oscilaciones electromecánicas y presentará un buen perfil de tensiones frente a variados escenarios de operación. Además, para obtener el i -ésimo coeficiente de amortiguamiento mínimo, $\zeta_{MIN,i}$, se utiliza el método QR de cálculo de autovalores (Press, 1992), tal que:

$$\zeta_{MIN,i} = \min\{\zeta_1 \quad \zeta_2 \quad \dots \quad \zeta_n\}_i \quad (9)$$

donde n es la dimensión de la matriz de estado de malla cerrada $A_{CL,i}$. Entonces, la expresión matemática de la ecuación (9) está indicando la obtención de los n coeficientes de amortiguamientos, calculados de los n autovalores de la matriz de estado de lazo cerrado, asociada a la i -ésima condición de operación.

4 Método de Ajuste Coordinado Implementado

El ajuste coordinado de controladores del SEP, para diversas condiciones de operación, fue formulado como un problema de optimización mono-objetivo, basado en el AG. El AG fue implementado siguiendo de acuerdo con (Goldberg, 1989).

4.1 Vector Solución

Cada solución factible está representada por un vector, conteniendo los valores numéricos de los parámetros del RAT, ESP y CER, tal cual como se describe a continuación:

$$x_{RAT} = [K_{A,1} \quad T_{A,1} \quad \dots \quad K_{A,p} \quad T_{A,p}] \quad (10)$$

$$x_{ESP} = [K_{S,1} \quad T_{1,1} \quad T_{2,1} \quad \dots \quad K_{S,p} \quad T_{1,p} \quad T_{2,p}] \quad (11)$$

$$x_{CER} = [K_{C,1} \quad T_{C,1} \quad \dots \quad K_{C,b} \quad T_{C,b}] \quad (12)$$

Donde p indica el número de generadores que contiene el SEP; y, b representa el número de compensadores estáticos, localizados en las b subestaciones seleccionadas. Las ecuaciones (10), (11) y (12), se complementan para formar el g -ésimo vector solución, tal que $g \in \{1, 2, \dots, N\}$ | N es el tamaño de la población del AG.

$$x_g = [x_{RAT} \quad x_{ESP} \quad x_{CER}]_g \quad (13)$$

La ecuación (13) muestra al g -ésimo vector solución (individuo) sobre el cual se aplican los operadores genéticos del AG para la obtención de nuevos individuos, en cada iteración, en el espacio de búsqueda, produciendo soluciones cada vez mejores. En el presente trabajo, el AG actuó sobre una población de 120 individuos ($N = 120$).

4.2 Función Objetivo

La función objetivo, o *Fitness*, asociado a cada individuo, que el AG debe maximizar, corresponde al mínimo coeficiente de amortiguamiento, tal como se describe a continuación:

$$Fitness_g = F(x_g) = \zeta_{MIN,g} \quad (14)$$

4.3 Obtención de la Población Inicial del AG

El AG inicia el proceso de búsqueda, generando aleatoriamente un conjunto de $N-1$ individuos. Los valores numéricos de los parámetros, contenidos en cada individuo, se generan entre los siguientes límites: $100 \leq K_A \leq 400$ pu ; $0.02 \leq T_A \leq 0.5$ s; $1 \leq K_S \leq 20$ pu; $0.05 \leq T_1 \leq 0.5$ s; $0.005 \leq T_2 \leq 0.05$ s; $100 \leq K_C \leq 400$ pu; $0.02 \leq T_C \leq 0.5$ s.

El individuo restante se obtiene aplicando el criterio de *Nyquist* para ajuste de ESP (Gomes, 1998), manteniendo fijo los valores de los parámetros de cada RAT y CER. De esa forma, los parámetros del RAT son: $K_A = 100$ pu y $T_A = 0,05$ s, para cada generador del sistema; y, $K_C = 100$ pu y $T_C = 0,5$ s, para cada CER del conjunto de compensadores considerados.

4.4 Operadores Genéticos

Los operadores del AG implementados son (Goldberg, 1992): La *Selección* basada en el torneo estocástico (cinco individuos en el torneo), *Cruzamiento* de un punto de corte, y *Mutación* simple. Las probabilidades de *Cruzamiento* y *Mutación* son 0,7 y 0,01, respectivamente.

4.5 Tamaño de la Población y Criterio de Parada

El tamaño de la población es $N = 120$ individuos; y, criterio de parada del AG corresponde al máximo número de generaciones (iteraciones), que fue fijado en 100 generaciones.

5 AG adaptado para Computación Paralela

El método de ajuste coordinado implementado y aplicados a un SEP, de medio o de gran porte, basado en AG, requiere de grandes esfuerzos computacionales, representados por elevados tiempos de ejecución y grandes espacios de memoria RAM. Una forma para reducir el tiempo computacional y minimizar los requerimientos de memoria, consiste en la adaptación del AG para procesamiento paralelo, obteniéndose un AG Paralelo (AGP). De esa manera, en el presente trabajo, fueron implementados y propuestos dos tipos diferentes de estrategias para computación paralela del AG utilizado en el procedimiento de ajuste coordinado de controladores de SEP: AGP *Maestro/Esclavo* y AGP *Multi-Población* (Borges, 2004).

5.1 AGP Maestro/Esclavo

En el AGP tipo Maestro/Esclavo, llamado AGPMS en el presente trabajo, la evaluación del *Fitness*, de cada uno de los individuos, se realiza en los procesos *Esclavos* (Borges, 2004). La población inicial, en el AGPMS, se genera de la misma manera como fue descrita en la sub-sección 4.3, de la presente contribución técnica.

Después de obtener la población inicial, y en cada generación del AG, ejecutándose en el proceso *Maestro*, se envían a cada *Esclavo* N_P individuos, donde $N_P = N / (P-1)$. P corresponde al número de computadores activos y seleccionados para la ejecución del AGPMS, en el *Cluster* (computadores interconectados por una red *Ethernet*).

Luego de finalizar la evaluación del *Fitness*, en cada proceso *Esclavo*, los resultados son retornados al proceso *Maestro*. La Figura 4 ilustra la topología de comunicación del algoritmo AGPMS. Así también, en el AGPMS los operadores genéticos son aplicados en el proceso *Maestro*, para obtener nuevos individuos.

La comunicación entre el proceso *Maestro* y los procesos *Esclavos* se realiza de forma síncrona, es decir, durante la comunicación de datos entre los procesos *Maestro* y *Esclavos*, el proceso iterativo del AG, en el *Maestro*, se detiene, y se reanuda luego de finalizar la transmisión de datos entre procesos.

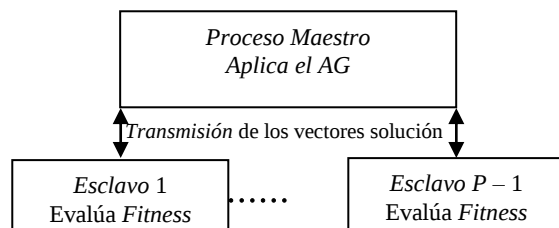


Figura 4. Esquema del AGPMS.

5.2 AGP Multipoblación

En esta técnica de computación paralela, denominada AGPMP, se implementa un AG en cada computador del *Cluster*. El AG estará aplicando los operadores genéticos sobre una población de N_P individuos, tal que $N_P = N / P$. Aquí también, cada procesador inicia la ejecución del AG generando la población inicial de la misma manera como fue descrita en la sub-sección 4.3. Sin embargo, para asegurar que cada población de individuos sea diferente, comparativamente con la población de los otros procesos, se utiliza un valor inicial diferente para la generación de números *pseudo-aleatorios* (Press, 1992). La siguiente expresión matemática indica el valor inicial (*semilla*) diferente para alterar la secuencia de números aleatorios:

$$semilla_k = \frac{semilla_0}{P} \quad (15)$$

donde $semilla_0$ corresponde al número que inicia la secuencia de números *pseudo-aleatorios* del proceso 1, y $k \in \{1, 2, \dots, P\} \mid P$ número de procesadores del *Cluster*.

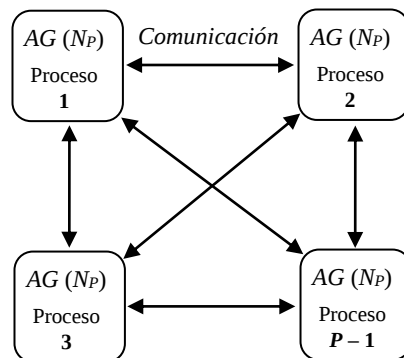


Figura 5. Esquema del AGPMP.

La Figura 5 muestra la topología de comunicación del AGPMP. La comunicación también es síncrona, y en el presente trabajo, se realiza durante el ciclo iterativo del AG, y a cada 10 (diez) generaciones. Cada procesador envía al otro el individuo con el *Fitness* más alto obtenido (Borges, 2004). Cada procesador recibe $P - 1$ individuos, de los cuales se escoge aquel que posea el *Fitness* más alto y substituye al individuo con el *Fitness* menor, en dicha población. La ejecución del algoritmo AGPMP culmina cuando se hayan completado 100 generaciones.

6 Simulación y Análisis de Resultados

6.1 Ambiente Computacional

Para la implementación computacional fue utilizada una red de área local correspondiente a un cluster de 7 (siete) computadores interconectados a través de un *switch Fast-Ethernet* (ruteador) de 100 Mbits por segundo. Cada computador posee un microprocesador *Intel Core i7* de 2 núcleos y memoria RAM de 2 Gbytes. Fue utilizado el sistema operativo Linux para la plataforma computacional paralela *Pelican HPC* (Creel, 2012), con el cual se desarrollan algoritmos usando funciones MPI (*Message Passing Interface*), para establecer el protocolo y la topología de comunicación entre procesadores de la red. A su vez, todos los algoritmos secuenciales y paralelos fueron desarrollados utilizando el lenguaje GNU Octave para Linux (Eaton, 2017).

6.2 SEP New England

El SEP utilizado para validar el método de ajuste coordinado propuesto fue el sistema eléctrico *New England*, descrito en (Byerly, 1978), el cual contiene 39 barras y 10 generadores, y cuya topología se ilustra en la Figura 6. Uno de los generadores constituye un generador equivalente que representa la dinámica del sistema eléctrico *New York*, al cual el sistema *New England* está interconectado; por lo tanto, serán ajustados los parámetros del RAT y del ESP de los nueve generadores restantes.

A su vez, considerando la metodología de localización y dimensionamiento de compensadores estáticos, descrito en (Chaparro, 2011), serán ajustados los parámetros dinámicos de tres compensadores estáticos, localizados en las barras 6, 7, y 20. La Tabla 1 describe las condiciones de operación consideradas durante el procedimiento de ajuste, de todos los controladores. Con dichas condiciones de operación se asegura la robustez del método.

Tabla 1. Condiciones de Operación.

#	Descripciones
1	Caso Base.
2	LT* 4-14 y LT 16-17 fuera de servicio.
3	LT 3-18 y LT 25-26 fuera de servicio.
4	LT 6-11 fuera de servicio.
5	Carga total incrementada en 10%.
6	Carga total reducida en 10%.

*LT – Línea de Transmisión

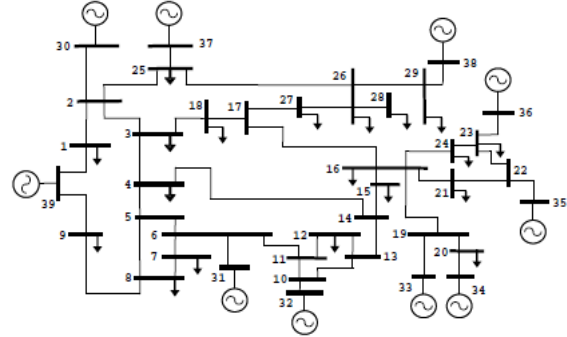


Figura 6. Sistema Eléctrico New England.

6.3 Resultados Numéricos

La Tabla 2 muestra los resultados experimentales para el AG secuencial (AGS) y los algoritmos paralelos: AGPMS y AGPMP. En la misma Tabla 2, F_{MAX} es el máximo *Fitness* obtenido al finalizar la ejecución del AG, y *time(s)* indica el tiempo de computación, S_p es la aceleración lograda de cada algoritmo paralelo, considerando diferentes números de procesadores, con respecto a la computación del AGS, y $E(\%)$ representa la eficiencia del algoritmo paralelo, expresado en porcentaje.

Tabla 2. Resultados para el AGS, AGPMS y AGPMP

AGS				
Proc	F_{MAX}	time(s)		
1	15.4129	2751.7		
AGPMS				
Proc	F_{MAX}	time(s)	S_P	E(%)
2	15.5680	1384.2	1.99	99.50
4	16.0263	702.3	3.92	98.00
6	15.5732	474.8	5.80	96.97
AGPMP				
Proc	F_{MAX}	time(s)	S_P	E(%)
2	15.7227	1400.1	1.97	98.50
4	16.5474	703.0	3.91	97.75
6	15.6748	477.3	5.77	96.17

Los números de la columna *Proc*, en la Tabla 2, corresponden al número de procesadores utilizados para la ejecución del algoritmo AGPMP, y el número de procesos *Esclavos* par el algoritmo AGPMS. En el algoritmo AGPMS, como se indica en el esquema de la Figura 4, un proceso *Maestro* se encarga de aplicar el AG, para la optimización, y $P - 1$ procesos *Esclavos* realizan la evaluación del *Fitness* de cada individuo, y luego, son retornados al proceso *Maestro*.

Los valores numéricos para S_P y $E(\%)$ se calculan de la siguiente manera (Eager, 1989):

$$S_P = \frac{T_{AGS}}{T_{AGP}} \quad (16)$$

$$E(\%) = \frac{S_P}{P} \times 100\% \quad (17)$$

donde T_{AGS} y T_{AGP} corresponden al mejor tiempo de la computación secuencial y el tiempo de computación del tipo AG paralelo, respectivamente.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 2, el algoritmo AGPMS reduce substancialmente el tiempo de computación, y la mínima eficiencia utilizando 6 procesos *Esclavos* y un proceso *Maestro* es cercano a los 97%. El mínimo coeficiente de amortiguamiento obtenido fue de 16,02% ($F_{MAX} = 16,0263$).

A su vez, con el AGPMP se obtuvo un *Fitness* de 16,5% ($F_{MAX} = 16,5474$), superior al obtenido por el AGPMS. Por otro lado, el tiempo de computación del AGPMP es levemente mayor, comparativamente, con el tiempo de computación del AGPMS, debido a que, en el AGPMP, la comunicación entre procesadores es mallada (densa). Los valores de S_P y $E(\%)$, se mantienen próximos, comparando con los correspondientes valores del AGPMS.

La Figura 7 muestra la curva de aceleración para los algoritmos paralelos desarrollados, y se puede observar que ambos presentan un comportamiento casi lineal.

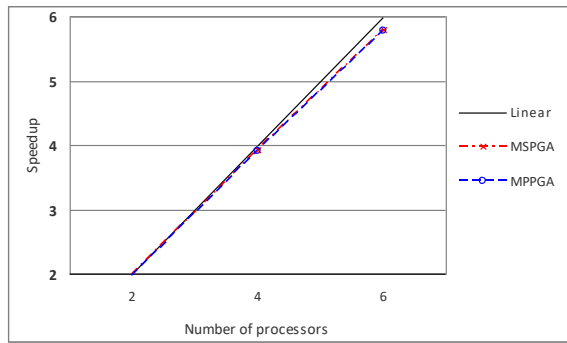


Figura 7. Curvas de aceleración (S_P) del AGPMS y AGPMP.

De la Tabla 2 se comparan los *Fitness* obtenidos entre los algoritmos paralelos, y se escoge aquella solución de ajuste de parámetros que represente al *Fitness* con el mayor valor, el cual está dado por el algoritmo AGPMP ($F_{MAX} = 16,5474$).

En la Tabla 3 y 4 se muestran los valores de los parámetros del RAT y el ESP, así como también, los parámetros de cada CER del grupo de compensadores estáticos, respectivamente, que representen el *Fitness* máximo obtenido por el AGPMP.

Tabla 3. Valores paramétricos para el RAT y el ESP.

#G	K_A	T_A	K_S	T_1	T_2
30	100	0.08	19	0.10	0.001
31	100	0.10	16	0.09	0.001
32	100	0.05	17	0.07	0.010
33	100	0.05	17	0.09	0.001
34	100	0.02	19	0.05	0.019
35	100	0.05	20	0.10	0.008
36	100	0.07	15	0.10	0.011
37	100	0.05	18	0.10	0.007
38	100	0.05	20	0.06	0.001

Tabla 4. Parámetros del CER.

#B	K_C	T_C
6	100.0	0.15
7	138.3	0.40
20	128.3	0.02

Los símbolos #G y #B, en las columnas de las Tablas 3 y 4, representa la barra en donde está conectado el generador, y la barra en donde se encuentra instalado el CER, respectivamente.

La Figura 8 muestra algunos autovalores de *lazo-cerrado* y de *lazo-abierto* para el caso en que el SEP contenga, o no, los correspondientes ESPs y CERs, instalados en la excitatriz de los generadores y en las subestaciones sensibles a la tensión, respectivamente. Para el mapa de autovalores, de la Figura 8, fueron consideradas las condiciones de operación 2 y 3, de la Tabla 1, y el algoritmo AGPMP, correspondiente a la mejor solución obtenida ($F_{MAX} = 16,5474$).

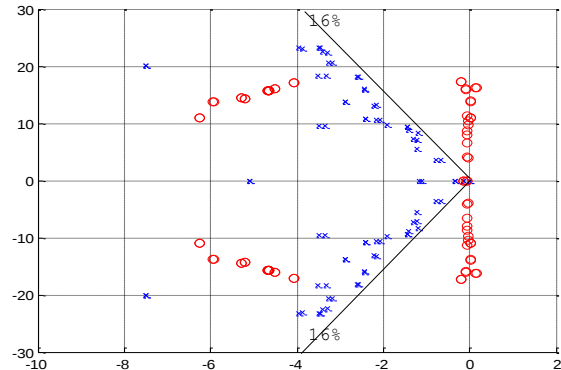


Figura 8. Mapa de autovalores, antes y después del ajuste.

En la Figura 8, aquellos polos representados por el símbolo 'o' corresponden a los autovalores de *lazo-abierto*. En cambio, los autovalores de *lazo-cerrado* fueron representados por el símbolo 'x'. De esa manera, el ajuste obtenido por el AGPMP, para los parámetros de los controladores, representan un alto amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas en caso de contingencias.

Fue utilizado el paquete de *software* de la CEPEL (ANAREDE, 2016) y (ANATEM, 2017) para realización de simulaciones dinámicas de las contingencias descritas en la Tabla 1. Fueron simuladas las condiciones de operación 2 y 3.

En las Figuras 9 y 10 se muestran las curvas de respuesta en el dominio del tiempo del ángulo del rotor de los generadores 33 y 38, y las tensiones de las barras 4 y 16, respectivamente, asociados a la condición de operación 2.

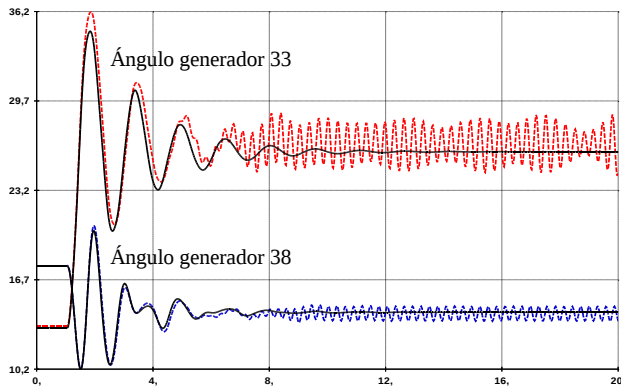


Figura 9. Respuesta transitoria del ángulo del rotor – Condición 2.

En las Figuras 9 y 10, las líneas punteadas corresponden a casos no amortiguados; es decir aquellas simulaciones realizadas con el SEP, cuyos generadores poseen solamente RAT en la excitatriz, y no hay CER instalado. En cambio, las líneas continuas representan casos amortiguados; es decir, los generadores poseen RAT y ESP y existen CER instalados.

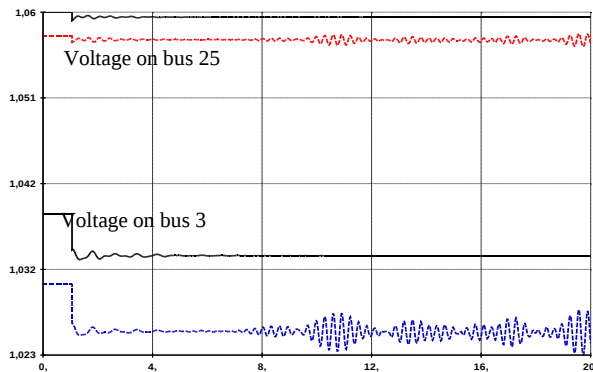


Figura 10. Respuesta transitoria de la tensión – Condición 2.

Las Figuras 11 y 12 muestran las curvas en el dominio del tiempo de los ángulos retóricos de los generadores asociados a las barras 33 y 38, y los valores de tensión instantáneas en las barras 3 y 25, respectivamente, asociados a la simulación de la condición de operación 3, como se describe en la Tabla 1. Aquí también, las líneas punteadas representan al caso no amortiguado y las líneas continuas se refieren al caso amortiguado.

En los casos no amortiguados, cada generador posee en su excitatriz un RAT cuyos parámetros fueron fijados en $K_A = 200$ pu y $T_A = 0,05$ s.

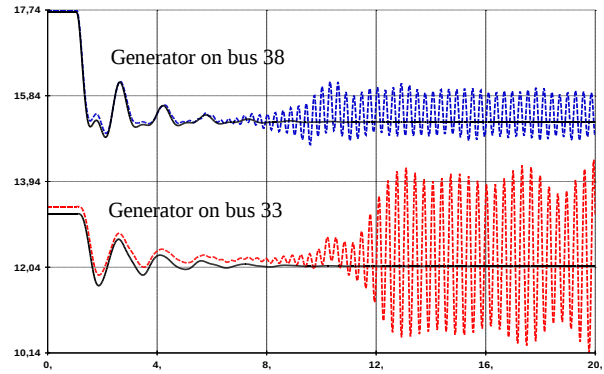


Figura 11. Respuesta transitoria del ángulo rotor – Condición 3.

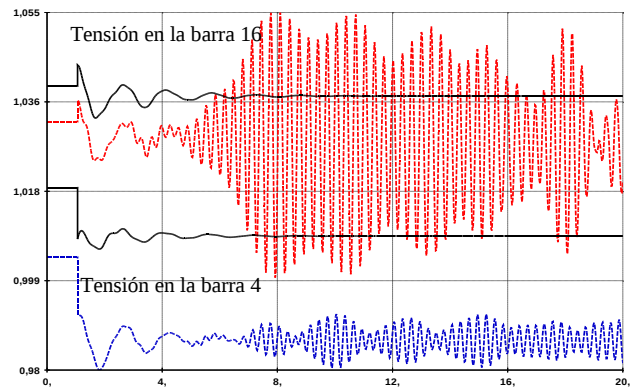


Figura 12. Respuesta transitoria de la tensión – Condición 3.

7 Conclusiones

Fue implementada la metodología propuesta para ajuste coordinado de los parámetros de los controladores localizados en la excitatriz de los generadores (RAT y ESP), y de los parámetros de un grupo de compensadores estáticos, instalados en determinadas subestaciones del correspondiente SEP bajo estudio. En el referido procedimiento de ajuste fueron considerados, simultáneamente, diversas condiciones de operación crítica del SEP, con lo que se asegura la robustez del método.

El método de ajuste propuesto fue validado considerando el sistema *New England*, donde el AGS y los dos tipos de AG paralelos fueron aplicados para obtener los parámetros de los controladores seleccionados, obteniendo valores de ajuste que representan altos coeficientes de amortiguamiento. Sin embargo, el tiempo computacional, necesario para que el AGS encuentre soluciones óptimas de ajuste, es alto y se puede tornar inviable para sistemas eléctricos de gran porte.

Por esa razón, fueron implementados los algoritmos paralelos AGPMS y AGPMP como una solución no sólo para reducir los tiempos de computación sino también para reducir los requerimientos de memoria (espacio) de almacenamiento de datos.

De esa manera, ambos algoritmos paralelos reducen substancialmente el tiempo de computación, y el AGPMP consigue, en promedio, valores de *Fitness* más altos que los obtenidos por el AGPMS.

Como continuidad del presente trabajo se están adaptando los algoritmos para la implementación del método propuesto de ajuste coordinado en sistemas eléctricos de mayor porte, y la utilización de comunicación asíncrona entre procesadores.

Referências Bibliográficas

- Borges T., L. C., Viveros, E. C., Taranto, G. N. (2004). Parallel Genetic Algorithms Applied to Damping Controllers Tuning on a Linux Cluster of PCs. WSEAS Transactions on Systems, Issue 3, Vol. 3, pp. 1280 – 1285.
- Byerly, R. T., Sherman, D. E., and Bernnon, R. J. (1978). Frequency Domain Analysis of Low Frequency oscillations in Large Electric Systems. *Report EPRI EL*.
- Chaparro, E. R. and Sosa M. L. (2011). Coordinated Tuning of a Set of Static Var Compensators using Evolutionary Algorithms. 2011 IEEE Trondheim PowerTech, Trondheim, Norway, 19-23 June.
- Creel, M. (2012). Pelican HPC: A Linux Cluster Distribution for MPI-based Parallel Computing. Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona Graduate School of Economics and MOVE, Barcelona, Spain.
Available: <http://www.pelicanhpc.org>.
- Eager, D. L., Zahorjan, J., and Lazowska, E. D. (1989). Speedup Versus Efficiency in Parallel Systems. IEEE Transactions on Computers, Vol. 38, No. 3, March 1989.
- Eaton, J. W., Bateman, D., Hauberg, S., Wehbring, R. (2017). GNU Octave: A High-level interactive language for numerical computations. Boston, MA – USA.
- Eletrobras Cepel (2016). Programa de Análise de Redes V10.01.03 – ANAREDE. DRE – Departamento de Redes Elétricas, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.
- Eletrobras Cepel (2017). Análise de Transitórios Eletromecânicos 11.02.00 – ANATEM. DRE – Departamento de Redes Elétricas, Rio de Janeiro – RJ, Brasil.
- Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, MA.
- Gomes Jr., S., Martins, N., Pinto, H. J. C. P. (1998). Utilização do Método de Nyquist para a Estabilização de Sistemas de Potência Envolvendo Alocação de Par de Pólos Complexos. Proceedings of XII Brazilian Automatic Control Conference – XII CBA, Vol. I, pp. 137 – 142, September 14 – 18, Uberlândia, MG, Brasil.
- IEEE PES Tutorial Course (2009). Power System Stabilization via Excitation Control, 09TP250.
- IEEE Working Group (1994). Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 9, No. 1, February 1994.
- Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. Electric Power Research Institute – EPRI series. McGraw Hill, Inc., 1994.
- Maslennikov, V. A. and Ustinov, S. M. (1996). The Optimization Method for Coordinated Tuning of Power System Regulators. 12th Power Systems Computation Conference – 12th PSCC, Dresden, Germany, August 19 – 23.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., Flannery, B. P. (1992). Numerical Recipes in C – The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press – Second Edition, ISBN 0 521 43108 5 (Book).
- Rogers, G. (2000). Power System Oscillations. Springer Science + Business Media, LLC.
- Sosa R., M. L. and Gonzalez-Fernandez, R. A. (2014). Coordinated Tuning of Power Systems Controllers using Metaheuristics Techniques. 18th Power Systems Computation Conference – 18th PSCC, Wroclaw, Poland, August 18 – 22.