



Comité Nacional Paraguayo  
VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELÉCTRICO PARAGUAYO  
29, 30 y 31 DE OCTUBRE DE 2006



Unión de Ingenieros de la ANDE  
VII SEMINARIO TÉCNICO – U.I.A

## **Ajuste Coordinado de Estabilizadores de Sistemas de Potencia y Reguladores Automáticos de Tensión Utilizando Algoritmos Genéticos Multi-Objetivos**

**Enrique Ramón Chaparro Viveros**

**Departamento de Operación de Sistemas  
División de Estudios Eléctricos  
ITAIPU BINACIONAL  
Paraguay**

### **RESUMEN**

En el presente trabajo, se introduce una metodología para ajuste coordinado de determinados parámetros de los *Reguladores Automáticos de Tensión (RAT)* y de los *Estabilizadores de Sistemas de Potencia (ESP)*, controladores existentes en el sistema de excitación de cada maquina de generación de un Sistema Eléctrico de Potencia, basado en la utilización de los *Algoritmos Genéticos Multi-Objetivos (AGMO)*.

El ajuste coordinado de los parámetros del *RAT* y del *ESP*, considerando múltiples condiciones de operación, es un problema extremadamente difícil para ser resuelto analíticamente. De esa manera, el ajuste de esos parámetros es considerado como un *Problema de Optimización Multi-Objetivo*. Son implementados dos métodos de ajuste basados en *AGMO*, cada uno de los cuales presenta pequeñas variaciones en su implementación con relación al Algoritmo Genético básico. La diferencia básica entre esos dos métodos esta en la evaluación de la función objetivo (*Fitness*) a ser optimizado. Cada uno de los procedimientos de ajuste coordinado fue aplicado sobre un Sistema de Potencia de medio porte, para validación de la metodología propuesta. Los resultados presentados indican que las metodologías implementadas son capaces de encontrar soluciones que satisfacen los criterios de diseño.

### **PALABRAS CLAVES**

Controladores del Sistema de Excitación, Control Coordinado, Algoritmo Genético Multi-Objetivo.

# 1. INTRODUCCIÓN

La metodología implementada, en el presente trabajo, para el ajuste coordinado de los parámetros del *RAT* y del *ESP* constituye una extensión del trabajo desarrollado en la referencia [1]. Los beneficios que ofrece la coordinación en el ajuste de los principales controladores del sistema de excitación de los generadores, para obtener una óptima regulación de tensión y una mejora en el amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas, en los *SEP*, ya fue planteado y analizado en las referencias [2, 3].

El ajuste coordinado de los parámetros del *RAT* y del *ESP*, del sistema de excitación de cada unidad generadora en un sistema multi-maquina, considerando múltiples condiciones de operación, es un problema extremadamente difícil de ser resuelto analíticamente. Normalmente, el problema de ajuste coordinado es puesto en la forma de un problema de optimización multi-objetivo.

En este caso, se tienen dos funciones objetivos a ser optimizados. El primer objetivo está relacionado con el amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas, a través de los *ESP*, y el segundo está asociado con la calidad en la regulación de tensión a través de los *RAT*. La solución de este tipo de problemas de optimización con dos objetivos no es trivial, debido a la diferente procedencia de cada función objetivo. La primera función objetivo es determinada en el dominio de la frecuencia (máximo coeficiente de amortiguamiento), y la otra función es calculada en el dominio del tiempo (mínimo error de la regulación de tensión).

Se propone entonces la implementación de un procedimiento de ajuste coordinado basado en la utilización de los *Algoritmos Genéticos (AG)*. Los *AG* son procedimientos de búsqueda basados en los mecanismos naturales de la *Selección* y la *Genética* de las especies [4]. Fueron desarrollados para resolver y optimizar problemas tecnológicos complejos. Los *AG* son conceptualmente simples: mantienen una población de soluciones en cada iteración (generación), y en cada generación son seleccionadas las mejores soluciones para recombinar sus mejores características, y éstas substituyen a las peores soluciones encontradas. La referencia [5] presenta una lista importante de trabajos en donde se utilizan los *AG* para resolver problemas de Sistemas de Potencia.

Para la implementación del procedimiento propuesto para el ajuste coordinado de los *RAT* y los *ESP*, el *AG* es adaptado para resolver problemas de optimización multi-objetivo, obteniéndose un *AG Multi-Objetivo (AGMO)*. Fueron desarrollados dos tipos de *AGMO*. Cada uno de los algoritmos difiere entre sí debido a pequeñas modificaciones realizadas sobre el *AG* padrón, detallado en [4].

La principal variación se refiere al procedimiento utilizado para la evaluación del *Fitness* de cada solución. En el primer tipo de *AGMO*, el *Fitness* es calculado a través de la utilización de pesos de ponderación, con el cual el valor numérico del *Fitness* es igual a la suma ponderada de cada objetivo multiplicada por el peso correspondiente. El siguiente tipo de *AGMO* utiliza las reglas de dominancia de *Pareto*, a través de la cual la población es clasificada discriminando los individuos óptimos. Para validar la metodología de ajuste coordinado propuesto, cada tipo de *AGMO* desarrollado es aplicado sobre un *SEP* de medio porte.

## 2. MODELO MATEMÁTICO DE LOS CONTROLADORES

En esta sección se presenta una breve introducción a los modelos matemáticos utilizados para representar a los controladores del sistema de excitación de cada generador de un *SEP*.

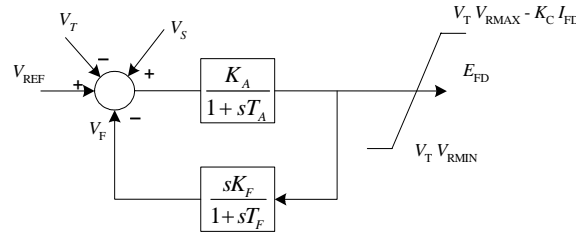
### 2.1. Sistema de Excitación

Cada generador de un determinado *SEP* está formado principalmente por los siguientes componentes [6]: a) la *Excitatriz*, que alimenta a la bobina de campo con tensión constante; b) *Regulador de Tensión*, en donde se procesa y amplifica las señales de entrada para una forma y niveles adecuados para transmitir una señal de control a la *Excitatriz*; y, c) *Estabilizador de Sistemas de Potencia*, que provee una señal adicional al *RAT*, con la finalidad de amortiguar las oscilaciones electromecánicas.

El conjunto formado por la *Excitatriz* y el *Regulador de Tensión* es también conocido como el *Regulador Automático de Tensión (RAT)* del generador

## 2.2. Modelo del RAT

En el presente trabajo, fue utilizada una variante del *RAT* derivado del modelo ST1A [7], cuyo diagrama de bloque es mostrado en la **Figura 1**:

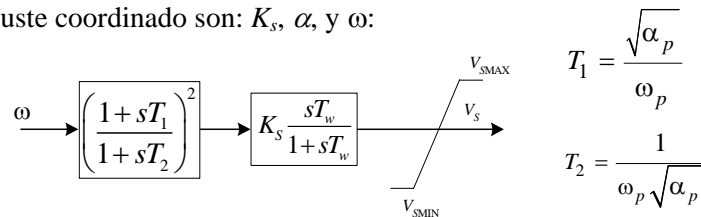


**Figura 1: Modelo del RAT.**

Los parámetros a ser ajustados son: la ganancia  $K_A$  y la constante de tiempo  $T_A$ . Los valores de la ganancia  $K_F$  son pequeños y se encuentran en el intervalo 0,02 – 0,06 pu; y la constante de tiempo  $T_F$  es normalmente mantenido constante, y cerca de 1 s [7].

## 2.3. Modelo del ESP

El modelo del *ESP* utilizado es mostrado en la **Figura 2**. La señal de entrada corresponde a la velocidad angular del rotor del generador ( $\omega$ ). En la **Figura 2**, también se describen a las constantes de tiempo de los bloques de avance-atraso. El valor preciso de la constante de tiempo  $T_w$  no es crítico, y puede asumir valores comprendidos entre 3 – 10 s. Por lo tanto,  $T_w$  es considerado un parámetro conocido. De esa manera, los parámetros del *ESP*, que deberán ser ajustados por el procedimiento propuesto de ajuste coordinado son:  $K_s$ ,  $\alpha$ , y  $\omega$ :



**Figura 2: Modelo del ESP.**

## 2.4. Modelo Matemático del Sistema de Potencia

El modelo del *SEP*, usualmente adoptado en los estudios de transitorios electromecánicos, es dado por un conjunto de ecuaciones diferenciales no-lineales de primer orden y un conjunto de ecuaciones algebraicas:

$$\frac{dx}{dt} = f(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = f(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \quad (1)$$

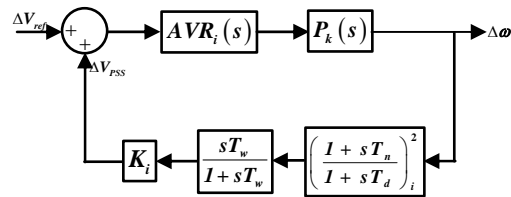
$$\mathbf{0} = g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = g(\mathbf{x}, \mathbf{V}) \quad (2)$$

En las ecuaciones (1) y (2),  $\mathbf{x}$  es el vector de estados de la dinámica del *SEP* y  $\mathbf{V}$  es el vector de las variables de la red eléctrica. Para estudios de estabilidad de pequeña señal, el comportamiento del *SEP* en torno a un punto de operación puede ser estudiado usando la forma linealizada de las expresiones (1) y (2) que representan al *SEP*:

$$\begin{bmatrix} \frac{dx}{dt} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_1 & \mathbf{J}_2 \\ \mathbf{J}_3 & \mathbf{J}_4 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{V} \end{bmatrix} \quad (3)$$

donde  $\mathbf{J}_1$  hasta  $\mathbf{J}_4$  son las submatrices del *Jacobiano*.

La ecuación (3) representa el sistema de malla abierta del SEP; es decir, aun no fueron incluidos de los RAT y los ESP en cada generador. En la **Figura 3**, es representado el diagrama de bloque del sistema de malla fechada del SEP:



**Figura 3: Modelo de Malla cerrada del SEP.**

donde  $k \in \{1, 2, \dots, m\}$  representa cada condición de operación, y  $i \in \{1, 2, \dots, p\}$  representa cada RAT y ESP a ser optimizado por el procedimiento de ajuste.

### 3. AJUSTE COORDINADO DE LOS RAT Y LOS ESP

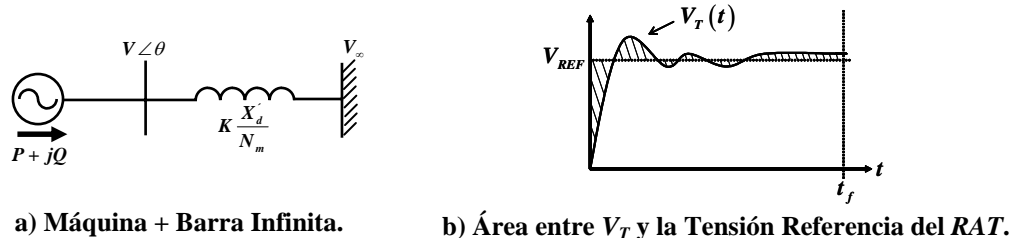
El problema de ajuste coordinado consiste en encontrar un conjunto de parámetros de los controladores tal que optimice los criterios de desempeño del SEP bajo estudio. En el caso de los RAT y los ESP, los criterios son los siguientes [6]:

- Adecuado nivel de tensión terminal, en régimen permanente, de los generadores;
- Adecuado desempeño transitorio en el caso de grandes perturbaciones;
- Adecuado desempeño transitorio en el caso de pequeñas perturbaciones.

Los ESP deberán ser ajustados de tal forma que el SEP en análisis presente un adecuado grado de amortiguamiento frente a pequeñas perturbaciones.

#### 3.1. Ajuste del RAT

El método de ajuste de los RAT, implementado en el presente trabajo, está basado en la respuesta transitoria de la tensión terminal del generador. En este caso, para obtener la respuesta de cada generador, se construye un sistema máquina barra infinita tal como es descrito en la **Figura 4**.



**Figura 4: Método de Ajuste del RAT.**

En la **Figura 4 (a)**, el valor de la reactancia serie del sistema corresponde a la reactancia transitoria de eje derecho del generador, y la misma es multiplicada por un factor constante y dividido por el número de generadores del grupo.

En la **Figura 4 (b)**, se observa el tipo de respuesta que genera cuando se aplica una variación de tensión en escalón en la referencia del RAT, donde  $V_T(t)$  es la tensión terminal del generador en cada instante  $t$  de la simulación. Para el ajuste correspondiente, se calcula el área entre la respuesta transitoria de la tensión terminal y la tensión de referencia del RAT para el tiempo de simulación considerado.

### 3.2. Ajuste del ESP

EL ajuste de los *ESP* está basado en la linealización del modelo de *SEP* descrito en (4). El objetivo es obtener una solución en el cual los coeficientes de amortiguamiento del *SEP* de malla cerrada sean suficientemente altos que asegure un amortiguamiento rápido de las oscilaciones electromecánicas [8].

### 3.3. Formulación del Problema de Ajuste Coordinado

El *Problema de Ajuste Coordinado* de los *RAT* y *ESP* puede ser entendido como un problema de optimización con dos objetivos diferentes y, posiblemente, conflictivos entre si. También, deberán ser considerados en el procedimiento de ajuste las restricciones en los parámetros de los mencionados controladores. Además de las características multi-objetivo, descrita anteriormente, el problema de optimización presenta las siguientes restricciones de desempeño:

- Las funciones objetivos no puede ser escritas explícitamente. Solo pueden ser calculadas a través de la simulación o a través de la evaluación de los autovalores de la matriz de estados que modela al sistema de malla cerrada;
- En la práctica los *SEP* son de grande porte, correspondiendo a matrices de estados de dimensiones muy elevadas.

## 4. AJUSTE COORDINADO DE LOS RAT Y LOS ESP

Fueron desarrollados dos procedimientos para el ajuste coordinado de los parámetros de los *RAT* y de los *ESP* del sistema de excitación de cada generador de un determinado *SEP*. Ambas metodologías están basadas en el *AGMO*. En el presente trabajo, fueron implementados dos tipos de *AGMO*. La diferencia principal entre ellos se encuentra en la diferente metodología utilizada para evaluar el *Fitness* de cada solución.

En cada tipo de *AGMO* implementado, la evaluación del *Fitness* es realizada de la siguiente manera: a) a través de la suma ponderada de las funciones objetivos a ser optimizadas, denominado *AG* basado en la *Suma Ponderada* de los objetivos (*AGSP*); y, b) *AG* basado en la utilización de las reglas de dominancia de *Pareto*, denominado *AGMO Pareto* (*AGMOP*).

### 4.1. Descripción del AGMOP

En este tipo de *AGMO*, se realiza la clasificación de los individuos de la población a través de las reglas de dominancia de *Pareto* [9]:

- $u_j \geq v_j \mid j \in \{1, 2, \dots, nobj\} \mid nobj$ , indica el numero de funciones objetivos considerados;
- $\exists j \mid u_j > v_j$ .

donde  $nobj = 2$  para el presente problema de optimización,  $u$  y  $v$  corresponden, respectivamente, vector de funciones objetivos cuya solución esta siendo analizada y al vector de funciones objetivos representando al resto de las soluciones de la población. De esa forma, la solución asociada al vector  $u$  es comparada con las demás soluciones de la población, representados a través del vector  $v$ . Por lo tanto, las soluciones que son mejores que el resto de la población y que satisfacen las reglas de *Pareto*, constituyen las soluciones *no-dominadas* y su *nivel de dominancia* es cero.

### 4.2. Funciones Objetivos

La función objetivo asociada al desempeño de los *RAT* esta dada por:

$$F_1 = \left\| \left[ \frac{1}{A_1} \quad \frac{1}{A_2} \quad \dots \quad \frac{1}{A_p} \right] \right\|_{\infty} \quad (5)$$

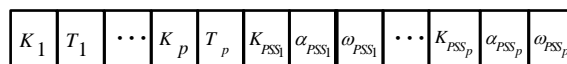
donde  $p$  corresponde al número de máquinas consideradas en el proceso de ajuste, y  $A_i$  es el área asociada a la respuesta de la tensión terminal del generador  $i$  con relación a la tensión de referencia del *RAT*, para el intervalo de simulación considerado.

$$F_2 = \min(\{\zeta_i\}_k) \quad (6)$$

donde  $k \in \{1, 2, \dots, m\}$  |  $m$  se refiere al número de condiciones de operación considerados,  $i \in \{1, 2, \dots, n\}$  |  $n$  corresponde a la dimensión de la matriz de estado de malla cerrada del sistema, y  $\zeta_i$  corresponde al  $i$ -ésimo coeficiente de amortiguamiento calculado, el cual está asociado al  $i$ -ésimo autovalor de la matriz de estado.

### 4.3. Codificación utilizada

Cada solución factible del problema es representado por un vector de números reales, tal como es mostrado en la **Figura 5**:



**Figura 5: Estructura de la solución manipulada por el AG.**

### 4.4. Población Inicial del AG

Para crear la población inicial de  $N$  individuos (soluciones factibles) es creada como sigue: a)

- $N - 1$  individuos son generados aleatoriamente, pero satisfaciendo los límites mínimo y máximo de los parámetros de cada controlados asociado a un determinado generador;
- El individuo restante es determinado utilizando el criterio de *Nyquist* para ajuste de *ESP* [10]. En este procedimiento de ajuste, la ganancia  $K_s$  de cada *ESP* es fijado en 1 pu. Por lo tanto, solo los parámetros  $\alpha$  y  $\omega$  son calculados.

### 4.5. Operadores Probabilísticos del AG

Los operadores genéticos implementados son: *Selección* basado en el *Torneo Estocástico* (4 individuos), *Cruzamiento* de dos puntos de corte, y *Mutación* constante. Las probabilidades de cruzamiento y mutación, consideradas, son respectivamente iguales a 0,8 y 0,03.

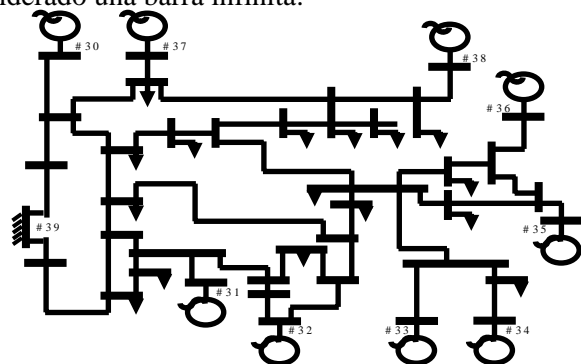
## 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las dos metodologías de ajuste coordinado implementadas fueron aplicadas al sistema New England para validar el procedimiento de ajuste propuesto.

### 5.1. Sistema New England

Los datos del sistema New England provienen de la referencia [11]. El diagrama unifilar del sistema es mostrado en la **Figura 6**. El generador #39 fue considerado una barra infinita.

Puntos de Operación.	
Escenario	Descripción
Caso 1	Caso Base.
Caso 2	10% Carga total adicional.
Caso 3	10% Decremento Carga total



**Figura 6: Sistema New England.**

En la **Figura 7** se indica también las condiciones de operación consideradas para el ajuste coordinado. El AG debe generar soluciones en las que los parámetros deberán respetar los siguientes límites:

**Tabla 1- Parámetros de la malla cerrada del RAT.**

Generator	$K_F$	$T_F$
30	0,0400	1,00
31	0,0570	0,50
32	0,0800	1,00
33	0,0800	1,00
34	0,0300	1,00
35	0,0754	1,24
36	0,0300	1,00
37	0,0845	1,26
38	0,0300	1,00

$$30 \leq K_A \leq 400 \text{ pu}$$

$$0,01 \leq T_A \leq 1,00 \text{ s}$$

$$1 \leq K_s \leq 20 \text{ pu}$$

$$0,1 \leq \alpha \leq 10$$

$$2\pi \cdot 0,2 \leq \omega \leq 2\pi \cdot 8 \text{ rad/s}$$

## 5.2. Resultados Numéricos

Para todos los casos, fue considerada una población de 120 individuos ( $N = 120$ ), y algoritmo termina la ejecución cuando se completan 100 iteraciones. En la **Tabla 2** de resultados,  $W_1$  y  $W_2$  corresponden, respectivamente, a los pesos asociados a los objetivos  $F_1$  y  $F_2$ . El símbolo  $\zeta_{\min}(\%)$  es el mínimo coeficiente de amortiguamiento obtenido, y  $A_I$  es el área de la respuesta transitoria de la tensión terminal del generador.

En el caso del AG *Multi-Objetivo* basado en las reglas de dominancia de *Pareto* (AGMOP) se obtiene en cada ejecución una familia de soluciones óptimas. De esa manera, para dos ejecuciones del algoritmo fueron obtenidas las siguientes *Frentes de Pareto* (FP), presentadas en las **Tablas 3 y 4**.

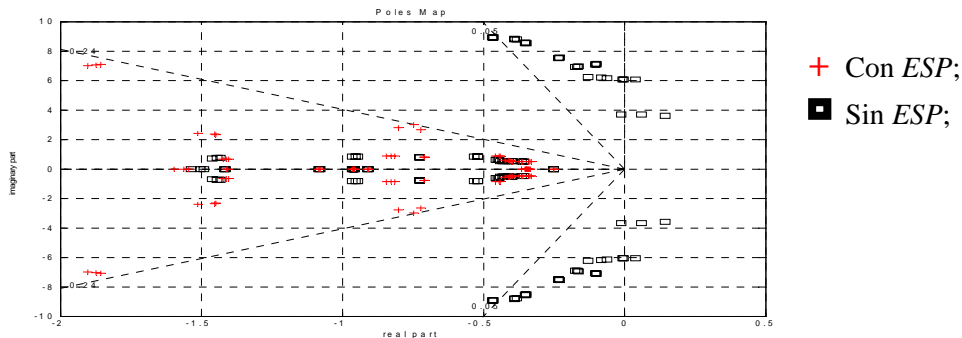
**Tabla 2- AGSP y Fitness =  $W_1 \times F_1 + W_2 \times F_2$ .**

Run	$W_1$	$W_2$	$\zeta_{\min}(\%)$	$A_I$
1	1,0	1,0	23,3440	0,09620
2	1,4	0,6	18,3420	0,08860
3	1,8	0,2	24,0825	0,09117
4	0,2	1,8	24,0825	0,09117
5	0,6	1,4	23,3440	0,09630

**Tabla 3. FP para ejecución 1. Tabla 4. FP para ejecución 2.**

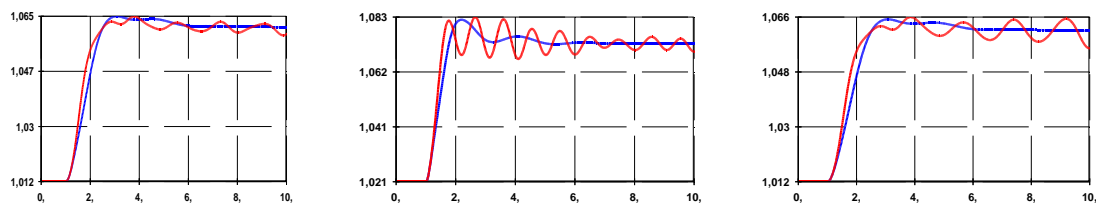
$A_I$	$\zeta_{\min}(\%)$
0,09117	24,0825
0,09021	23,0589
0,09117	24,0825

$A_I$	$\zeta_{\min}(\%)$
0,0896	24,1843
0,0906	24,1579
0,0898	24,1488



**Figura 7: Mapa de Polos antes y después del Ajuste Coordinado.**

La **Figura 8 (a, b y c)** muestra los resultados de las tensiones terminales de determinados generadores, cuando se aplica una variación en escalón del 5% de la tensión de referencia del RAT correspondiente.



**a) Generador 34 – Base Case. b) Generador 38 – Escenario 1. c) Generador 34 – Escenario 2.**

**Figura 8: Simulación de variación del 5% de la tensión de referencia del RAT.**

El tiempo de computación asociada a la duración de la ejecución del *AGSP* y del *AGMOP* es, en promedio, iguales a 7,75 h y 8,21 h, respectivamente, en un computador personal tipo PENTIUM 4, 500 MB de RAM, y con 2,5 GHz de velocidad de procesamiento. La tensión terminal de los generadores sin *ESP* se presenta muy oscilatoria durante la simulación, e inclusive en una determinada condición de operación la amplitud de oscilación crece, confirmando una inestabilidad en el sistema. Sin embargo, cuando los *ESP* son incluidos y ajustados el comportamiento oscilatorio de la tensión amortigua rápidamente.

## CONCLUSIONES

Fue descrita la metodología para ajuste coordinado de los *RAT* y *ESP* utilizando los *AGMO*. Los resultados obtenidos para un *SEP* de medio porte indican que la metodología es capaz de encontrar soluciones que satisfacen los criterios de diseño de los controladores. El tiempo requerido es relativamente alto para sistemas de mayor porte.

El *AGMOP* tiene la ventaja adicional de producir un conjunto de soluciones óptimas al final del proceso de optimización. De esa manera, los proyectistas y/o especialistas pueden escoger cualquiera de las soluciones usando su experiencia o considerando algún otro criterio de parada. Una mejor definición de las funciones objetivos, así como también, la utilización de la computación de alto desempeño constituyen los posibles trabajos futuros que se tiene planeado realizar.

## Referencias Bibliograficas

- [1] F.L. Tito, G.N. Taranto, and D.M. Falcão, “Integrated Tuning of Generator Excitation Systems by a MultiObjective Genetic Algorithm”, Proceedings of the (*ISAP*), pp. 140-144, RJ, April 1999.
- [2] K. T. Law, D. J. Hill and N. R. Godfrey, “Robust Coordinated AVR-PSS Design”, *IEEE Transactions on Power System*, Vol. 9, No. 3, pp. 1218-1225, August 1994.
- [3] A. Heniche, H. Bourlès and M.P. Houry, “A Desensitized Controller for Voltage Regulation of Power Systems”, *IEEE, Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 3, pp. 1461-1466.
- [4] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [5] D.M. Falcão and G.N. Taranto, “Placement and Coordinated Tuning of Control Devices for Capacity and Security Enhancement Using Metaheuristics”, in *Applied Mathematics for Restructured Electric Power Systems: Optimization, Control, and Computational Intelligence*, J.H. Chow, F.F. Wu, and J.A. Momoh, Eds., Springer, New York, 2004.
- [6] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, Mc.Graw-Hill, 1993.
- [7] IEEE Tutorial Course, *Power System Stabilization via Excitation Control*, 81 EHO 175-0 PWR, 1980.
- [8] A.L.B. do Bomfim, G.N. Taranto, and D.M. Falcão, “Simultaneous Tuning of Power System Damping Controllers Using Genetic Algorithms”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 15, no. 1, pp. 163-169, February 2000.
- [9] E. Zitzler, L. Thiele, “Multiobjective Evolutionary Algorithms: A comparative Case Study and the Strength Pareto Approach”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. Vol. 3, N° 4, pp. 257 – 271, November 1999.
- [10] N. Martins and L. T. G. Lima, “Eigenvalue and Frequency Domain Analysis of Small–Signal Electromechanical Stability Problems”. *IEEE Symposium on Application of Eigenanalysis and Frequency Domain Methods for System Dynamic Performance*, pp. 17 – 33, 1989.
- [11] R. T. Byerly, D. E. Sherman, and R. J. Berrinson, “Frequency Domain Analysis of Low frequency oscillations in Large Electric Power Systems”. *Report EPRI EL – 726*, 1978.