



MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO E ESTRUTURAS PID APLICADAS A UM SISTEMA DE IÇAMENTO DE CARGAS

Daniel Felipe Guimarães dos Reis – daniel.fgreis@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Rua Dom José Gaspar, 500 – Coração Eucarístico

30535-901 – Belo Horizonte – Minas Gerais

Hugo Oscar Fernandes da Silva – hugo.fernandesilva23@gmail.com

Sanders Batista Félix Júnior – sandersbatista@gmail.com

Resumo: O crescente avanço da tecnologia e a atual necessidade de informação, nos diversos campos industriais, possibilita a implementação de sistemas de controle e automação cada vez mais complexos. Dos dilemas enfrentados pela automação moderna temos que a confiabilidade, segurança e otimização são fundamentais nesse sentido, já que os sistemas lidam com várias informações relevantes. Todavia, para desenvolver um projeto de automação é necessário fazer a identificação do modelo matemático do processo para então realizar simulações e posteriormente executar o projeto. A proposta deste trabalho é apresentar como foram implementadas as ações de controle para um sistema de içamento de cargas, as quais se deram de duas maneiras: por meio de um modelo de aproximação baseado em tentativa e erro e através da identificação do sistema por métodos e modelos matemáticos. O sistema é constituído pela modelagem de um motor de corrente contínua, utilizando o software MATLAB® e o método de Broida, a fim de controlar sua velocidade, mantendo-a constante ao longo do processo, independentemente da carga a ser suspensa, obedecendo as características mecânicas e elétricas do motor. O controlador PID é responsável pela linearidade da velocidade do motor garantindo a eficiência do processo.

Palavras-chave: Içamento, Modelagem, MATLAB, Método de Broida, Controlador PID

1. INTRODUÇÃO

Apesar do desenvolvimento de técnicas de acionamentos de corrente alternada (CA), e a viabilidade econômica terem favorecido a substituição dos motores de corrente contínua (CC) pelos motores de indução acionados por inversores de frequência, o motor CC ainda se mostra melhor em diversas aplicações industriais devido as suas características e vantagens, tais como laminadores, prensas, bobinadeiras, desbobinadeiras, elevadores e a movimentação e içamento de cargas.

Dependendo da aplicação, os acionamentos em corrente contínua são geralmente os que apresentam os maiores benefícios, também em termos de confiabilidade, operação amigável e dinâmica de controle. Dentre as principais vantagens, tem-se: alto torque na

partida e em baixas rotações, ciclo contínuo em baixas rotações, facilidade em controlar a velocidade e flexibilidade.

Em pátios industriais faz-se uso de guindastes para içamento de transporte e organização, ou seja, a parte do processo que cuida da logística da produção. Esses levantamentos devem ser efetuados com cautela, devido ao tipo de carga: frágil, pesada, corrosiva ou explosiva. Para tal, a velocidade precisa ser controlada, de modo que seja constante ao longo do processo.

Neste artigo, propõe-se a simulação de um sistema de içamento de cargas, que foi implementado fisicamente por meio de um estudo comparativo entre diferentes métodos de identificação do processo, fornecendo ainda a melhor ação de controle e sintonia a ser implementada. O propósito não é apresentar um comparativo de vantagens e desvantagens, mas ressaltar a gama de métodos de modelagem e ações de controle.

2. IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

Modelar é o princípio básico para qualquer análise de um sistema, independente das suas características. Quando o modelo se aproxima do sistema original, ele é considerado como válido, ou seja, informações significativas podem ser retiradas sobre sua dinâmica e seu desempenho.

O modelo matemático de um sistema descreve o seu comportamento respeitando as leis físicas e pode ser analisado a partir de uma certa excitação, que é o sinal de entrada. Por causa dessa excitação, tem-se um comportamento denominado resposta do sistema. No domínio da frequência, a razão desta resposta pela sua entrada é denominada função de transferência.

A amostragem de dados para obter a função transferência foi realizada através de ensaios monitorados por um osciloscópio. Esse instrumento apresenta a resposta temporal quando é aplicado um degrau de tensão na armadura do motor.

O osciloscópio possui um *software* próprio para interface com o computador. Este *software* armazena em um arquivo os dados referentes ao gráfico obtido pela resposta do motor.

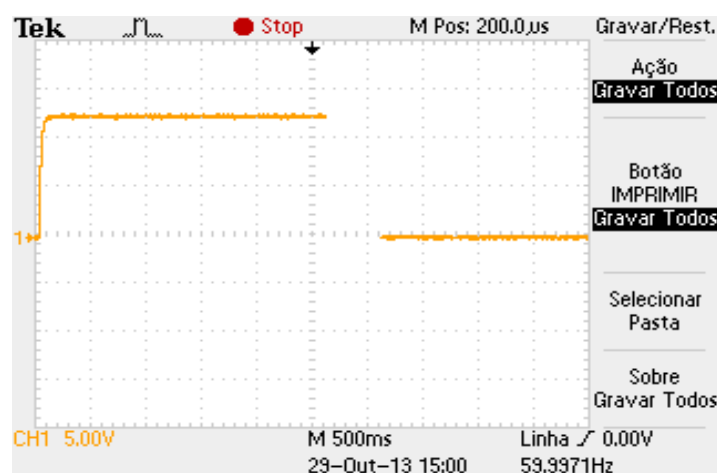


Figura 1 - Dados amostrados no osciloscópio

2.1. Método Computacional

Neste método, os dados obtidos do osciloscópio foram lidos e interpretados por um programa do *MATLAB*. Este programa, que foi desenvolvido pelo professor Cláudio Dias¹, traça a curva mais próxima da resposta natural do motor, e a partir desta mesma curva, obtém a função de transferência. A curva foi normalizada com base na tensão aplicada nos terminais do motor.

Portanto, consiste de análise computacional, onde o algoritmo analisa ponto a ponto e faz uma aproximação concisa, além de desconsiderar o tempo morto da resposta, ou seja, o tempo que o sistema demora a responder para uma entrada em degrau. Nesse caso, o tempo que o motor responde quando é energizado.

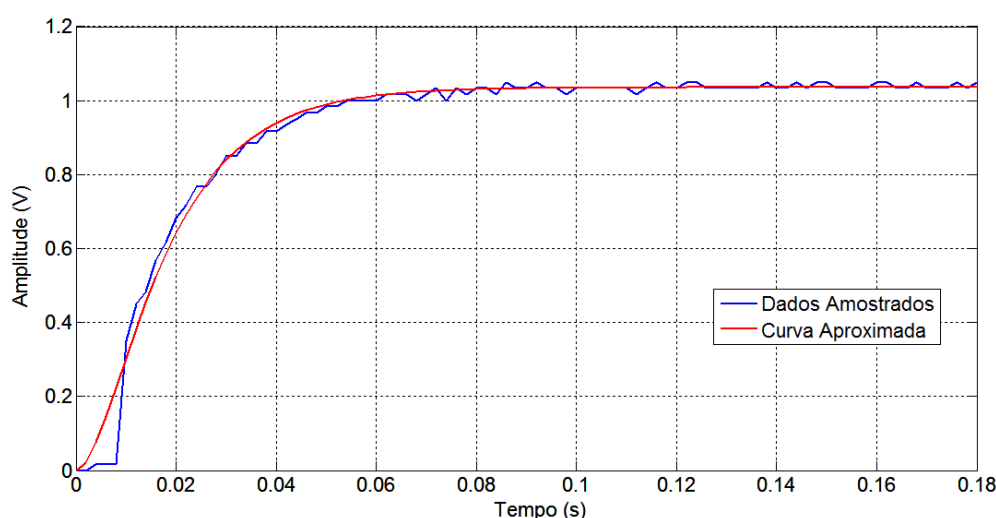


Figura 2 - Curva aproximada obtida pelos dados amostrados

O programa obtém a equação da resposta temporal e, a partir dela, realiza a transformada de Laplace obtendo a Equação (1), que representa a função de transferência do sistema.

$$G(s) = \frac{12840}{s^2 + 241,8s + 12390} \quad (1)$$

2.2. Método Matemático

Embora os métodos computacionais se mostrem bastante confiáveis, por se basearem em modelos aproximados e executarem bem sua função, os meios físicos e matemáticos jamais caíram em desuso.

Existem vários métodos matemáticos que se aplicam à identificação de sistemas, e o melhor método é aquele mais se aproxima da curva original. Para o processo em estudo, foram utilizados quatro métodos de identificação, sendo eles: *Sundaresan*, Primeiro Método

¹ Professor Cláudio Dias da PUC Minas, no curso de Engenharia de Controle e Automação, da disciplina de Laboratório Controle de Processos I, no 2º semestre de 2013.

de Ziegler-Nichols, Método para Sistemas de Segunda Ordem e o Método de Broida, que foi o modelo que apresentou o melhor resultado.

Desenvolvendo matematicamente os quatro métodos, obteve-se as seguintes curvas de representação incluindo os dados amostrados, de acordo com a Figura (3).

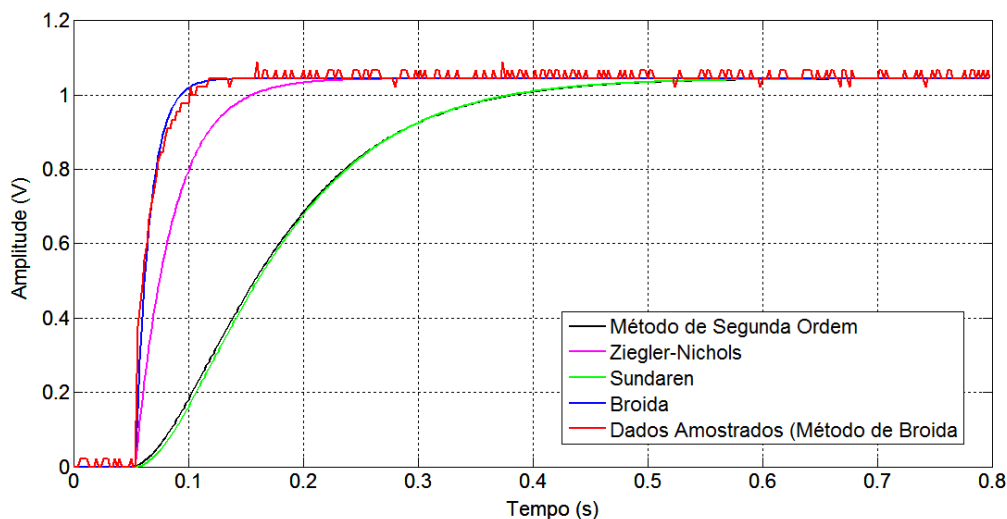


Figura 3 - Métodos de identificação e seu resultado gráfico comparados com os dados amostrados

Percebe-se então que o melhor método é o de Broida, pelo fato de ser a curva que mais se aproxima dos dados amostrados. O método de Broida procura como modelo a função de transferência:

$$H(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{1 + \tau \cdot s} \quad (2)$$

Onde:

K : é o ganho do processo

θ : é o tempo de atraso do processo

τ : é a constante de tempo do processo

O método de Broida propõe modelar um processo de n-ésima ordem, por uma curva de primeira ordem com tempo morto. Esse modelo faz a função de transferência de primeira ordem com tempo de atraso entre o ponto A (28% da amplitude) e B (40% da amplitude), conforme a Figura (4).

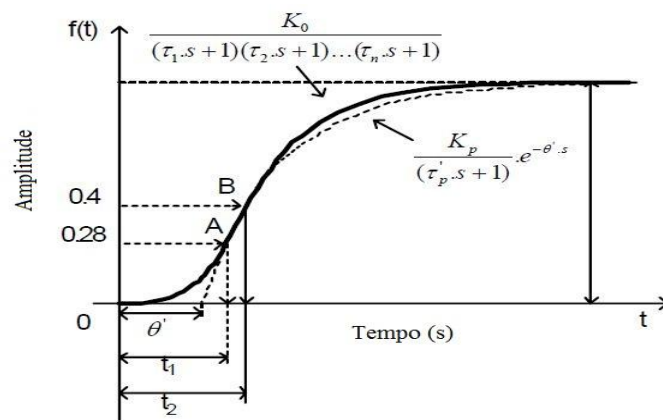


Figura 4 - Parâmetros localizados num gráfico de dados amostrados para calcular a função de transferência

Para calcular τ e θ , consideramos o ganho estático igual a um. Tem-se no ponto A:

$$0,28 = 1 - e^{\frac{-(t_1 - \theta)}{\tau}} \quad (3)$$

Simplificando:

$$0,3285 \cdot \tau = t_1 - \theta \quad (4)$$

Para o ponto B:

$$0,40 = 1 - e^{\frac{-(t_2 - \theta)}{\tau}} \quad (5)$$

Simplificando:

$$0,5108 \cdot \tau = t_2 - \theta \quad (6)$$

A partir da Equação (4) e (6) substituindo o valor de θ :

$$\tau = 5,5 \cdot (t_2 - t_1) \quad (7)$$

Isolando τ na Equação (6):

$$\tau = \frac{(t_2 - \theta)}{0,5108} \quad (8)$$

Igualando a Equações (7) e (8):

$$\frac{(t_2 - \theta)}{0,5108} = 5,5 \cdot (t_2 - t_1) \quad (9)$$

$$\theta = 2,8.t_1 - 1,8.t_2 \quad (10)$$

Os valores de t_1 e t_2 referentes à curva de dados do processo foram obtidos graficamente onde $t_1 = 0.058$ e $t_2 = 0.0603$. O valor de τ e θ é encontrado conforme Equações (9) e (10).

$$\tau = 5,5.(0.060 - 0.058) \rightarrow \tau = 0.013 \quad (11)$$

$$\theta = 2,8.0,058 - 1,8.0,060 \rightarrow \theta = 0.054 \quad (12)$$

Assim, a identificação do sistema é representada da seguinte maneira conforme Equação (19) e Figura (5) mostram.

$$G(s) = \frac{1.045.e^{-0.054.s}}{1+0.013.s} \quad (13)$$

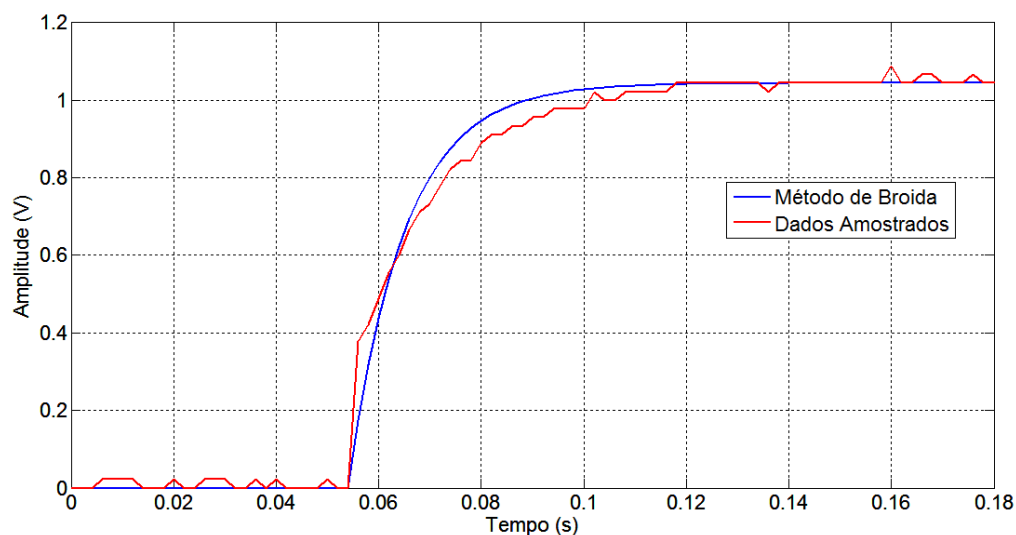


Figura 5 - Método de *Broida* aplicado aos dados amostrados

3. SINTONIA DO CONTROLADOR

3.1 Sintonia com o *Sisotool*

O *MATLAB* apresenta um *toolbox* conhecido como *Sisotool*, que possui uma malha de controle de simples entrada e simples saída com parâmetros ajustáveis. O *Sisotool* possui uma interface gráfica que mostra o lugar das raízes e os diagramas de resposta em frequência de magnitude e fase.

O lugar das raízes é o caminho das raízes da equação característica do sistema. Esse percurso se altera à medida que um parâmetro de saída é modificado. Foram alterados esses parâmetros no *Sisotool* para que o lugar das raízes pertença à região de estabilidade.

Os diagramas de Bode constituem umas das ferramentas gráficas mais eficientes para analisar processos e projetar sistemas de controle. Os diagramas correspondem à resposta em frequência de estado estacionário para uma entrada senoidal, quando $s = j\omega$. Seus dois gráficos, um de magnitude e outro de fase, permitem análise de estabilidade, através da margem de fase e da margem de ganho. A margem de ganho indica a variação do ganho sem alterar a estabilidade do sistema. A margem de fase se relaciona com o fator de amortecimento do sistema (representado por ζ , zeta), e quanto maior a margem de fase, maior esse fator. Além disso, é possível visualizar o efeito das ações de controle em função da frequência do sistema.

Primeiramente, são ajustados os parâmetros de *overshoot*² e de tempo de acomodação³ que delimitam uma faixa de atuação do sistema, determinados em relação ao processo. Então se desloca o lugar das raízes para a região de estabilidade. Pode-se dizer que foi um método baseado em tentativa e erro, pois este deslocamento é avaliado pela resposta ao degrau da função, ou seja, a melhor localização dos pólos e zeros é aquela que apresenta a melhor resposta ao degrau conforme Figura (6).

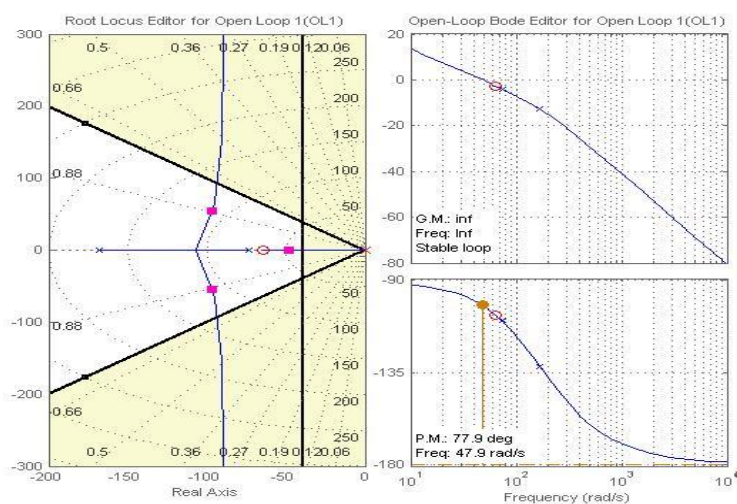


Figura 6 - Lugar das raízes no Sisotool e os parâmetros manipulados e o gráfico de Bode

Finalmente, o próprio Sisotool gera a função do controlador da qual podem ser extraídos os valores de K_p ⁴, K_i ⁵, K_d ⁶. A Figura (7) mostra o processo controlado pelo Sisotool.

² *Overshoot*: valor que a variável de processo ultrapassa o valor final, expresso em porcentagem.

³ Tempo de acomodação: É o tempo necessário para a curva de resposta alcançar e permanecer dentro de uma faixa em torno do valor final.

⁴ K_p : Ganho proporcional

⁵ K_i : Ganho integral

⁶ K_d : Ganho derivativo

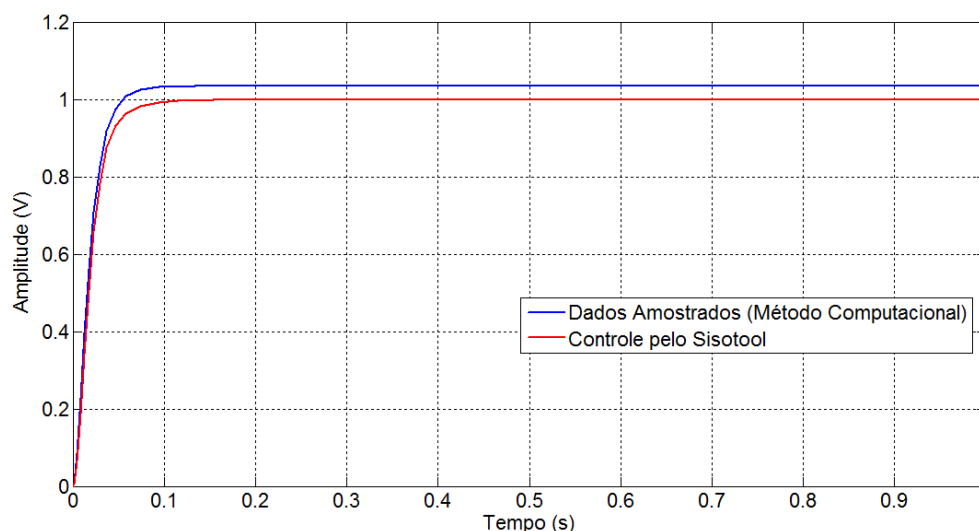


Figura 7 - Processo controlado pelo Sisotool

3.2 Sintonia por modelagem matemática

A partir da identificação do sistema pelo método de *Broida*, realiza-se a sintonia do controlador, que para o processo em estudo foi utilizado a sintonia de *Ziegler-Nichols*. Esta sintonia determina qual o tipo de controlador será utilizado para o processo.

A ideia básica desses controladores é ler um sensor, calcular a resposta de saída do atuador através do cálculo proporcional, integral e derivativo, e então, dependendo do processo, utilizar as ações necessárias para determinar a saída.

A sintonia do controlador pelo método de *Ziegler-Nichols* consiste em calcular os parâmetros de K_p , T_i ⁷, T_d ⁸ através de dois outros parâmetros, T e L , obtidos pelo gráfico da resposta natural. Encontra-se nesse mesmo gráfico, o ponto de inflexão da curva e nesse ponto traça-se uma reta tangente para determinar T e L , conforme Figura (8).

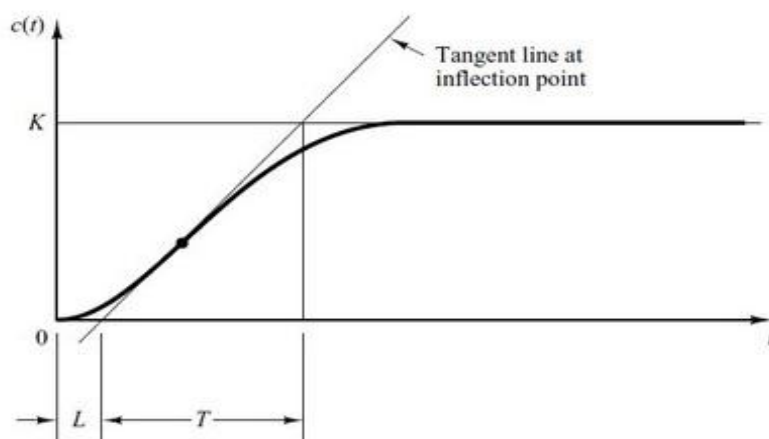


Figura 8 - Primeiro método de *Ziegler-Nichols*

⁷ T_i : Tempo integral. Tempo necessário para que a contribuição da ação integral iguale a da ação proporcional.

⁸ T_d : Tempo derivativo. Período de tempo antecipado pela ação derivativa relativamente à ação proporcional.

Para máxima eficiência na obtenção desses parâmetros, foi desenvolvido um programa no *MATLAB*®. Este programa faz a análise vetorial dos dados obtidos e a diferenciação do mesmo para obter o ponto de inflexão. Assim, os valores obtidos de T e L foram 0,051 e 0,050 respectivamente. Estes valores são referência para calcular K_p, T_i, T_d conforme demonstrado na tabela abaixo:

Tabela 1 - Cálculos dos parâmetros para cada tipo de controlador

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9.L/T$	$L/0,3$	0
PID	$1,2.T/L$	$2L$	$0,5.L$

Para aplicar o controle a esta planta, o processo foi implementado no *Simulink*, outro *toolbox* do *MATLAB*®, que possibilita a simulação do processo com a estrutura *PID* modificada. Os controladores foram criados nesse *toolbox* em série com processo, que é realimentado para que haja a atuação do controlador.

Finalmente, calculam-se todos os tipos de controladores e, a partir de uma análise gráfica, determinam-se quais ações de controle serão empregadas para determinar o tipo de controlador. Calculados, são representados pela Figura (8).

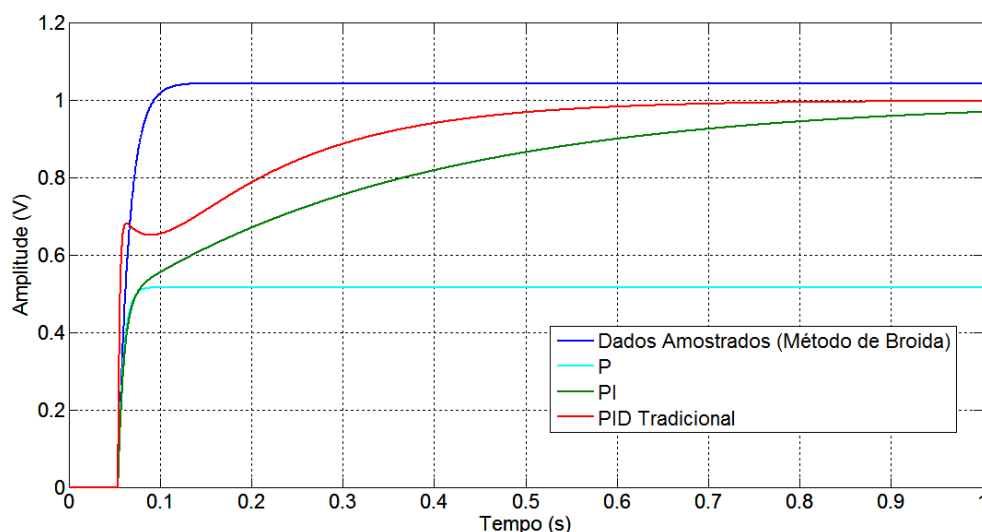


Figura 8 - Tipos de controladores sintonizados pelo método de *Ziegler-Nichols*

Pelo gráfico percebe-se que a estrutura *PID* tradicional tem melhor desempenho, pois não apresenta *overshoot*, e corrigindo o erro de valor final, mas com um amortecimento não tão satisfatório quanto o esperado. Uma análise sobre outras configurações do controlador *PID* permite verificar possíveis melhorias de desempenho. Dentre as estruturas existentes, foram estudadas as seguintes configurações: *PID* Série, *PI-D* e *I-PD*.

Em controladores reais, em vez do termo derivativo $T_d s$, é introduzido o filtro derivativo $T_d s / (1 + \gamma T_d s)$. Isto acontece para que não ocorra derivação da entrada de referência, que se por exemplo, for um degrau, envolverá como resultado uma função impulso.

O controle $PI-D$ coloca a ação derivativa somente no ramo de realimentação, para que a diferenciação ocorra apenas no sinal de realimentação, e não no sinal de referência. Já o controle $I-PD$ atua de forma mais segura, pois como é o caso, não é desejável a alteração da entrada em referência, e além de mover a ação derivativa para o ramo de realimentação, move também a ação proporcional.

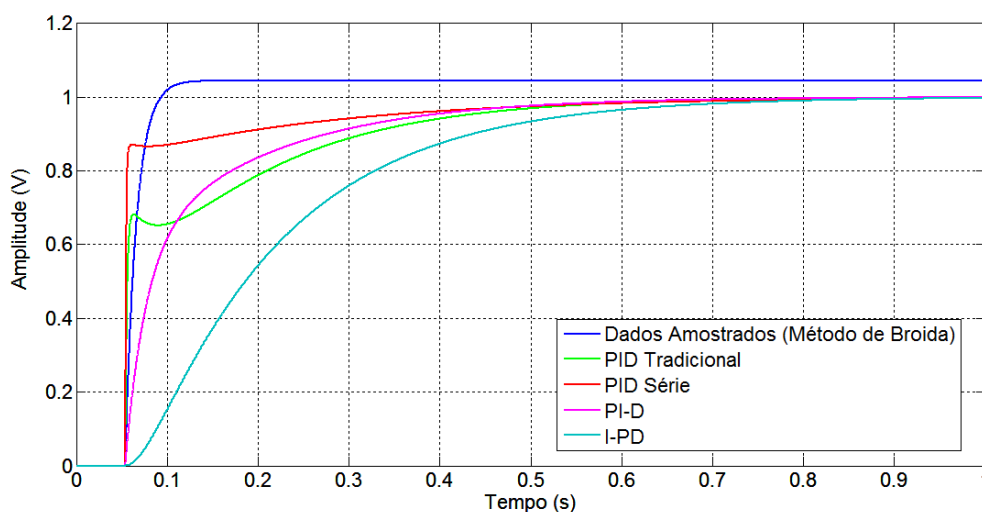


Figura 9 - Desempenho das diferentes configurações PID

Pela comparação das curvas, percebe-se que a estrutura $I-PD$ apresenta um maior amortecimento, sem *overshoot* e sem erro de valor final, não interferindo no tempo de acomodação, o qual permanece mínimo.

4. ANÁLISES DOS RESULTADOS

A melhor resposta para o sistema em questão é aquela que não possui *overshoot* e erro de valor final. Os parâmetros de comparação mais relevantes para análise deste sistema físico são amortecimento e tempo de acomodação, visto que o controlador PI (*Sisotool*), e o controlador $I-PD$ não apresentam *overshoot* e erro de valor final. O primeiro foi aplicado ao processo obtido pelo método computacional (linhas de programa) e o segundo controlador foi aplicado ao método de *Broida*.

Um fato relevante no primeiro método, é que o tempo de atraso ou tempo morto do sistema foi desconsiderado, tamanha quantidades de iterações realizadas para aproximação da resposta ao degrau do motor. Portanto, para a análise do controlador empregado, foi realizado um comparativo conforme Figura (10).

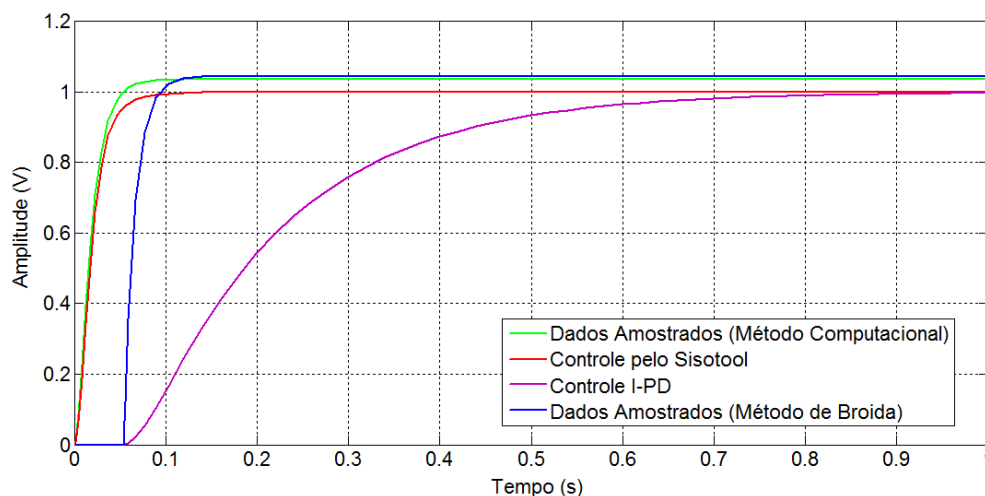


Figura 10 - Controlador obtido no *Sisotool* comparado com o controlador obtido pelo método de Ziegler-Nichols

A função de transferência do motor foi melhor identificada por métodos matemáticos, que neste caso foi o método de *Broida*. Sua identificação levou em consideração o tempo de atraso da resposta ao degrau e sua aproximação com os dados amostrados, ponto a ponto, obtidos no osciloscópio, validou a função de transferência encontrada neste método.

Levando em consideração as características elétricas e mecânicas do motor, o controlador *I-PD* mostrou uma resposta mais eficiente, pois apresenta um maior amortecimento. Fisicamente, isto implica em uma partida mais suave do motor gerando menor estresse mecânico, permitindo maior vida útil do atuador. Logo, este é o controlador que melhor atende ao sistema de içamento de cargas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O fator decisivo para escolha do controlador é constituído pela resposta ao degrau que apresenta o maior amortecimento, isto é, o controlador *I-PD*. Esta característica infere em uma partida suave no motor.

Em termos econômicos, este controlador pode substituir projetos de controle que utilizam acionamentos com inversores de frequência ou com chave *Soft-Stater*⁹, muito embora não sejam todos os *CLP*¹⁰ que possuem as estruturas *PID* modificadas.

6. REFERÊNCIAS

AGUIAR, M.; CUNHO JUNIOR, H. **Considerações sobre o controle de motores de corrente contínua (II)**. Mundo Elétrico, São Paulo, v.28, n.333, p.54-59, 1987.

⁹ Soft-Stater: equipamento eletrônico capaz de controlar a potência do motor no instante da partida, bem como sua frenagem

¹⁰ CLP: Controlador Lógico Programável



CASTRUCCI, Plínio; BITTAR, Anselmo; SALES, Roberto Moura. **Controle automático**. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos, c2011. xv, p. 13-49.

DABNEY, James B.; HARMAN, Thomas L. **Mastering Simulink**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004. 376p.

DORF, R. C., & BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Moderno**. 12 ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 2013, 819p.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. In: Controladores PID e controladores PID modificados. 5 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. p. 521-587.

IDENTIFICATION METHODS AND *PID* STRUCTURES APPLIED TO A LIFTING LOAD SYSTEM

Abstract: *The growing advance in technology and the actual need of information in diverse industrial fields enables the implementation of control and automation systems increasingly robust. Of the dilemmas faced by the modern automation, reability, security and optimization are essential in this sense, on a way that these systems deal with high amount of relevant information. However, to develop a project of automation is necessary to do the mathematic model identification of the process to realize simulations and thereafter execute the project. The proposal of this article is to show how the control actions were implemented for a load lifting system, which were conceived of two ways: by a model of approach based on “try and miss” method and by identification of the system using mathematics methods and models. The system is constituted of modeling a direct current motor using the MATLAB® software and the Broida method in order to control its speed, keeping the velocity constant along the process, apart the applied load to be lifted and obeying the mechanical and electrical characteristics of the motor. The PID controller is responsible for the linearity of the motor speed assuring the process efficiency.*

Key-words: *Lifting, Modeling, MATLAB, Broida Method, PID controller*