

GAT-024

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO IV
ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA (GAT)

PROJETO DE ESTABILIZADORES ROBUSTOS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA VIA ALGORITMOS GENÉTICOS EM AMBIENTE COMPUTACIONAL PARALELO

Antonio R. Sertich Koehler *
Itaipu Binacional
Antônio J. A. Simões Costa
UFSC

Jorge Mário Campagnolo
UFSC
Jacqueline Gisele Rolim
UFSC

RESUMO

Este artigo apresenta um método para a obtenção de ajustes robustos de estabilizadores de sistemas de potência, usando algoritmos genéticos e cálculo de autovalores, em ambiente computacional paralelo. O problema do ajuste dos parâmetros dos estabilizadores é convertido em um problema de otimização, que é resolvido com o auxílio de dois tipos de algoritmos genéticos, os quais empregam uma função aptidão baseada nos autovalores do sistema.

PALAVRAS-CHAVE

Processamento paralelo - algoritmos genéticos-
controladores robustos - cálculo de autovalores

1.0 INTRODUÇÃO

O uso de reguladores de tensão estáticos e rápidos, ajustados com altos ganhos, é um método efetivo para melhorar o torque sincronizante e portanto melhorar a estabilidade angular do sistema de potência. No entanto, o mesmo regulador de tensão pode, sob certas condições, destruir o amortecimento do sistema, causando instabilidade oscilatória. Um dos melhores meios para melhorar o amortecimento do sistema [1] é o uso de estabilizadores de sistemas de potência (ESP) associados com os reguladores de tensão. Este artigo mostra o uso de Algoritmos Genéticos (AGs) com função de aptidão baseada em autovalores (espectro total e autovalores dominantes), de forma a encontrar um conjunto ótimo de parâmetros dos estabilizadores de sistemas de potência que garantam um bom desempenho dinâmico do sistema. A robustez dos ESPs é obtida ao assegurar que o sistema tenha um

desempenho dinâmico adequado para diversas condições operativas.

AGs são uma poderosa ferramenta que tem como meta otimizar qualquer tipo de função objetivo, usando técnicas de busca aleatória intensiva, independente de peculiaridades tais como diferenciabilidade, convexidade ou linearidade da função [2]. O emprego de AGs para a obtenção de ajustes de controladores robustos já foi proposto por outros pesquisadores, como por exemplo em [3] e [4]. Entretanto o AG é um tipo de aplicação que requer um grande esforço computacional. Neste trabalho, o problema de encontrar um ajuste ótimo dos estabilizadores utilizando essa ferramenta foi adaptado para ser processado em um ambiente computacional paralelo, de forma a reduzir o tempo de processamento. Foram utilizados dois tipos diferentes de AGs, em duas etapas consecutivas de otimização, sendo o primeiro deles o assim denominado Micro Algoritmo Genético [5] e o segundo deles o Algoritmo Genético Convencional.

2.0 MODELAGEM DO SISTEMA DE POTÊNCIA

O sistema elétrico de potência, incluindo a dinâmica dos geradores e reguladores de tensão, usa o já conhecido modelo linearizado do sistema, representado pelas equações no espaço de estados, para cada ponto de operação p , conforme mostrado:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t)$$

onde o vetor x contém as variáveis de estado do sistema, tais como velocidade da máquina, ângulo e tensões internas da máquina.

* Av. Tancredo Neves, 6731 - Foz do Iguaçu – PR – CEP: 85856-970
Fone: (045) 5203659 / fax: (045) 5203238 / e-mail: sertich@itaipu.gov.py

Por outro lado, neste artigo adotou-se um ESP com estrutura convencional, amplamente utilizada: um ganho e dois estágios de avanço-atraso de fase. Filtros de modos torsionais e “Wash-Out” foram omitidos. A função de transferência do ESP é mostrada a seguir:

$$G(s)_{ESP} = \frac{Y_c(s)}{X_c(s)} = K_c \frac{(1+sT_1)(1+sT_3)}{(1+sT_2)(1+sT_4)} \quad (2)$$

Os estabilizadores de sistemas de potência também podem ser representados sob a forma de equações de estado, conforme abaixo:

$$\dot{x}_c = A_c x_c + B_c u_c \quad (3)$$

$$y_c = C_c x_c + D_c u_c$$

onde,

$$A_c = \begin{bmatrix} 0 & -\alpha_0 \\ 1 & -\alpha_1 \end{bmatrix} \quad B_c = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$C_c = [0 \quad 1] \quad D_c = [d]$$

Os parâmetros α_0 e α_1 são funções de T_2 e T_4 (que são fixados em valores tradicionais), enquanto β_0 e β_1 dependem exclusivamente dos parâmetros desconhecidos K_c , T_1 e T_3 .

Se combinarmos os conjuntos de equações de estado (1) e (3), e fizermos a saída do sistema de potência igual à entrada dos ESPs e a saída dos EPSs igual à entrada do sistema de potência, obteremos a matriz de estados aumentada de malha fechada:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + B D_c C & B C_c \\ B_c C & A_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ x_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

3.0 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Baseado nos autovalores do sistema aumentado, podemos inferir a estabilidade dinâmica para qualquer ponto de equilíbrio p do sistema de potência. Associada a cada um dos autovalores do sistema podemos computar então a razão de amortecimento ζ de qualquer modo de oscilação. No entanto a matriz aumentada do sistema é fortemente influenciada pelos parâmetros dos controladores, conforme pode ser observado em (5). Assim, o problema consiste em determinar ajustes para os parâmetros desconhecidos dos estabilizadores, de forma a que os autovalores da matriz aumentada de sistema possuam uma razão de amortecimento máxima.

Considerando isto, podemos formular o problema com o objetivo de encontrar os parâmetros dos estabilizadores que maximizem o amortecimento ζ mínimo associado aos autovalores de cada uma das matrizes aumentadas do sistema, correspondentes a cada um dos pontos operativos p . Matematicamente o problema pode ser expressado da seguinte forma:

$$\max_{\rho} \{ \min(\zeta_{i,k}) \}, \quad i = 1, 2, \dots, na; k = 1, 2, \dots, p$$

s.a.

$$K_{l_{\min}} \leq K_l \leq K_{l_{\max}} \quad (6)$$

$$T_{1l_{\min}} \leq T_{1l} \leq T_{1l_{\max}}$$

$$T_{3l_{\min}} \leq T_{3l} \leq T_{3l_{\max}}$$

onde o conjunto de restrições refere-se aos limites mínimos e máximos impostos aos ganhos K_l dos ESPs, para os ng geradores com este tipo de equipamento e aos limites mínimos e máximos impostos aos zeros T_{1l}/T_{3l} dos pares de avanço-atraso de fase dos estabilizadores. Os índices subscritos i e k dos autovalores denotam respectivamente o i -ésimo autovalor do k -ésimo ponto de operação do sistema, e na é a dimensão da matriz aumentada do sistema. O índice subscrito l denota uma máquina específica do sistema. O problema formulado é então do tipo max (min) e a função objetivo denota um problema de otimização não trivial ou não analítico, cujo valor depende do cálculo de uma série de autovalores de matrizes de grandes dimensões e até esparsas.

4.0 ALGORITMOS GENÉTICOS

Algoritmos Genéticos (AGs) são métodos adaptativos que podem ser usados para resolver problemas de busca global e de otimização. Eles estão baseados nos processos genéticos dos organismos biológicos. Através das gerações no tempo, populações evoluíam de acordo com o princípio da seleção natural e da sobrevivência do indivíduo mais apto, de acordo com Charles Darwin, em seu livro *A Origem das Espécies*. Ao imitar este processo os AGs são capazes de fazerem evoluir soluções para problemas da vida real. Eles trabalham com uma população de indivíduos, cada qual representando uma possível solução para um determinado problema. A cada indivíduo é atribuído um valor numérico de aptidão em função de quão efetivo ele realmente seja para a solução do problema. Aos indivíduos de maior aptidão é atribuída uma maior oportunidade de cruzamento com outros indivíduos na população.

A codificação dos parâmetros (modelagem do problema) envolvidos na solução do problema é o primeiro passo antes de executar qualquer programa de AGs. Para isso considera-se que uma solução potencial para o problema pode ser representada por um conjunto de parâmetros. Estes parâmetros, conhecidos por genes, são justapostos para formar uma cadeia de dígitos, referidos pelo nome de cromossomo.

5.0 METODOLOGIA UTILIZADA

5.1 Cálculo de autovalores

A função aptidão usou uma função objetivo baseada no cálculo dos autovalores. Foram empregadas dois tipos de rotinas para cálculo de autovalores: as rotinas QR (espectro total) e o assim chamado método das iterações simultâneas ("Lop-Sided Iteration") [6], o qual é uma extensão do método das potências aplicado juntamente com a técnica de iteração inversa. Este tipo de rotina foi utilizado para o cálculo de autovalores dominantes do sistema, seja usando a formulação implícita ou explícita da matriz de estados.

5.2 Função de aptidão

A função de aptidão escolhida, está baseada na análise dos autovalores da matriz aumentada de malha fechada. Após o cálculo dos autovalores da matriz de estados, na sua forma explícita ou implícita através da matriz Jacobiano, são calculados os amortecimentos associados a cada autovalor e detectado qual o menor amortecimento existente, atribuindo-se um valor de aptidão ao indivíduo conforme segue:

$$Aptidão = \begin{cases} 0.0, se & \zeta_{\min} < -15\% \\ 0.2, se & -15\% \leq \zeta_{\min} < -5\% \\ 0.5, se & -5\% \leq \zeta_{\min} < 0\% \\ 1.0, se & 0\% \leq \zeta_{\min} < 2\% \\ 2.0, se & 2\% \leq \zeta_{\min} < 4\% \\ . \\ . \\ 20.0, se & 20\% \leq \zeta_{\min} < 22\% \\ 22.0, se & \zeta_{\min} \geq 22\% \end{cases}$$

Na maior parte dos casos, o valor da aptidão é o próprio valor do amortecimento mínimo encontrado, expressado em %. A parte inicial da função aptidão destina-se aos amortecimentos mínimos encontrados, que apesar de representarem modos instáveis ($\zeta < 0\%$), orientam o AG no início do processamento a aumentar progressivamente o amortecimento mínimo. Este tipo de função aptidão é uma modificação da função aptidão que já fora utilizada em [3], com bons resultados. A diferença está no valor da aptidão, que no caso deste trabalho é o próprio amortecimento mínimo encontrado.

5.3 Codificação dos parâmetros

A técnica usada é a codificação binária dos parâmetros concatenados, onde cada um dos parâmetros dos estabilizadores, após transformados em números binários, são justapostos, formando um cromossomo. Foi utilizado um número de bits igual a 10. Isto significa que, para cada um dos parâmetros existem $2^{10} = 1024$ valores diferentes. Seja ρ o

conjunto de parâmetros ajustáveis dos ESP's, formados pelos valores de K_c (ganhos), T_1 e T_3 (que definem os zeros). Então, se por questões de simplificação supusermos que T_1 e T_3 são iguais, teremos que o cromossomo final codificado fica com uma extensão igual a $(n^\circ \text{ bits}) \times n_g \times n_v$, onde n_g é o número de geradores com ESP's, e n_v é o número de parâmetros buscados de cada ESP. O cromossomo então é formado pela seqüência justaposta dos códigos binários dos parâmetros de cada estabilizador do sistema elétrico, ou seja, $K_1, T_1, K_2, T_2, \dots, K_{n_g}, T_{n_g}$.

5.4 Limitação e inicialização dos parâmetros

O passo seguinte é definir os valores limites de cada um dos parâmetros a serem otimizados. Os valores iniciais que limitaram o espaço de busca na primeira etapa de otimização são os seguintes:

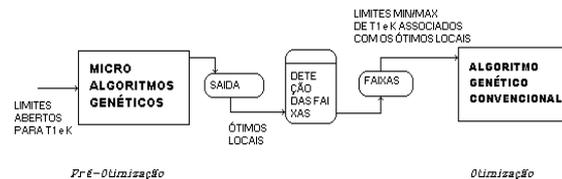
Tabela 1 - Limites Iniciais dos Parâmetros

	Zeros T_1		Ganhos K	
	Mín	Máx	Mín	Máx
ESP velocidade	0,15	1,50	1,0	80,0
ESP pot. Elétrica	0,01	0,28	-1,0	-40,0

Estes valores, do ponto de vista dos sistemas testados e até de valores praticados na indústria, podem ser considerados bastante abertos.

Neste ponto, entra uma parte importante da metodologia usada, qual seja a de otimização em duas etapas consecutivas, através do uso de dois tipos diferentes de AGs, conforme mostrado na Figura 1:

Figura 1 – Otimização em duas etapas



Partiu-se do princípio que os limites iniciais dos parâmetros a serem otimizados via AG eram desconhecidos e usou-se, numa primeira etapa denominada de *pré-otimização*, o micro-algoritmo genético com limites dos parâmetros abertos em relação aos valores típicos usados na indústria de energia elétrica. Logo após, tomaram-se os resultados obtidos com o micro-algoritmo genético, realizando-se uma análise somente dos ótimos locais, onde se detectou entre quais valores máximos e mínimos variavam os parâmetros a serem otimizados pelo algoritmo genético convencional. Admitiu-se então a premissa de que os parâmetros associados com o ótimo global se situavam dentro da faixa estabelecida pelos ótimos locais, reduzindo-se assim o espaço de busca do AG na segunda etapa de otimização.

5.5 Paralelização do algoritmo

Para assegurar a robustez do controle, é necessário que cada indivíduo da população seja testado para todos os pontos p de operação existentes, e para cada ponto de operação há uma matriz associada. Assim, o tipo de processamento que ocorre para cada ponto de operação é exatamente igual e isto conduz à utilização do *paralelismo de dados* dentro dos paradigmas da computação paralela, sendo este o tipo de paralelismo que foi adotado no caso deste artigo. Ou seja, utiliza-se o mesmo programa em cada processador escravo, com dados diferentes e totalmente independentes entre si, pois a matriz aumentada correspondente a um ponto de operação não depende da matriz associada aos outros pontos. Desta forma, obteve-se uma *granularidade grossa* para o algoritmo, e ao final de cada processamento somente os autovalores associados a cada ponto p de operação são devolvidos ao processador mestre. O algoritmo foi paralelizado utilizando-se as bibliotecas do PVM (*Parallel Virtual Machine*), Fortran 77, com um processador mestre e no máximo 10 processadores escravos. A figura a seguir mostra a paralelização do AG em forma simplificada.

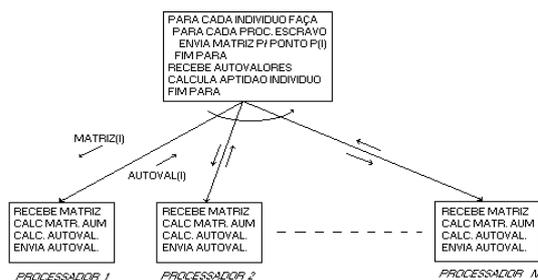


Figura 2 – Paralelização do Algoritmo

5.5 Desenvolvimento do trabalho

O projeto de estabilizadores robustos via AGs em ambiente computacional paralelo foi dividido em três etapas: a) Obtenção das matrizes de estado e/ou Jacobiano de malha aberta via programa PACDYN; b) Otimização dos ajustes dos ESP's via AGs, em dois estágios consecutivos de otimização e c) Verificação dos resultados obtidos através de simulações não lineares via programa ANATEM e através da análise do espectro total via PACDYN.

6.0 RESULTADOS OBTIDOS

6.1 Sistema-teste

O sistema utilizado para teste é o sistema de New England, composto por 10 máquinas e 39 barras. A máquina da barra 39 foi tomada como referência e as demais máquinas foram representadas por um modelo de quarta ordem. Os reguladores de tensão foram representados por um modelo de primeira ordem, com

um ganho de 200 e uma constante de tempo de 0,01s. Note-se que foi adotada esta modelagem com ganhos altos e pequena constante de tempo, ao invés dos reguladores originais de tensão de New England, para exacerbar a instabilidade do sistema a pequenos sinais. Para o projeto robusto dos estabilizadores, foram considerados 10 pontos de operação diferentes, com variação da carga nas barras e da topologia da rede. A Tabela 2 mostra os pontos de operação e também os autovalores dominantes do sistema em malha aberta. Observar-se que o sistema é instável a pequenos sinais para todos os pontos de operação.

Tabela 2 -Autovalores em Malha Aberta/New England

Pto. Oper.	Carga (MW)	Topologia	Autovalores M.A.	ζ (%)
1	6150	Completa	0.38 +/- j7.72	-4.9
2	6150	Des.LT 21-22	0.34 +/- j7.66	-4.4
3	6150	Des.LT 9-39	0.38 +/- j7.72	-4.9
4	6150	Des. 2 LTs	0.33 +/- j7.65	-4.3
5	7072	Completa	0.53 +/- j7.81	-6.8
6	7072	Des.LT 9-39	0.52 +/- j7.82	-6.7
7	7072	Des.LT 21-22	0.51 +/- j7.71	-6.6
8	4612	Completa	0.15 +/- j7.55	-1.9
9	4612	Des.LT 21-22	0.13 +/- j7.53	-1.7
10	4612	Des.LT 9-39	0.14 +/- j7.55	-1.9

Foi suposto que à exceção da máquina usada como referência do sistema, todas as demais máquinas do sistema de New England seriam dotadas de ESP's.

O critério de parada adotado para o AG foi o de número máximo de gerações (tipicamente 50) e a população típica usada também é de 50 indivíduos. Em se tratando de controle robusto, onde o ajuste deve ser testado para cada um dos 10 pontos de operação, e cada indivíduo da população representa um possível conjunto de ajustes dos ESP's, isto implica em que o esforço computacional é de 50 gerações x 50 indivíduos x 10 pontos de operação, ou seja, 25.000 cálculos de autovalores para cada faixa de frequência de interesse.

6.2 ESP derivado da velocidade e função aptidão via espectro total

Os resultados da primeira etapa de otimização, através dos micro-algoritmos genéticos, usando os limites de parâmetros da Tabela 1, foram os seguintes:

Aptidão Máxima (ζ em %)	Ganho K Máximo	Ganho K Mínimo	Cte. de Tempo Máx. (s)	Cte. De Tempo Min. (s)
6.0	34.2	2.08	1.19	0.18

O tempo total de CPU foi de 221 minutos, a probabilidade de cruzamento de 0.5 e o tamanho da micro-população de apenas 10 indivíduos.

Na etapa de otimização foram usados como limites dos parâmetros os valores acima apresentados e a tabela a seguir mostra dois grupos de casos:

Tabela 3- Etapa de Otimização: AG Convencional

C A S O	Popu- lação/ N° Max. Gerações	Probab. Cruzam./ Mutaçao	Tempo de CPU (hrs)			
			N° de Processadores			
			1	2	5	10
1	50 / 50	0.5/0.01	16.1	9.3	4.8	4.2
2	50 / 50	0.6/0.01	15.9	8.9	4.2	4.1

*- IBM Risc System/6000

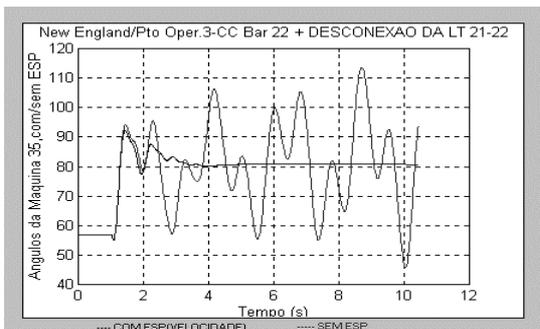
Em ambos os grupos de casos, a aptidão máxima obtida foi de 20 % e a aptidão média máxima de uma geração de 15%. A Tabela 4 mostra exemplos de ajustes obtidos, associados a indivíduos que apresentaram aptidão máxima:

Tabela 4 - Exemplo de Ajuste Obtido/ESP Veloc.

Máquina (ESP)de New England	Ganho K	Cte. de Tempo T1= T3 (s)
30	6.16	0.68
31	14.89	0.38
32	9.41	0.50
33	2.44	0.25
34	14.83	0.27
35	11.70	0.23
36	13.64	0.27
37	7.85	0.27
38	5.60	0.39

*- Pólos do Esp foram fixados em 0.15 s

A figura a seguir mostra o resultado de simulações realizadas com o ANATEM, para indivíduos com aptidão máxima. Foi considerada uma perturbação tipo curto-circuito sólido na barra 22, com posterior remoção da linha 21-22 após 0.05 s. Observa-se o excelente desempenho dinâmico, com rápido



amortecimento das oscilações.

Figura 3 -Simulação da atuação dos ESPs velocidade

Observa-se no gráfico a seguir, os “speed-ups” obtidos e constata-se que a partir de 5 processadores em paralelo, a eficiência cai bastante.

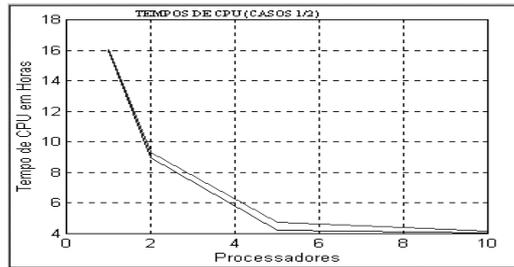


Figura 4 –“Speed-ups” – Espectro Total

6.3 ESP derivado da potência elétrica e função aptidão via autovalores dominantes

Os resultados da primeira etapa de otimização, através dos micro-algoritmos genéticos, usando os limites de parâmetros da Tabela 1, foram os seguintes:

Aptidão Máxima (ζ em %)	Ganho K Máximo	Ganho K Mínimo	Cte. de Tempo Máx. (s)	Cte. de Tempo Min. (s)
6.0	-12.0	-1.20	0.23	0.03

O tempo de CPU foi de 230 minutos e os ajustes do micro algoritmo genético iguais ao caso anterior.

Para a etapa de otimização, o AG trabalhou com função objetivo baseada em autovalores dominantes. Foi necessário incorporar na função objetivo não só as faixas de frequência das oscilações eletromecânicas, mas também as faixas de frequência relativas aos modos da excitatriz, visando obter um ajuste que deixe o sistema realmente estável. Assim a rotina *Lopsided* associada à função aptidão foi adaptada para calcular o seguinte conjunto de autovalores:

$$\Omega = \{n - 1(\lambda_i - \mu I), \mu \approx 1 Hz \cup p(\lambda_i - \kappa I), \kappa = 10 \dots 40 Hz\}$$

onde:

μ e κ são os deslocamentos complexos de frequência ao redor dos quais se calcularam os autovalores dominantes, n é o número de máquinas no sistema, e p é o número de autovalores dominantes ao redor das faixas de frequências onde aparecem os modos da excitatriz. O valor usado para p foi igual a três. Esta função objetivo representa uma solução de compromisso entre obter ajustes que assegurem sistemas estáveis sem comprometer o tempo computacional exigido.

Na etapa de otimização foram usados como limites dos parâmetros os valores máximos e mínimos obtidos na etapa de pré-otimização. A Tabela 5 mostra dois grupos de casos, variando-se o número de processadores:

Tabela 5- Etapa de Otimização: AG Convencional

C A S O	Popu- lação/ N° Max. Gerações	Probab. Cruzam./ Mutaçao	Tempo de CPU (hrs)*			
			N° de Processadores			
			1	2	5	10
3	50 / 50	0.5/0.01	15.0	8.8	4.5	3.8
4	50 / 50	0.6/0.01	16.3	9.8	4.9	4.2

Em ambos os grupos de casos, a aptidão máxima de um indivíduo foi de 20 % e a aptidão média máxima de uma geração situou-se ao redor de 15%. A Tabela 6 mostra exemplos de ajustes obtidos para os ESPs das máquinas, associados a indivíduos que possuem aptidão máxima:

Tabela 6-Exemplo de Ajuste Obtido/ESP Pot. Elétrica

Máquina (ESP) de New England	Ganho K	Cte. de Tempo T1 (s)
30	-2.11	0.03
31	-1.87	0.05
32	-7.41	0.04
33	-7.87	0.19
34	-1.20	0.04
35	-1.28	0.05
36	-2.31	0.12
37	-10.24	0.19
38	-5.94	0.03

*- Pólos do Esp foram fixados em 0.28 s

Como a função aptidão considerou apenas os autovalores dominantes, com auxílio do PACDYN e utilizando os ajustes da Tabela 6 foram calculados todos os autovalores do sistema para todos os pontos de operação. Constatou-se que, para valores de frequência até 40 Hz, os amortecimentos calculados com o PACDYN coincidiram com os obtidos via AG, porém surgiram autovalores com amortecimento de apenas 10% na faixa de frequência de 70 Hz. A Figura 5 mostra o resultado de simulações com o ANATEM, usando ajustes de indivíduos com aptidão máxima. A mesma perturbação anterior foi considerada.

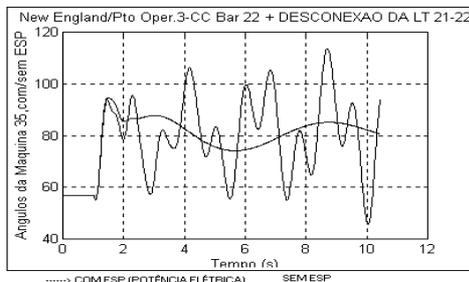


Figura 5 - Simulação da atuação dos ESPs Pot. Elétr.

Observa-se na Figura 6, os “speed-ups” obtidos e também constata-se que a partir de 5 processadores em paralelo, a eficiência cai bastante.

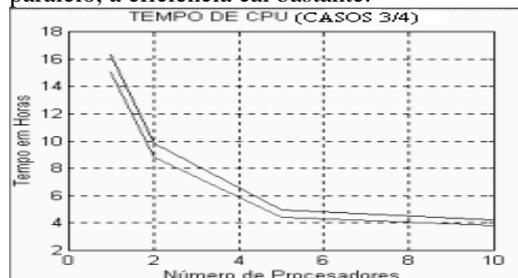


Figura 6 – “Speed-ups” – Autovalores Dominantes

7.0 CONCLUSÕES

A combinação de dois tipos diferentes de algoritmos genéticos, um de pré-otimização e outro de otimização final, permitiu obter ajustes dos estabilizadores que conferem ao sistema elétrico ótimos amortecimentos, pois partiu-se de uma população inicial de indivíduos com aptidão média de 0% (sistema instável) e chegou-se numa população final onde os melhores indivíduos alcançaram a aptidão de 20% (20% de amortecimento mínimo das oscilações).

A utilização de funções de aptidão baseadas em cálculo de autovalores dominantes mostrou-se eficaz para reduzir de 22 a 30% o esforço computacional e uma alternativa válida às funções de aptidão baseadas no espectro total de autovalores. Porém neste caso é necessário que sejam incorporadas na função objetivo, as frequências relativas aos modos da excitatriz.

A utilização da computação paralela mostrou-se decisiva na obtenção dos resultados em um tempo relativamente baixo, considerando a extensão do cromossomo utilizado, o número de gerações do AG e o número de pontos de operação considerados.

8.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] LARSEN, E. ; SWANN, D. A. Applying Power System Stabilizers: *Electrical Power Inputs*. Design and Field Experience. *IEEE Trans. on PAS*, v. PAS-100, n. 6, June 1981.
- [2] GOLDBERG, David E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Ed. Addison-Wesley, 1989.
- [3] TARANTO, G. N.; DO BOMFIM, A. L. B.; FALCÃO, D. M.; MARTINS, N.; GOMES JR., S.; QUINTÃO, P. E. Combined use of Analytic and Genetic Algorithms for Robust Coordinated Tuning of Power System Damping Controllers. *Bulk Power System Dynamics And Control IV Proceedings*, Santorini, Greece. August 1998.
- [4] FREITAS, F. D.; SIMÕES COSTA, A. J. A.; SILVA, A. S.; ROLIM, J. G. Robust Design of Controllers for Multimachine Systems Based on Genetic Algorithms. *VI SEPOPE Proceedings*, Salvador, Brasil, May 1998.
- [5] CARROL, David L. Genetic Algorithms and Optimizing Chemical Oxygen-Iodine Lasers. *Developments in Theoretical and Applied Mechanics*, v. XVIII., *The University of Alabama*, 1996, p. 411/6
- [6] JENNINGS, A.; STEWART, W. J. Simultaneous Iteration for Partial Eigensolution of Real Matrices. *J. Inst. Maths. Applics.*, n. 15, 1975, p. 351-361.