

# DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS ÓTIMOS DE UM CONTROLADOR PID APLICADO NA REGULAÇÃO DE TENSÃO DE GERADORES SÍNCRONOS ATRAVÉS DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS – PSO

MARCELO FALCUCCI

*Central Geradora Termelétrica Fortaleza, Endesa  
Caixa Postal 117 – CEP 61.600-000 – Caucaia-CE  
E-mail: mfalcucci@endesabr.com.br*

JOSÉ N. R. SILVA JÚNIOR, ARTHUR P. S. BRAGA, JOSÉ A. NASCIMENTO

*Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará  
Campus do Pici, Caixa Postal 6001 – CEP 60.455-760 – Fortaleza-CE  
E-mails: nilorjunior@yahoo.com.br, arthurp@dee.ufc.br, almeida@dee.ufc.br*

**Abstract**— This paper has as proposal to study the application of intelligent methods in the tuning of PID controllers used in the control of synchronous generator terminal voltage. The generator representation was as a third order system connected to infinite busbar. Firstly, it is introduced the several components of the system and the optimization method chosen, the Particle Swarm Optimization – (PSO). The PID structure used is the classical closed loop model. The performance and efficacy of the algorithm is verified based on the unitary step answer and its characteristics. Several configurations and adjusts were tested in order to find out standard behaviors of the variables and its influence in the algorithm performance.

**Keywords**— Algorithm, PID, PSO, Intelligent Methods, Optimization, Automatic Voltage Regulator

**Resumo**— Este trabalho tem como propósito o estudo da aplicação de métodos inteligentes na sintonia de controladores tipo PID utilizados no controle da tensão terminal de um gerador síncrono. Como planta, foi utilizado o modelo linearizado de 3ª ordem de um gerador síncrono ligado à barra infinita. Inicialmente, faz-se um breve estudo da configuração do sistema e do método inteligente para otimização deste, no caso em estudo, Otimização por Enxames de Partículas (PSO). Como estrutura do PID, é utilizado o modelo clássico com realimentação (malha fechada). A eficácia do algoritmo é analisada através da resposta ao degrau e a análise de suas características. Várias configurações das constantes além dos limites do algoritmo são testados a fim de se tentar definir padrões de comportamento das mesmas e sua influência no desempenho do algoritmo.

**Palavras-chave**— Algoritmo, PID, PSO, Métodos Inteligentes, Otimização, Regulador Automático de Tensão.

## 1 Introdução

Controladores Proporcional-Integrador-Derivativo (PID) (Åström, 1995) são os mais comuns entre os métodos de controle de processos, e por esta razão são largamente encontrados na indústria. Suas vantagens são, entre outras, a facilidade de implementação, diversidade de topologias, estrutura simples etc. Entretanto, problemas de sintonia são frequentemente encontrados devido às características das plantas onde são aplicados, tais como não-linearidades, atrasos de transporte, ordem do sistema etc. (Gaing, 2004).

Durante as últimas décadas, pesquisadores têm feito esforços para desenvolver métodos de sintonia de PIDs que permitissem a estes controladores atingir seu melhor desempenho nas aplicações onde fossem utilizados. Entre as diversas técnicas convencionais utilizadas na sintonia estão o método clássico de Ziegler-Nichols e suas modificações (Åström, 1995).

Atualmente, uma nova perspectiva tem surgido com o uso de técnicas de Inteligência Computacional (I.C.) na implementação de controladores, entre elas, redes neurais, lógica fuzzy etc. (Visioli, 2001). Além destas técnicas, algoritmos de otimização também tem ganhado espaço nas publicações mais recentes.

Sintonia de controladores PID baseados em Algoritmos Genéticos – GA (*Genetics Algorithms*) (Krohling, 2001), Recozimento Simulado – SA (*Simulated Annealing*) e Otimização por Enxame de Partículas – PSO (*Particle Swarm Optimization*) têm trazido bons resultados, por possuírem as vantagens de serem facilmente implementados em computadores, se adaptarem a diferentes tipos de plantas e com alta eficiência (Gaing, 2004).

A decisão sobre qual método de otimização deve ser utilizado passa pela análise da capacidade de processamento, características específicas da planta e eficiência desejada. Neste artigo será estudado e implementado o método PSO, além de ser analisada sua eficiência na determinação dos parâmetros ótimos do controlador PID para controle da tensão de saída de um gerador síncrono. Os resultados obtidos mostram que, para um pequeno número de iterações, o algoritmo PSO realiza a sintonia do controlador PID de maneira eficaz, atendendo a parâmetros de qualidade definidos pela resposta ao degrau unitário.

No transcórre deste trabalho, serão descritas as características do processo em estudo, bem como as características do algoritmo PSO, passando pela forma escolhida para sua implementação e definição de suas variáveis, chegando aos resultados de simulação obtidos e a implicação destes.

## 2 Descrição do Sistema a ser Controlado

O Regulador Automático de Tensão – AVR (*Automatic Voltage Regulator*) de um gerador síncrono é o responsável pelo controle da tensão terminal e da energia reativa gerada. Desta forma, devido a este influenciar diretamente o campo magnético do gerador, o AVR está relacionado a estudos da estabilidade dinâmica das máquinas síncronas conectados ao sistema elétrico de potência (Kundur, 1994).

A representação em blocos do sistema pode ser resumido basicamente em um controlador PID, o AVR, com sua ponte retificadora e indutor, passando pelo gerador síncrono e chegando ao sensor responsável pela medição da tensão terminal. A Figura 1 mostra o diagrama de blocos do sistema:

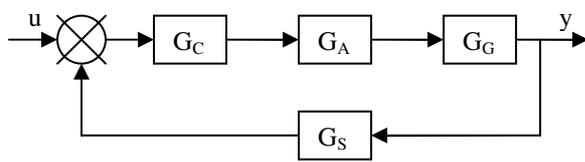


Figura 1. Diagrama de Blocos do Sistema.

Sendo:

- $G_C$ : função de transferência do controlador PID;
- $G_A$ : função de transferência do AVR;
- $G_G$ : função de transferência do gerador síncrono;
- $G_S$ : função de transferência do sensor de medição da tensão do gerador;
- $u$ : sinal de referência;
- $y$ : tensão terminal do gerador.

### 2.1 Controlador PID

O controlador PID é responsável pelo controle do sinal de referência que é enviado ao regulador, sendo composto de três parcelas: (i) proporcional, (ii) integral e (iii) derivativo. Sua função de transferência é expressa em (1).

$$G_C = k_P + \frac{k_I}{s} + k_D \cdot s \quad (1)$$

### 2.2 Sistema de Excitação Automático de Tensão – AVR

A função de transferência do AVR, indicada na Eq. (2), pode ser definida por um proporcional, que representa o ganho do sistema, e por um integrador, que constitui a constante de tempo da ponte retificadora.

$$G_A = \frac{k_A}{1 + s \cdot T_A} \quad (2)$$

### 2.3 Sensor

A função de transferência de um sensor, Eq. (3), é representada por um ganho com uma constante de tempo.

$$G_S = \frac{k_s}{1 + s \cdot T_s} \quad (3)$$

### 2.4 Gerador Síncrono

A representação do gerador síncrono como função de transferência já constitui uma tarefa mais elaborada, haja vista que ele possui diversos componentes, tais como o enrolamento de campo, os enrolamentos amortecedores, os fluxos de dispersão, e o fluxo de reação de armadura. Estes componentes, na maioria dos casos, apresentam comportamentos não-lineares (Anderson, 1994).

Sendo assim, para obtenção de uma função que descreva o comportamento do sistema e seja de fácil implementação, são adotadas as seguintes premissas:

- É desprezada a influência dos enrolamentos amortecedores com a finalidade de reduzir a ordem do sistema;
- O sistema é linearizado em torno de um ponto de operação para que sejam excluídas as não-linearidades;
- Adota-se o gerador girando em velocidade nominal, sincronizado ao sistema, para que sejam desprezadas as variações do torque mecânico;
- Representa-se o sistema por uma barra infinita atrás de uma impedância.

Neste contexto, a Figura 2 mostra o diagrama de blocos representativo de um gerador síncrono para um modelo de 3ª ordem linearizado (Mota, 2006).

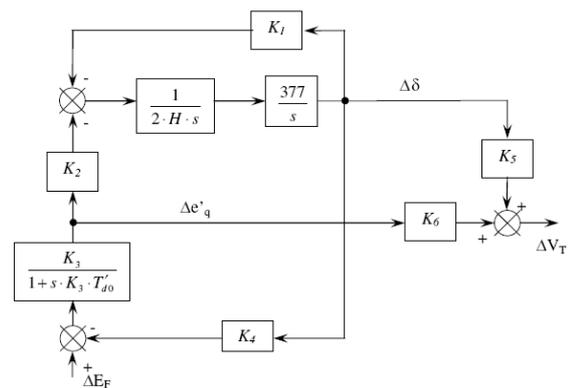


Figura 2. Diagrama de blocos do modelo linearizado máquina/barra infinita.

Sendo:

- $H$ : constante de inércia do conjunto gerador-turbina;
- $T'_{d0}$ : constante de tempo transitória de eixo direto em circuito aberto do gerador;
- $\delta$ : ângulo do rotor;
- $\Delta V_T$ : variação da tensão terminal do gerador;

- $\Delta E_F$ : variação da tensão de campo;
- $\Delta e'_q$ : variação da tensão do gerador atrás da reatância transitória de eixo em quadratura;
- $K_1$ : variação do torque elétrico para uma variação no ângulo do rotor, com fluxo concatenado constante no eixo direto;
- $K_2$ : variação do torque elétrico para uma variação do fluxo concatenado no eixo direto, com ângulo do rotor constante;
- $K_3$ : fator de impedância;
- $K_4$ : efeito desmagnetizador de uma variação do ângulo do rotor, com  $E_F$  constante;
- $K_5$ : variação da tensão terminal para uma variação do ângulo do rotor, com fluxo concatenado constante no eixo direto;
- $K_6$ : variação da tensão nominal com a variação de  $e'_q$  para um ângulo do rotor constante.

Desenvolvendo o diagrama e levando em consideração as premissas estabelecidas, obtém-se como função de transferência equivalente do gerador a expressão mostrada em (4).

$$G_G = \frac{s^5 + 1,66 \cdot s^4 + 44,97 \cdot s^3 + 73,46 \cdot s^2 + \dots}{41,55 \cdot s^6 + 92,19 \cdot s^5 + 3261 \cdot s^4 + \dots} \dots \quad (4)$$

$$\frac{+ 40,65 \cdot s + 7,52}{+ 5537 \cdot s^3 + 3292 \cdot s^2 + 737 \cdot s + 35,78}$$

### 3 Otimização por Enxames de Partículas

O algoritmo de otimização PSO foi primeiramente formulado por Edward e Kennedy em 1995, sendo baseado no estudo do comportamento social de animais, tais como bando de pássaros e cardume de peixes (Haupt, 2004).

PSO é um tipo de técnica de computação evolucionária que, contudo, não utiliza operadores evolucionários em suas manipulações, tais como mutações e cruzamentos. Na verdade, ela é baseada em elementos chamados partículas, que não são codificadas binariamente, pertencentes a um espaço g-dimensional.

Dentro deste espaço, as partículas ocupam uma determinada posição e se movimentam com uma determinada velocidade, que é modificada pela experiência adquirida por ela própria e pela influência da experiência adquirida por todo o grupo de partículas pertencentes ao espaço (Haupt, 2004).

Em outras palavras, a velocidade de cada partícula é recalculada dependendo basicamente de dois fatores:

- *gbest*: que é a melhor solução encontrada pelo grupo de partículas (solução global);
- *pbest*: que é a melhor solução encontrada pela própria partícula em questão (solução local).

A determinação da melhor solução é realizada pela avaliação de uma função custo escolhida especificamente para o problema em questão. A minimização desta função custo resulta na melhor solução.

#### 3.1 Algoritmo Implementado

O algoritmo do PSO tem como objetivo fazer com que a velocidade de cada partícula seja modificada na direção das soluções *pbest* e *gbest* a cada iteração. Desta forma, é possível expressar o PSO matematicamente, como pode ser visto em (5) (Gaing, 2004).

$$v_{i,j}^{(k+1)} = \omega \cdot v_{i,j}^{(k)} + c_1 \cdot r \cdot (pbest_{i,j} - x_{i,j}^{(k)}) + c_2 \cdot R \cdot (gbest_j - x_{i,j}^{(k)})$$

$$x_{i,j}^{(k+1)} = x_{i,j}^{(k)} + v_{i,j}^{(k+1)} \quad (5)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

Sendo:

- $n$ : número de partículas no grupo;
- $m$ : número de membros em uma partícula;
- $k$ : iteração;
- $v_{i,j}^k$ : velocidade da partícula  $i$  na iteração  $k$ , sendo  $V_j^{\min} \leq v_{i,j}^k \leq V_j^{\max}$ ;
- $\omega$  fator de inércia;
- $c_1, c_2$ : fator de aceleração;
- $r, R$ : número aleatório entre 0 e 1;
- $x_{i,j}^k$ : posição de uma partícula  $i$  na iteração  $k$ ;
- *pbest*: *pbest* da partícula  $i$ ;
- *gbest*: *gbest* do grupo.

A amplitude da variação da velocidade das partículas dentro do espaço g-dimensional é determinada pelos parâmetros  $V_j^{\min}$  e  $V_j^{\max}$ . Dependendo da escolha destes, a busca por mínimos globais pode ser eficazmente atingida ou não uma vez que valores baixos de  $V_j^{\max}$  limitam a área de busca.

A utilização do fator de inércia no algoritmo balanceia a busca local com a global, fazendo com que o resultado ótimo seja mais facilmente encontrado. Uma maneira de tratar o fator de inércia  $\omega$  é admitindo que este diminua à medida que a velocidade da partícula aproxima-se do mínimo global. Sendo assim, pode-se estabelecer uma relação entre o fator de inércia e o número de iterações, dada na Eq. (6) (Gaing, 2004).

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{k_{\max}} \cdot k \quad (6)$$

Sendo:

- $\omega_{\max}$ : valor máximo definido para  $\omega$
- $\omega_{\min}$ : valor mínimo definido para  $\omega$
- $k_{\max}$ : número de gerações.

Já as constantes  $c_1$  e  $c_2$ , Eq. (5), representam a aceleração com que as partículas são levadas para os valores de  $pbest$  e  $gbest$ . Elas dizem o quão rapidamente as partículas são aceleradas para um mínimo local ou global. A constante  $c_1$  é chamada parâmetro cognitivo e a constante  $c_2$  é chamada parâmetro social (Haupt, 2004).

#### 4 Aplicação do Algoritmo PSO

Para a aplicação do algoritmo PSO, Eq. (5), no controle do AVR do gerador síncrono é necessário inicialmente definir a estrutura da partícula a ser utilizada e, conseqüentemente, a sua dimensão. Como o algoritmo PSO será utilizado na otimização de um controlador PID com um grau de liberdade, pode-se utilizar uma partícula de dimensão 3, como segue em (7).

$$X := [k_p \quad k_I \quad k_D] \quad (7)$$

Como a escolha dos possíveis valores do vetor  $X$  é baseada em números aleatórios, existe a possibilidade de que o controlador PID resulte em um sistema instável. Portanto, é essencial que se defina um critério para verificar a estabilidade. Para o algoritmo do presente trabalho, optou-se pela verificação da presença ou não de pólos com parte real positiva como forma de identificar a instabilidade do sistema. Caso isso se verifique, a influência de tal partícula é anulada pela designação de um valor muito alto para a função de avaliação.

Para a análise da eficiência da otimização, utilizou-se o estudo da resposta ao degrau unitário do sistema, que basicamente se refere à análise de quatro parâmetros (Ogata, 1997):

- $M_p$ : sobre sinal do sinal da resposta;
- $t_R$ : tempo de subida, definido como sendo o tempo transcorrido para o sinal da resposta ao degrau ir de 10% a 90% do valor de estabilização;
- $t_S$ : tempo de estabilização, definido como sendo o tempo transcorrido para o sinal da resposta entrar dentro de uma faixa máxima de erro ( $\pm 2\%$ );
- $E_{SS}$ : erro em regime permanente para uma entrada tipo degrau unitário.

A Figura 3 mostra a resposta típica ao degrau de um sistema em malha fechada.

A função escolhida para qualificar os parâmetros da resposta e, conseqüentemente, a partícula associada a estes é definida na Eq. (8) (Gaing, 2004).

$$F(X) = (1 - e^{-\beta}) \cdot (M_p + E_{SS}) + e^{-\beta} \cdot (t_S - t_R) \quad (8)$$

Sendo  $\beta$  um fator de peso que balanceia os critérios  $M_p$  e  $E_{SS}$  com os tempos  $t_S$  e  $t_R$ . O ponto de equilíbrio é alcançado com  $\beta$  sendo igual a 0,7. Acima disto, o algoritmo tende a priorizar a redução do sobre sinal e do erro estacionário. Por outro lado, valores de  $\beta$  menores do que 0,7 proporcionam maior ênfase na

redução dos tempos de subida e de estabilização da resposta.

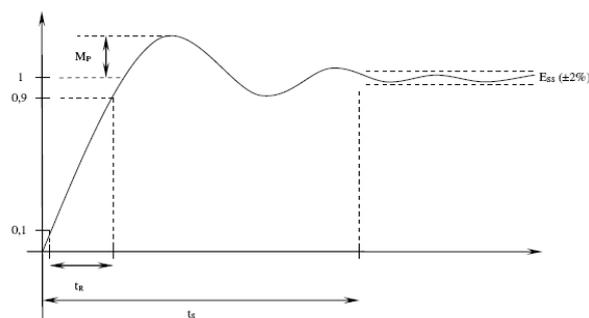


Figura 3. Parâmetros utilizados para qualificar o PID.

#### 4.1 Dados do AVR

Reguladores Automáticos de Tensão possuem tipicamente constantes de tempo pequenas uma vez que só dependem do tempo de chaveamento das pontes tiristorizadas. Portanto, as constantes  $K_A$  e  $T_A$  adotadas foram 1 e 0,003 s, respectivamente.

#### 4.2 Dados do Sensor

Transdutores analógicos possuem tipicamente os seguintes valores para suas constantes:  $K_S = 1$  e  $T_S = 0,02$  s.

#### 4.3 Dados do Gerador

O gerador síncrono utilizado consiste de um turbogenerador de 131,6 MVA que apresenta as seguintes constantes: (i)  $H = 8,15$ ; (ii)  $T'_{d0} = 10,73$  s; (iii)  $K_I = 3,31$ ; (iv)  $K_2 = 3,79$ ; (v)  $K_3 = 0,17$ ; (vi)  $K_4 = 4,58$ ; (vii)  $K_5 = 0,096$  e (viii)  $K_6 = 0,26$ .

### 5 Resultados

O algoritmo PSO possui diversos parâmetros que devem ser determinados empiricamente, dependendo das características do sistema onde está sendo aplicado, a fim de assegurar o desempenho e eficácia do método.

Dentro deste contexto, foram realizados diversos testes a fim de se descobrir os valores mais adequados para a obtenção da resposta desejada. Para o problema em estudo, adotaram-se os seguintes parâmetros: (i) número de partículas = 10; (ii) número de gerações = 30; (iii)  $\alpha_{max} = 0,9$ ; (iv)  $\alpha_{min} = 0,4$ ; (v)  $c_1 = 2$ ; (vi)  $c_2 = 2$ ; (vii)  $K_{max} = [50 \ 10 \ 1]$ ; (viii)  $K_{min} = [0 \ 0 \ 0]$  e (ix)  $\beta = 20$ .

Com os parâmetros definidos acima, as constantes encontradas para o controlador PID foram:  $K_P = 44,1$ ;  $K_I = 2,9$  e  $K_D = 0,08$ . A Figura 4 mostra a resposta ao degrau unitário do sistema controlado.

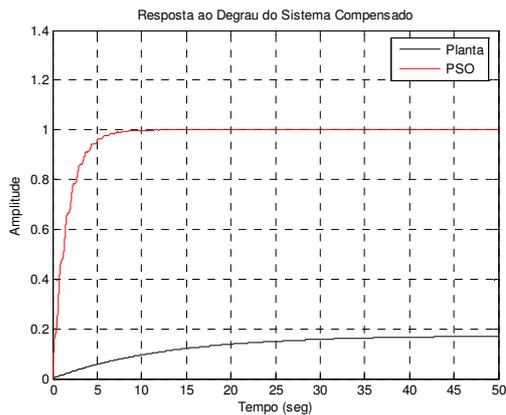


Figura 4 – Resposta ao degrau do PID ajustado pelo algoritmo PSO

As características da resposta ao degrau unitário obtidas com a aplicação do algoritmo PSO foram:  $M_P = 0\%$ ;  $t_R = 3,5$  s;  $t_S = 6,4$  s e  $E_{SS} = 0$ .

Outro aspecto analisado foi a influência do número de gerações e do fator  $\beta$  do algoritmo PSO no desempenho da sintonia do PID. Entretanto, é ressaltado que, na análise do desempenho, somente alterou-se um parâmetro de cada vez, mantendo os demais iguais ao caso ótimo mostrado na Figura 4.

A Tabela 1 contém os dados do estudo da influência do fator  $\beta$ . Percebe-se claramente, pelas características da resposta, que esta influência torna-se significativa somente para valores bem distantes do ponto de equilíbrio. Além disso, mesmo com toda variação imposta ao fator de peso da função de avaliação, o algoritmo produziu fatores que resultaram em respostas ao degrau bens estáveis. As Figuras 5 e 6 mostram este comportamento.

Tabela 1 – Análise da influência do fator de peso da função de qualificação

$\beta$	$K_P$	$K_I$	$K_D$	$M_P$ [%]	$t_R$ [s]	$t_S$ [s]	$E_{SS}$ [s]
0,01	45,2	3,9	0,58	1,7	3,3	4,9	0
0,7	44,7	3,9	0,76	1,8	3,4	5,0	0
20	44,1	2,9	0,08	0	3,5	6,4	0

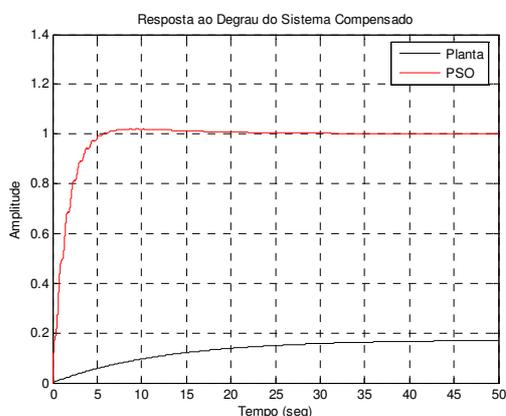


Figura 5 – Resposta ao degrau com  $\beta$  igual a 0,01

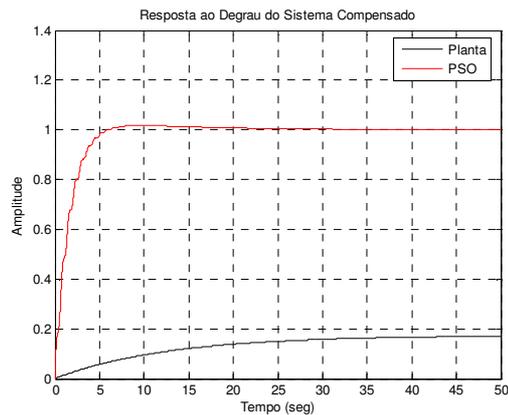


Figura 6 – Resposta ao degrau com  $\beta$  igual a 0,7

A influência do número de gerações está intimamente ligada ao desempenho do algoritmo. As simulações mostraram que, uma vez atingido um número mínimo de gerações para a convergência, o aumento neste parâmetro tem pouca influência na eficiência do método.

A Figura 7 mostra a convergência do vetor X para de 30 gerações.

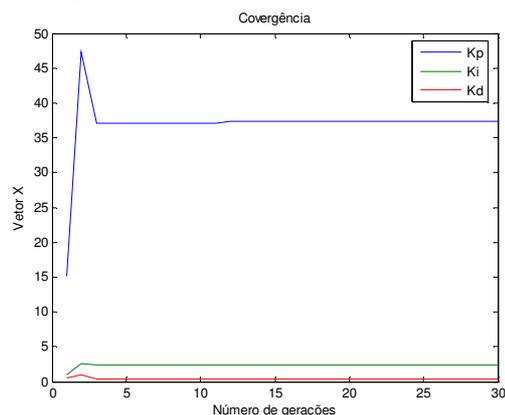


Figura 7 – Convergência dos parâmetros do PID para 30 gerações.

## 6 Conclusão

Com a utilização do algoritmo PSO foi possível a obtenção dos parâmetros de um PID utilizado no controle de um AVR. A resposta ao degrau do sistema em malha fechada controlado pelo PID sintonizado via PSO mostrou-se eficiente e eficaz.

A utilização de um sistema relativamente complexo, como a representação de 3ª ordem do gerador síncrono, possibilitou demonstrar a capacidade e potencialidade do PSO na sintonia de PID's a fim de se obter respostas ótimas de controladores para plantas com funções de transferência de alta ordem.

A estabilidade e constância nas respostas ao degrau unitário, obtidas durante as variações dos parâmetros do PSO, mostraram ser esse um método robusto e pouco influenciável na determinação de parâmetros de controladores PID.

Embora algumas constantes do algoritmo PSO ( $\omega_{max}$ ,  $\omega_{min}$ ,  $c_1$  e  $c_2$ ) tenham sido determinadas empiricamente, de acordo com as características do sistema estudado, os vários testes realizados mostraram que a análise da influência destes parâmetros sobre a resposta do sistema possibilita sua determinação com relativa facilidade.

A verificação da eficácia de métodos inteligentes na sintonia de controladores PID abre uma perspectiva interessante sobre sua aplicabilidade, uma vez que possibilita uma nova visão sobre estes processos, utilizando ferramentas modernas e mais eficientes.

Contudo, ressalta-se que o presente trabalho tratou somente da análise da resposta temporal do sistema a uma entrada tipo degrau unitário. A fim de se verificar a real eficácia do método apresentado faz-se necessário o estudo de outros aspectos dos controladores PID, tais como, resposta em frequência, sensibilidade, robustez, etc., bem como a comparação com outros métodos de sintonia utilizando tanto algoritmos clássicos quanto inteligentes. Esta análise será tratada na continuidade deste trabalho.

### Referências Bibliográficas

- Anderson, P. M. and Fouad, A. A. (1994). Power System Control and Stability. IEEE, New York.
- Åström, K. e Hägglund, T. (1995). PID Controllers: Theory, Design and Tuning. Instrument Society of America, USA.
- De Mello, F. P., (1969). Concepts of Synchronous Machine stability as Affected by Excitation Control. IEEE, pp. 316-329.
- Gaing, Z. L. (2004). A Particle Swarm Optimization Approach for Optimum Design of PID Controller in AVR System, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no 2, June 2004.
- Haupt, R. L. e Haupt, S. E. (2004). Practical Genetic Algorithms, John Wiley & Sons Inc, USA.
- Jones, A. H. e Oliveira, P. B. D. (1995). Genetic auto-tuning of PID controllers, Proc. Inst. Elect. Eng. Conf. Genetic Algorithm Eng. Syst.: Innovations Applicat., September 1995.
- Kennedy, J., Eberhart, R. C. e Shi, Y. (2001). Swarm Intelligence, Morgan Kaufmann Publishers, USA.
- Krohling, R. A. e Rey, J. P. (2001). Design of optimal disturbance rejection PID controllers using genetic algorithm, IEEE Trans. Evol. Comput., vol. 5 February 2001.
- Kundur, P. (1994). Power System Stability and Control. McGraw-Hill, New York.
- Mota, W. S., (2006), Simulação de Transitórios Eletromecânicos em Sistemas de Potência, EPGRAF, Campina Grande.
- Ogata, K. (1997). Modern Control Engineering, Prentice Hall.
- Sauer, P. W., Pai, M. A., (1998). Power System Dynamics and Stability, Prentice Hall.
- Visioli, A. (2001). Tuning of PID controllers with fuzzy logic, Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Theory Applicat., vol. 148, no 1, January 2001.