

Algoritmos Meméticos Aplicados à Identificação de Sistemas e Sintonização de Controladores PID

Alana L. Sousa¹

Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, UFPA, Belém, PA

Juan F. Vidal²

Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, UFPA

Orlando F. Silva³

Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica, UFPA

Victor S. Freitas⁴

Departamento de Engenharia Elétrica, UFSC, Florianópolis, SC

Resumo. Este trabalho apresenta a aplicação da teoria de algoritmos meméticos (AM) à identificação de sistemas e sintonização de controladores do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (PID). O AM proposto coleta a saída do sistema a ser identificado e realiza a estimação de parâmetros da função de transferência que melhor descrevem o comportamento do sistema. Após a identificação dos parâmetros do sistema, o AM efetua a sintonia dos parâmetros de um controlador PID, dada as especificações de um determinado projeto.

Palavras-chave. Estimação de Parâmetros, Algoritmos Meméticos, Sintonização de PID, Controle Clássico

1 Introdução

Para analisar um sistema é necessário que se conheça o modelo matemático que melhor representa a dinâmica deste sistema. Obtendo-se o devido modelo, sinais de testes são aplicados à entrada do mesmo e as características da saída devem ser analisadas a partir da direta comparação com as características dos sinais de saída esperados.

O desempenho dinâmico de um sistema é avaliado observando-se a resposta transitória e o erro de regime permanente do sinal de saída. Se estas características não forem as desejáveis, um controlador deve ser projetado de forma a se obter uma resposta cujo comportamento atenda especificações pré-determinadas.

Os controladores do tipo proporcional-integral-derivativo (PID) são amplamente utilizados para o controle de diversos processos devido a sua simplicidade e robustez. Eles

¹alana.lsousa4@gmail.com

²eng.juanvidal@gmail.com

³orfosi@ufpa.br

⁴victor.silva@posgrad.ufsc.br

combinam as características das ações de controle do tipo proporcional, integral e derivativa em um único sinal controle, melhorando tanto o desempenho da resposta nos aspectos transitórios quanto no erro de regime permanente.

A identificação de sistemas e sintonia dos parâmetros de um controlador PID podem ser interpretadas como problemas do tipo “caixa preta”, onde se conhece a entrada e saída da caixa, mas não o que está dentro dela [1]. Os algoritmos meméticos (AMs) mostraram-se eficientes em problemas deste tipo e são utilizados para encontrar pontos ótimos, ou seja, a melhor solução para o problema dentro de um espaço de busca.

Os AMs utilizam técnicas de busca global e local de forma combinada para encontrar as soluções ótimas de um determinado problema [2]. Este trabalho propõe um algoritmo memético para a identificação de sistemas de primeira e segunda ordem e sintonia parâmetros de controladores PID. A metodologia tem por base algoritmos genéticos para a busca global de melhores soluções do problema, e o uso do algoritmo *hill-climbing* para uma busca local, e assim determinar outras possíveis soluções em uma região de confiança do espaço de busca.

2 Modelagem e Identificação de Sistemas

2.1 Modelo de identificação

A Figura 1 apresenta a estrutura utilizada para realizar a identificação de sistemas de primeira e segunda ordem através do AM. O método consiste em aplicar um sinal de entrada do tipo degrau $u(t)$ ao sistema a ser identificado que gera um sinal de saída $y(t)$, e ambos os sinais são utilizados como entrada do algoritmo de identificação, o qual é formado por dois blocos: o $G_n(s)$ composto por n funções no domínio s , e o AM propriamente dito, composto por n indivíduos que estão relacionados às funções de $G_n(s)$. Desta forma, as funções do bloco $G_n(s)$ são representadas no AM por indivíduos, sendo que o indivíduo 1 codifica os parâmetros da função $FT_1(s)$ até o indivíduo n , que codifica os parâmetros da função $FT_n(s)$. O bloco $G_n(s)$ gera n sinais de saída no domínio do tempo $y_n(t)$, os quais são comparados com o sinal de saída $y(t)$ do sistema real. Por conseguinte, são computados os erros a cada instante de tempo entre os dois sinais, dados pela Equação (1) [6].

$$e_n(t) = y_n(t) - y(t) \quad (1)$$

Em seguida, os n indivíduos são avaliados através de uma função de avaliação da Equação (3). A avaliação F é dada em função do erro quadrático médio, descrito na Equação (2), onde m é o tamanho do vetor de resposta do sistema e t o instante no qual o erro está sendo calculado [6]. O objetivo do AM é gerar indivíduos que forneçam um modelo matemático com o menor erro possível.

$$E = \frac{\sum_{i=1}^m [e_n(t)]^2}{m} \quad (2)$$

$$F = \frac{100}{0,001 + E} \quad (3)$$

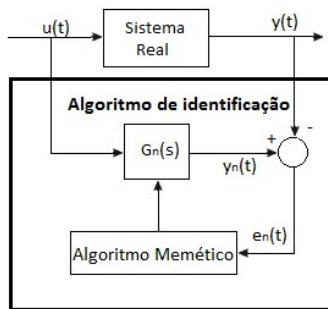


Figura 1: Estrutura para a identificação de sistemas dinâmicos

2.2 Representação de Parâmetros

Um sistema de primeira ordem pode ser representado pela Equação 4, sendo K o ganho estático e T a constante de tempo dada em segundos [5].

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (4)$$

Para este caso, cada indivíduo do AM é um vetor composto pelos parâmetros K e T que representam uma função de transferência no bloco $G_n(s)$.

Os sistemas de segunda ordem são representados pela função de transferência da Equação (5), onde ω_n é a frequência natural do sistema, ζ o coeficiente de amortecimento e K o ganho estático [5]. Neste caso, os indivíduos do AM são vetores compostos pelos três parâmetros: ω_n , ζ e K .

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (5)$$

2.3 Algoritmo Genético

O AG é a parte do AM responsável por determinar as regiões do espaço de busca promissoras, as quais possuem a tendência de conter soluções ótimas. Primeiramente, o AG inicializa uma população de indivíduos aleatórios dentro de um espaço de busca. Cada indivíduo recebe uma avaliação através da Equação (3). Se o melhor indivíduo da geração (maior avaliação) satisfazer o erro médio quadrático máximo desejado ou o número de gerações máximo for atingido, o algoritmo retorna os parâmetros do sistema considerando o melhor indivíduo encontrado.

Caso nenhum dos critérios de convergência do algoritmo tenha sido atingido, o AG realiza a seleção dos indivíduos-pais, os quais irão formar os indivíduos da próxima geração. O método utilizado para a seleção dos pais foi o torneio de tamanho 2, que consiste em selecionar aleatoriamente dois indivíduos da população e fazer com que eles entrem em competição direta pelo direito de ser pai, usando como arma a sua avaliação [3]. Então, utiliza-se o operador *crossover aritmético* [4] para misturar as informações dos pais e, em seguida, aplica-se o operador mutação nos novos indivíduos. Para garantir que o melhor indivíduo da próxima geração tenha avaliação igual ou superior ao melhor indivíduo da população passada, aplica-se o Elitismo ao processo de reprodução [3].

2.4 Hill-Climbing

O ponto inicial da busca local realizada pelo *hill-climbing* é o indivíduo de maior avaliação da geração do AG. Seu objetivo é realizar algumas perturbações neste ponto buscando na sua vizinhança indivíduos com melhores avaliações. O critério de parada do algoritmo é o número de iterações.

Para a identificação de sistemas de primeira ordem, o *hill-climbing* recebe o indivíduo com os parâmetros K e T . Uma perturbação p é somada e subtraída de K , gerando novos parâmetros denotados por K' e K'' . O mesmo acontece para o parâmetro T , formando T' e T'' . Assim, novos pontos são gerados pela combinação de todos os parâmetros K , K' e K'' e T , T' e T'' . O valor da perturbação p é computado a partir da Equação (6), onde a variável *rand* é um número aleatório entre 0 e 1 e a é o parâmetro relacionado ao raio máximo do círculo que delimita a perturbação máxima.

$$p = rand \cdot a \quad (6)$$

O *hill-climbing* avalia seus indivíduos utilizando a mesma função de avaliação do AG (Equação (3)) e, após atingir seu número de iterações, substitui o indivíduo com melhor avaliação encontrado na população do AG. Para a identificação de plantas de segunda ordem utiliza-se a mesma metodologia.

3 Sintonia do Controlador PID

A Equação (7) apresenta a função de transferência do controlador PID, em que K_p , T_i e T_d são, respectivamente, o ganho proporcional, constantes de tempo integral e derivativo [5].

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (7)$$

As especificações de projeto utilizadas, como valor de sobressinal máximo (M_p), tempo de acomodação da resposta (T_s), tempo de subida (T_r) e o valor do erro de regime permanente aceitável geram duas curvas limitante de projeto, calculadas com base nos valores máximos e mínimos dos parâmetros especificados. Desta forma, o AM busca uma curva de resposta que seja projetada considerando os limites superior e inferior gerados pelas curvas de especificação de projeto.

Os indivíduos do AM são compostos pelos parâmetros K_p , T_i e T_d codificando as funções de transferência dos controladores. Cada indivíduo é avaliado através do erro médio quadrático (Equação (2)) em relação às duas curvas limitante de projeto, isto é, o indivíduo recebe uma avaliação F_1 em relação à curva superior, e uma avaliação F_2 em relação à curva inferior. A avaliação final é computada pela Equação (8), onde os pesos x e y definem de qual curva limitante a resposta do sistema controlado deve estar mais próxima. Os valores de x e y foram definidos a partir de sucessivas simulações, e verificou-se que adotando os valores 0,1 e 0,9, respectivamente, consegue-se realizar o balanceamento entre a resposta controlada e as curvas limitante.

$$F = F_1^x + F_2^y \quad (8)$$

É importante ressaltar que o objetivo do algoritmo não é encontrar o indivíduo de melhor avaliação estabelecida pela Equação (8), e sim indivíduos que atendam às especificações de projeto. A cada geração, diversos sinais de controle são produzidos através dos parâmetros dos indivíduos e aplicados ao sistema para o controle em malha fechada. Deste modo, o AM armazena apenas aqueles indivíduos e suas respectivas avaliações, cujas respostas controladas atendam as especificações de projeto. Ao atingir o número máximo de gerações, o AM retorna todos os indivíduos relacionados aos controladores que atendem às especificações de projeto.

4 Resultados Numéricos

Para a validação do AM proposto, algoritmo é submetido à identificação de sistemas de primeira e segunda ordem e a sintonia de um controlador PID para o controle de um sistema de segunda ordem previamente identificado. As simulações dos sistemas com valores “reais” foram realizadas no ambiente de programação do *software* Matlab.

4.1 Identificação de Sistemas de Primeira Ordem

O sistema real de primeira ordem simulado tem as características de um sistema lento com erro de regime quando lhe é aplicado um degrau unitário. A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros do sistema real e os estimados pelo AM, assim como o erro relativo entre eles. A Figura 2 compara as respostas do sistema real e a do sistema com parâmetros estimados, sendo possível observar a sobreposição dos sinais, o que indica um erro muito baixo sobre as estimativas do AM em relação aos valores reais.

Tabela 1: Comparação entre os valores reais e estimados pelo AM.

Parâmetros	Valor Real	Valor Estimado	Erro Relativo
K	0,69	0,69	0%
T	4,7	4,7008	0,017%

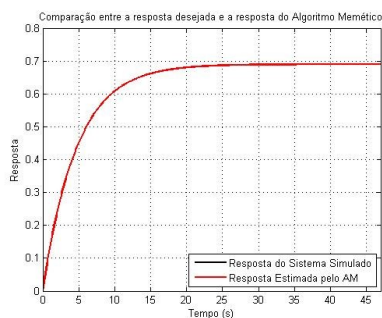


Figura 2: Resposta simulada e resposta estimada pelo AM.

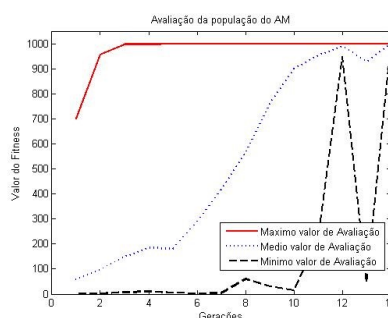


Figura 3: Avaliações a cada geração do AM.

A Figura 3 apresenta as avaliações máxima, média e mínima de cada geração que tendem a convergir para um número máximo, mostrando a evolução dos indivíduos. A distância entre as avaliações demonstra a diversidade das populações que tende a diminuir conforme o aumento do número de gerações.

4.2 Identificação de Sistemas de Segunda Ordem

O sistema de segunda ordem simulado é sub-amortecido com muitas oscilações no período transitório com e erro de regime quando se aplica um degrau unitário. A Tabela 2 apresenta os valores dos parâmetros do sistema real e os estimados pelo AM, assim como o erro relativo entre eles. A Figura 4 apresenta a comparação dos sinais de saída dos sistemas simulados e com parâmetros estimados pelo AM.

Tabela 2: Comparação entre os valores reais e estimados pelo AM.

Parâmetros	Valor Real	Valor Estimado	Erro Relativo
K	2	2,0001	0,005%
ζ	0,1	0,1	0%
ω_n	0,4	0,4	0%

4.3 Sintonia do Controlador PID

O controlador PID projetado tem o objetivo de fazer com que a resposta do sistema de segunda ordem anteriormente identificado atinja às seguintes especificações: entrar em regime permanente em no máximo 15s (com o critério de 2% em torno do valor de regime) com uma ultrapassagem de até 25% e erro de regime permanente nulo. O AM gerou as curvas limitantes de projeto de acordo com as especificações, como pode ser observado na Figura 5 nas cores preto e vermelho, e sintonizou 263 controladores, os quais garantem que as respectivas respostas controladas cumprem as especificações. Entre estes controladores, o indivíduo de melhor avaliação apresenta os seguintes valores de

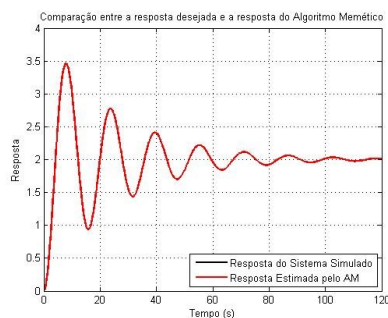


Figura 4: Respostas simulada e estimada pelo AM.

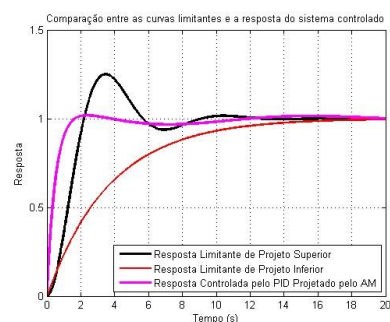


Figura 5: Curvas limitantes e a resposta do sistema controlado.

parâmetros: $K_p = 1,2218$, $T_i = 1,3092$, $T_d = 5,2058$. A Figura 5 também apresenta a saída do sistema controlado, na cor magenta.

5 Conclusões

Este trabalho propõe a identificação de sistemas e sintonização de controladores PID através de algoritmos meméticos. O AM utilizado para a identificação apresentou bons resultados tanto para o sistema de primeira ordem como para o de segunda uma vez que o erro dos parâmetros foram quase todos nulos.

O AM utilizado na sintonia de controladores PID apresentou um grande número de controladores que atendiam às especificações de projeto, ficando assim a critério do projetista a escolha do controlador mais adequado para o controle do sistema em questão. Outras restrições e especificações não citadas podem ser incluídas ao modelo, como por exemplo, os limites para o esforço de controle que deve ser atribuído aos controladores, frequência oscilação da resposta, entre outras.

Agradecimentos

Orlando Silva agradece o suporte financeiro do MEC/SESU por meio do Programa de Educação Tutorial (PET-EE). Victor Freitas reconhece igualmente o apoio financeiro do CNPq.

Referências

- [1] L. A. Aguirre. Introdução à identificação de sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais. *Editora UFMG*, Minas Gerais, 2007.
- [2] F. Glover and G. Kochenberger. Handbook of metaheuristics. *Kluwer Academic Publishers*, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow, 2003.
- [3] R. Liden. Algoritmos genéticos. Uma importante ferramenta da inteligência computacional. *Brasport*, Rio de Janeiro, 2006.
- [4] Z. Michalewicz. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs. *Springer-Verlag*, New York, 1996.
- [5] K. Ogata. Engenharia de Controle Moderno, *Prentice/Hall do Brasil*, Rio de Janeiro, 2003.
- [6] J. F. Vidal, O. F. Silva, V. S. Freitas, R. L. Medeiros, A. G. Castro. Estratégia de Identificação de Sistemas e Controle PID Via Algoritmo Genético em Modelos De Ilhas, *IN: Anais do Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (XII SBAI)*, pp. 1624-1629, Natal, RN, Brasil, 2015.