

CONTROLADOR PI AUTO-AJUSTÁVEL ATRAVÉS DO CONTROLE DE VARIÂNCIA MÍNIMA GENERALIZADA (GMV) APLICADO A UMA CORREIA TRANSPORTADORA

SAMUEL V. DIAS¹, LAURINDA L. DOS REIS², JOSÉ C. T. CAMPOS²

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Campus Maracanaú, Área da Indústria
Av. Contorno Norte, 10. Distrito Industrial. CEP: 61925-315. Maracanaú, CE, BRAZIL.
E-mail: samueldias@ifce.edu.br

² Universidade Federal do Ceará - UFC, Depto. de Engenharia Elétrica – DEE
Caixa Postal 6001, 60455-758. Fortaleza, CE, BRAZIL
E-mails: laurinda@ufc.br, teles@ufc.br

Abstract— The purpose of this paper is to show the potential application of Generalized Minimum Variance Controller (GMVC) for tuning conventional proportional-integral-derivative (PID) controllers applied to a speed control of a conveyor belt. Moreover, we presents a method based on signal PRAS (Pseudo Random Analog Sequence) to the accurate on-line modeling of a speed loop to conveyor belt. GMVC is a sub-optimal controller incorporating a performance index to tailor the closed loop behavior. The system performance is validated through implementation with good tracking and robust characteristics are obtained, using a conveyor belt based on experimental data collected in the LAMOTRIZ laboratory, from Federal University of Ceara. It also studied the influence of variations on the design parameters associated to the control techniques on tuning and performance of PID controllers with satisfactory experimental results.

Keywords— PID Control; Generalized Minimum Variance Control - GMVC; Conveyor Belt.

Resumo— A finalidade deste artigo é mostrar a aplicação do controlador de Variância Mínima Generalizado (“Generalized Minimum Variance” - GMV) para o ajuste de um controlador PID convencional aplicado ao controle de velocidade de uma correia transportadora. Além disso, apresenta-se um método baseado em um sinal randômico (“Pseudo Random Analog Sequence” - PRAS) para a modelagem em tempo real da malha de velocidade para a correia transportadora. O GMVC é um controlador sub-ótimo incorporando um índice de desempenho para modificar o comportamento de malha fechada. O desempenho do sistema é validado através da implementação com a obtenção de características de robustez e seguimento de referência adequada ao sistema da correia transportadora existente no laboratório da Universidade Federal do Ceará - LAMOTRIZ-UFC. Verificou-se também as variações no projeto dos controladores associados às técnicas de ajustes e desempenho de controladores PID, com resultados experimentais considerados satisfatórios.

Palavras-chave— Controle PID; Controle de Variância Mínima Generalizado; Correia transportadora.

1 Introdução

As indústrias são os maiores consumidores de energia elétrica do país, sendo responsáveis por cerca de 40,7% da energia consumida. Deste percentual os sistemas motrizes são os que mais consomem e que, no entanto, apresentam maior potencial de economia de energia elétrica (Medeiros, 2009). Portanto, o estudo de tais sistemas é imprescindível para ações de controle que visem à eficiência energética a nível industrial. Neste artigo, o sistema motriz que será utilizado é a correia transportadora ou transportador de correia instalada no Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes Industriais (LAMOTRIZ) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará - UFC.

A correia transportadora é o meio mais versátil e mais difundido para movimentação de cargas em instalações industriais (Dias, 2008). Possuem a característica de receber cargas e transportá-las de maneira praticamente contínua ao longo de um caminho precisamente definido. São consideravelmente fáceis de

serem automatizadas, possuem grande confiabilidade e se destacam por sua elevada produtividade e baixo custo operacional (Nogueira, 2004).

De um modo geral, as correias transportadoras industriais são acionadas por um motor de indução trifásico ligado diretamente a rede elétrica e, através de um acoplamento redutor, é possível multiplicar o torque nominal do motor. No entanto, nesta configuração o motor de indução que traciona a correia rotaciona em velocidade nominal durante todo o tempo, logo consumindo mais energia. Para que se possa trabalhar à velocidade variável, deve-se desacoplar o redutor preso ao eixo do motor e utilizar um inversor de frequência para o trabalho em baixas frequências.

Segundo Dias (2009), o estudo e implementação de técnicas de identificação aplicadas à correia transportadora são necessários para a criação de algoritmos de controle que visem à eficiência energética. Pesquisas de controle aplicadas a tais sistemas motrizes são desenvolvidas no trabalho de Tsai (1996), que apresenta o controle de posição da correia utilizando um controlador robusto para um ponto de operação fixo. Dias (2008) mostra resultados de simulação com a estratégia de controle LQG-LTR aplicado

no controle de velocidade, obtendo resultados satisfatórios.

No controle de processos, mais de 95% das malhas de controle são do tipo Proporcional-Integral-Derivativo (*PID*), sendo que muitas destas utilizam apenas o controle *PI* (Astrom, 1994). No entanto, devido à complexidade e não linearidades na dinâmica de vários processos industriais têm-se a necessidade de efetuar ajustes ao controlador tradicional com ganhos fixos, necessitando-se de um operador humano para ajustes da sintonia do controlador nos pontos de operação desejados.

A idéia da sintonia automática consiste em introduzir um algoritmo de controle com coeficientes que variam em função do tempo para que o controlador possa atender uma situação em particular (Wellstead, 1991). Vários estudos estão sendo feitos para se criar e/ou aprimorar algoritmos de controle adaptativos, entre os quais pode-se destacar o uso das leis do controlador de variância mínima generalizada (*GMV*) no cálculo dos parâmetros do controlador *PID* tradicional (Yamamoto, 2007), do controlador de variância mínima generalizada (*GMV*) aplicado a uma estrutura *RST* (Ramos, 2004, Laurinda, 2008), a utilização de um controlador fuzzy aplicado no controle de nível baseado em regras heurísticas obtendo respostas satisfatórias para diferentes condições de operação (Luz, 1997). E, finalmente, pode-se citar o trabalho de Zuben (1993) que utiliza redes neurais artificiais para desenvolver estratégias de controle adaptativo baseadas em identificação não-linear de sistemas dinâmicos e estimação não-linear de parâmetros.

Neste artigo, propõe-se a modelagem e identificação da malha de velocidade de uma correia transportadora que servirá como base inicial ao projeto do controlador *PI* adaptativo visando melhorar a eficiência energética do sistema. Foi utilizado o controle *GMV* para atualizar os ganhos do controlador *PI* proposto na estrutura *RST* (Wellstead, 1991). O sistema foi modelado como sendo do tipo *SISO* (*Single-Input Single-Output*), apresentando apenas uma variável de entrada e uma de saída. A partir da função de transferência do processo pode-se entender o comportamento da dinâmica do sistema, e através de análise experimental é possível comparar o controlador *PI* tradicional com o proposto, para validar o trabalho. Além disso, foi realizado experimentalmente o controle da esteira sem carga e com carga, e como forma de avaliar a influência do parâmetro de ponderação λ sobre a saída do controlador *PI-GMV* na estrutura *I+P*, foram efetuados vários ensaios sobre o processo variando-se o valor de λ . Os resultados obtidos são discutidos ao longo de todo o trabalho.

Portanto, este artigo apresenta na seção 2 a modelagem da esteira e a identificação da função de transferência que relaciona velocidade/tensão, na seção 3 apresenta o projeto do controlador *I+P-GMV* de velocidade e finalmente na seção 4 e 5 os resultados experimentais para validação da modelagem utilizada e as conclusões.

2 Modelagem do Sistema

2.1 Descrição do Sistema

Segundo Nogueira (2004), os transportadores de correia ou correias transportadoras são máquinas de transporte contínuas que apresentam baixo custo operacional, segurança, vida útil longa, versatilidade e praticamente uma faixa ilimitada de capacidade de carga. Portanto, são utilizadas em praticamente todas as indústrias para mover as mais diversas cargas.

A correia transportadora utilizada nos ensaios é visualizada na figura 1.



Figura 1. Correia Transportadora utilizada nos Experimentos

Pode-se observar na figura 2 que a modelagem da correia transportadora foi realizada baseando-se em um modelo *SISO*, onde a variável de entrada é um sinal de tensão analógica (0 a 5 volts) e a variável de saída é a velocidade de deslocamento deste sistema motriz (m/s). Existem outras variáveis intermediárias inerentes ao processo, entre o sinal de entrada e o de saída, como por exemplo, corrente elétrica de armadura do motor de indução trifásico, conjugado do motor, ruídos, perturbações etc que não são levadas em consideração neste tipo de modelagem.

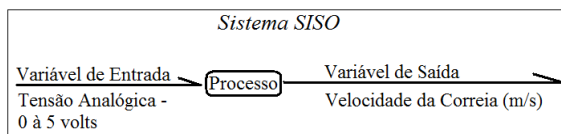


Figura 2. Sistema SISO

A partir da definição das variáveis do processo pode-se identificar o processo através de uma função de transferência ou equação paramétrica que represente fielmente a dinâmica do processo, que também serve como base para o projeto do controlador.

2.2 Identificação do Sistema

O sistema da correia transportadora foi identificado utilizando-se um modelo *ARX* (*AutoRegressive with External Input*) sem a presença de ruído adicionado ao sinal de saída, conforme mostrado na função de transferência discreta (Wellstead, 1991).

$$G(t) = \frac{\Delta y(t)}{\Delta u(t)} = z^{-d} \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (1)$$

Em que,

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{na} z^{-na} \quad (2)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{nb} z^{-nb} \quad (3)$$

onde $A(z^{-1})$ e $B(z^{-1})$ são polinômios cujos parâmetros podem ser encontrados por algoritmos de identificação de sistemas, como o estimador dos mínimos quadrados não recursivo utilizado neste trabalho.

A ordem do sistema é definida pela ordem dos polinômios n_a e n_b , respectivamente. Os valores dos parâmetros são encontrados através de ensaios em tempo real ou não e os resultados do modelo estimado são ponderados em função de uma variável estatística.

Portanto, a qualidade de um modelo estimado vai depender da forma e do tipo de sinal aplicado na entrada do processo. A literatura define vários sinais que podem ser aplicados, como a entrada em degrau que possibilita que o sistema trabalhe em um determinado ponto de operação, a entrada através do método do relé (resposta em frequência) que faz com que o sistema oscile em um ponto de operação, de onde pode-se obter os valores de K_u (ganho de oscilação) e T_u (período de oscilação) que servem de parâmetros para a sintonia de controladores PID. A entrada através do sinal *PRBS* (*Pseudo Random Binary Sequence*) que faz com que o sistema opere em função de dois níveis de tensão gerados aleatoriamente e em intervalos de tempo pré-definidos e, finalmente, a entrada através do sinal *PRAS* (*Pseudo Random Analog Sequence*) que possui as mesmas características do *PRBS*, porém com a vantagem de gerar valores aleatórios e uniformes dentro de um intervalo fechado $[a, b]$, sendo $a < b$.

Devido às características do sinal *PRAS*, foi possível gerar valores de velocidade aleatórios e uniformes dentro do intervalo fechado $[a, b]$, em que $a = 0.3$ e $b = 1.3$ m/s. A escolha deste tipo de sinal decorreu da vantagem de se poder excitar a planta em vários pontos de operação, permitindo posteriormente obter a partir destes dados um modelo muito mais condizente com a realidade do sistema físico (Rocha, 2008).

Os sinais de tensão são gerados e alterados de 1/2 em 1/2 segundo e são enviados através de uma placa de aquisição de dados ao inversor de frequência que alimenta um motor de indução trifásico de alto rendimento que irá promover o deslocamento da correia transportadora. Os valores de tensão e velocidade de deslocamento são armazenados em um banco

de dados que servirão de base para a identificação do sistema.

Foram implementados e testados modelos de estimação de 1ª, 2ª e 3ª ordens, respectivamente, utilizando o algoritmo de identificação dos mínimos quadrados não recursivo de onde foi possível encontrar uma função de transferência para cada modelo e verificar qual destes se adequava com maior precisão ao referido processo. Os resultados podem ser observados nas figuras 3, 4 e 5.

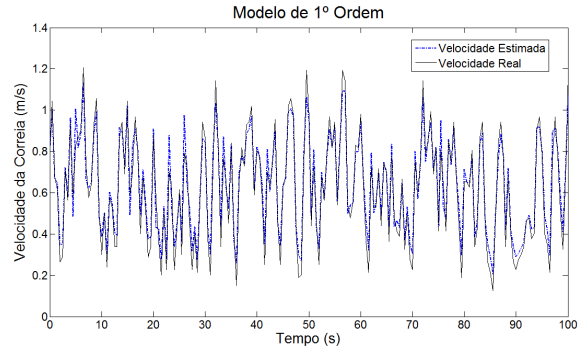


Figura 3. Modelo de 1º ordem

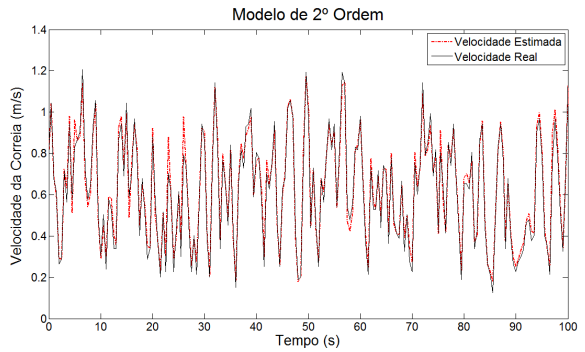


Figura 4. Modelo de 2º ordem

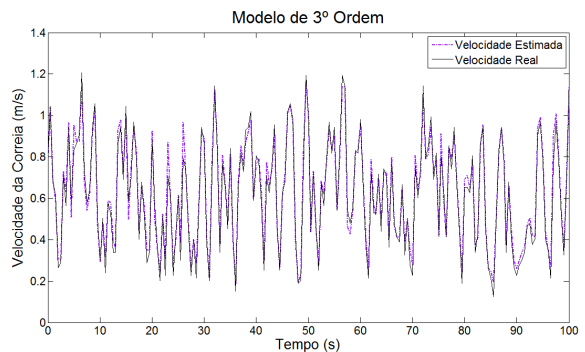


Figura 5. Modelo de 3º ordem

Os modelos estimados foram baseados em funções de transferências estritamente próprias para excluir a ligação direta entre o sinal de entrada e a saída do modelo. As figuras 3, 4 e 5 mostram que os modelos acompanham a velocidade real da correia transportadora obtendo erros de estimação de 24.21,

16.55 e 15.91 por cento, respectivamente, determinados pela equação (4).

$$Erro = \frac{\sqrt{\sum (y - y_{est})^2}}{\sqrt{\sum (y - \bar{y})^2}} \cdot 100 \quad (4)$$

onde *Erro* - representa o erro de modelagem, *y* - o vetor que armazena os valores de velocidade real, *y_{est}* - o vetor que armazena os valores de velocidade estimados e \bar{y} - a média aritmética dos valores reais de velocidade.

Apesar do modelo de 1ª ordem apresentar maior erro de estimação comparando-se aos outros dois casos, este foi utilizado por apresentar menor ordem, necessitando menores esforços computacionais durante a modelagem e validação, além de apresentar equações matemáticas simplificadas.

Finalmente, encontra-se a seguinte função de transferência do processo que servirá como base inicial para o projeto dos parâmetros do controlador, conforme observado na equação (5):

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{0,5841z^{-1}}{1 - 0,2887z^{-1}} \quad (5)$$

Em que, *y(t)* é a saída do processo (velocidade da esteira) e *u(t)* é o sinal de controle (tensão elétrica analógica).

3 Projeto do Controlador PI-GMV de Velocidade

Para efetuar o controle de velocidade da correia bem como validar a modelagem efetuada na seção 2, é utilizado um controlador do tipo *PI (Proportional-Integral)* adaptativo desenvolvido a partir do controlador de Variância Mínima Generalizada (*GMV*). O sinal de controle aplicado ao processo foi obtido em função da estrutura I+P apresentada na figura 6 e seus valores serão gerados em função da equação (6).

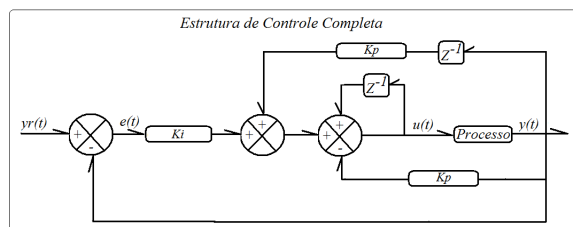


Figura 6. Estrutura de Controle I+P.

$$u(t) = u(t-1) + k_i y_r(t) - (k_i + k_p) y(t) + k_p y(t-1) \quad (6)$$

Em que, *u* representa o sinal de controle, *y* a saída do processo, *y_r* o valor do *setpoint* de *y*, *k_i* o ganho

integral e, finalmente, *k_p* o ganho proporcional do controlador.

Os valores de *k_i* e *k_p* são atualizados de forma recursiva a cada período de amostragem em função da minimização da função custo do controlador GMV, como apresentada na equação 7.

$$J_{GMV} = [P(z^{-1})y(t+d) - T(z^{-1})y_r(t) + \lambda \Delta u(t)]^2 \quad (7)$$

onde o polinômio $P(z^{-1})$ pode ser considerado um filtro, $T(z^{-1})$ ajusta o erro em regime permanente e λ pondera a magnitude do sinal de controle. A seleção destes parâmetros de projeto afeta a dinâmica do sistema controlado e são definidos de forma a posicionar adequadamente os pólos do sistema.

Inicialmente é preciso definir uma expressão matemática que defina os valores de *k_i* e *k_p* cuja sintonia é baseada na lei de controle GMV.

Multiplicando-se a equação (1) por $E(z^{-1})$, tem-se:

$$A(z^{-1})E(z^{-1})\Delta y(t) = z^{-d}B(z^{-1})E(z^{-1})\Delta u(t). \quad (8)$$

Considerando-se a seguinte identidade polinomial Diophantine tem-se:

$$P(z^{-1}) = A(z^{-1})E(z^{-1})\Delta + z^{-d}S(z^{-1}), \quad (9)$$

onde $n_e = d-1$ e $n_s = \max(n_a, n_b)$ definem a ordem dos polinômios $E(z^{-1})$ e $S(z^{-1})$, respectivamente. De acordo com a equação (5), tem-se que $d = 1$.

Substituindo-se a equação (8) em (9), tem-se:

$$P(z^{-1})y(t+d) = S(z^{-1})y(t) + B(z^{-1})E(z^{-1})\Delta u(t) \quad (10)$$

Finalmente, substituindo-se a equação (10) na equação (7), tem-se a nova função custo:

$$J_{GMV} = [S(z^{-1})y(t) - T(z^{-1})y_r(t) + \{B(z^{-1})E(z^{-1}) + \lambda\}\Delta u(t)]^2 \quad (11)$$

Minimizando a equação (11), pode-se encontrar a lei de controle GMV, onde o sinal de controle *u(t)* é calculado usando-se a estrutura RST (Wellstead, 1991):

$$\Delta u(t) = \frac{T(z^{-1})y_r(t) - S(z^{-1})y(t)}{R(z^{-1})} \quad (12)$$

onde,

$$R(z^{-1}) = B(z^{-1})E(z^{-1}) + \lambda \quad (13)$$

Para eliminar o erro de *offset* nas mudanças de *setpoint* e carga, Cameron (1983) sugere que seja introduzida uma ação integradora para eliminar este erro, conforme observado na equação (14).

$$R(z^{-1}) = B(z^{-1})E(z^{-1}) + \lambda = (1 - z^{-1})/\lambda \quad (14)$$

Da equação (6) e (12) e considerando-se a ordem dos polinômios, tem-se que:

$$\begin{cases} R(z^{-1}) = 1 \\ S(z^{-1}) = s_0 + s_1 z^{-1} \\ T(z^{-1}) = s_0 \end{cases} \quad (15)$$

Substituindo-se as equações (14), (15) na equação (12), tem-se uma nova expressão para o sinal de controle *GMV*:

$$\Delta u(t) = \lambda t_0 y_r(t) - \lambda s_0 y(t) - \lambda s_1 y(t-1) \quad (16)$$

E, finalmente, comparando-se as equações (6) e (16), tem-se os valores de k_i e k_p em função do controlador *GMV*, como sendo:

$$k_i = \lambda(s_0 + s_1) \quad (17)$$

$$k_p = -\lambda s_1 \quad (18)$$

A partir da equação (9) pode-se encontrar os valores de s_0 e s_1 como sendo,

$$s_0 = 1 - a_1 \quad (19)$$

$$s_1 = a_1 \quad (20)$$

onde o valor de a_1 é atualizado a cada período de amostragem através do algoritmo dos mínimos quadrados recursivo.

4 Resultados Experimentais

Para verificar o desempenho do controlador *PI-GMV* proposto foi implementado inicialmente um controlador *PI* tradicional de 1ª ordem, com parâmetros k_i e k_p fixos. Os parâmetros do controlador foram sintonizados com base no ganho final e frequência do sistema.

A partir de uma entrada de quatro degraus de 0.5, 0.8, 0.3 e 1.3 metros por segundo, respectivamente, foi possível verificar o desempenho do processo controlado.

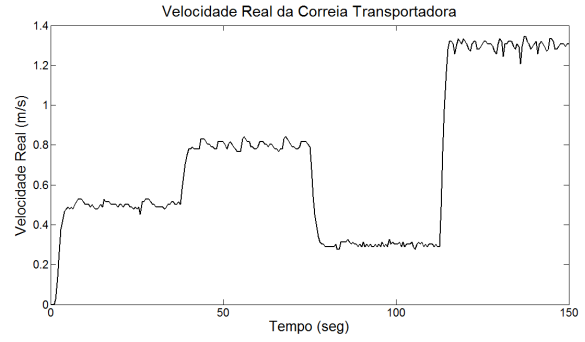


Figura 7. Controle PI tradicional

Pela análise da figura 7, pode-se constatar que o controle atendeu as especificações de velocidade de referência, no entanto ocorreram variações (oscilações) na velocidade da correia transportadora, principalmente em velocidades mais elevadas, que podem prejudicar o desempenho do processo. Logo, tornou-se necessária a implementação de outro tipo de controlador.

Utilizando-se o controlador *PI-GMV* e os mesmos valores de degrau do experimento anterior, foram obtidos os resultados apresentados na figura 8.

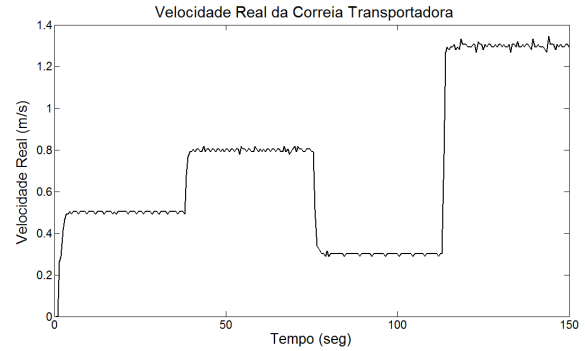


Figura 8. Controlador PI-GMV

Nesta estratégia de controle, foi constatado que a velocidade da esteira praticamente não oscilou e visualmente, no momento do ensaio, não foi notado nenhum tipo de oscilação da velocidade que pode ser percebida de forma audível pelo atrito entre a correia e sua superfície de apoio.

Foi realizado também um experimento com carga para verificar o desempenho do controlador nesta situação. Foi inserida uma entrada em degrau no sistema de 0,8 metros por segundo e os resultados são apresentados na figura 9.

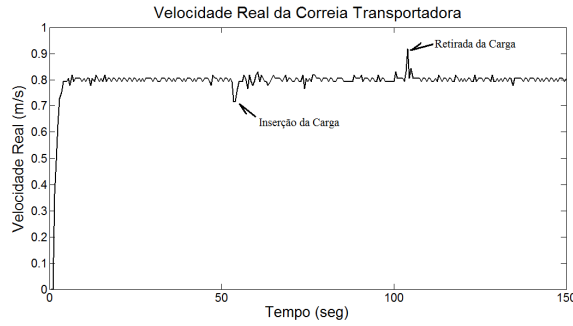


Figura 9. Ensaio com Carga

Observando-se a figura 9, pode-se notar que no momento da inserção da carga, ocorre uma redução de velocidade da correia transportadora que é compensada pelo aumento do sinal de controle que faz com que a velocidade volte ao valor de referência. Com a retirada da carga sobre o sistema, a velocidade tende a aumentar em decorrência do alívio de transporte. No entanto, a velocidade retorna ao seu valor de referência em função do decréscimo do sinal de controle. O comportamento do sinal de controle pode ser observado na figura 10.

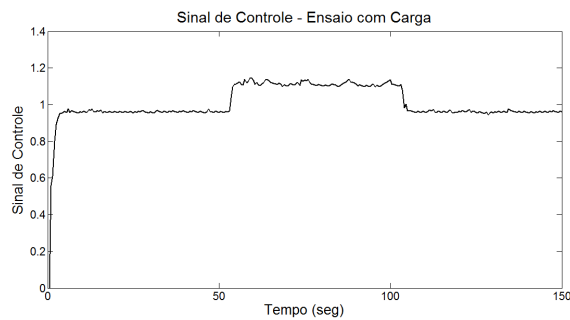


Figura 10. Ensaio com Carga

Portando, pode-se dizer que o controlador atua variando-se o sinal de controle com a finalidade de manter a variável de saída (velocidade da correia) em um valor de referência e isto só é possível devido a minimização da função custo.

A equação (11) mostra que o parâmetro de ponderação do sinal de controle λ é uma variável que influencia no desempenho do controlador e, portanto seu estudo é de fundamental importância, pois a sintonia correta desta variável influencia diretamente no comportamento do processo. Para verificar sua influência, foram efetuados vários ensaios onde seu valor foi alterado de 0,3 até 1,2. A figura 11 mostra a saída do processo para três valores específicos de lambda, no caso, 1,2, 0,7 e 0,3, respectivamente.

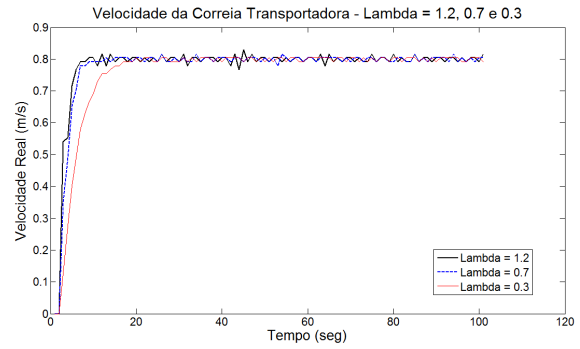


Figura 11. Resposta do Sistema p/ variação de λ

Para $\lambda = 1,2$, o sistema apresentou o mais baixo tempo de acomodação para entrar em regime de trabalho permanente, no caso em torno de 3,5 segundos. No entanto, neste caso, o sistema apresentou elevada tendência de oscilação na velocidade de saída do processo, portanto aumentando o esforço de controle para manter o valor do *setpoint* que implica em um maior consumo de energia elétrica. Para $\lambda = 0,3$, o controlador demorou cerca 9,8 segundos para atingir o valor de referência, em contrapartida foi o caso em que a velocidade da correia apresentou menor oscilação e menos esforço de controle. E, por fim, através de vários experimentos, foi encontrado o valor de $\lambda = 0,7$ como sendo o ideal ao processo em questão, pois apresentou um tempo para entrar em regime permanente de 3,6 segundos e oscilações aceitáveis ao referido sistema motriz, visualmente não foi notado nenhum tipo de oscilação na velocidade da correia de transportadora. Para valores de λ acima de 1,2 e abaixo de 0,3 o sistema motriz não entrou em funcionamento, pois o valor do sinal de controle gerado pelo I+P-GMV não foi suficiente para vencer as resistências inerentes ao deslocamento da correia transportadora e a inércia do sistema.

5 Conclusões

Neste artigo apresentou-se a modelagem da correia transportadora com o objetivo de se projetar um controlador PI com sintonia dos parâmetros baseadas na estratégia GMV para melhorar o desempenho do processo. A partir da aplicação do sinal PRAS e com o estimador dos mínimos quadrados encontrou-se o modelo que representa a velocidade/tensão do sistema da correia transportadora. O controlador proposto ajustou seus parâmetros de tal forma que o sistema controlado siga o valor de referência. Foi aplicado ao sistema uma entrada com múltiplos degraus que possibilitou fazer um comparativo entre o controlador PI tradicional e o PI com sintonia de parâmetros através do GMV com estrutura I+P, sendo este último o que obteve melhor desempenho. Finalmente, foi realizado um experimento com carga e foi possível concluir que o controlador I+P-GMV conseguiu manter a saída do sistema próximo ao valor de referência. Portanto, pode-se concluir que ao serem efetuadas variações

de velocidade no sistema ou realizar ensaios com e sem carga, os resultados mostraram que o sistema de controle de velocidade obteve resultados com seguimento da referência verificando-se que o sistema atende as especificações de funcionamento bem como a validação da modelagem para a malha de velocidade.

assignment controller with a PID structure. IEEE International Conference on Control Applications. USA.

Zuben, F. J. V. (1993). Redes Neurais aplicadas ao controle de máquina de indução. Tese de Mestrado. Unicamp. Campinas - SP.

Referências Bibliográficas

- Astrom, K. J.; Hagglund, T. (1994). PID Controllers: Theory, Design and Tuning. 2º edição.
- Cameron, F.; Seborg, D. E. (1983). A self-tuning controller with a PID structure. International Journal of Control.
- Dias, S. V.; Ramalho, G. L. B. (2009). Estimção da Velocidade de deslocamento de uma esteira transportadora utilizando redes neurais artificiais. IX ENPPG, IX ENICIT, III SIMPIT. Fortaleza – CE.
- Dias, J. H.; Lima, A. S.; Tostes, M. E. (2008). Uso do método LQG-LTR para o controle de velocidade em transportadores de correia visando a eficiência energética. INDUSCON – VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais. Poços de Caldas - MG.
- Laurinda, L. N. dos Reis; (2008). Modelagem e Controle Preditivo Aplicado a um Sistema de Aacionamento com Motor de Relutância Variável. Tese de doutorado. UFSC.
- Luiz, C. C.; Silva, A. C.; Coelho, A. A. R.; Bruciapaglia, A. H. (1997). Controle adaptativo versus controle fuzzy: um estudo de caso em um processo de nível. SBA Controle e Automação. Volume 8.
- Medeiros, C. (2009). Reportagem: Procel e CNI mostram em estudo oportunidades para eficiência energética na indústria. Procel Info. Rio de Janeiro - RJ.
- Nogueira, F. J. H. (2004). Correias Transportadoras – Guia Avançado. Procel Indústria. Rio de Janeiro – RJ.
- Ramos, M. A. P.; Márquez, E. Q. M.; Jiménez, J. T. (2004). Automatic Intelligent initialization for a modified generalized minimum variance controller. IEEEExplore. 5º Conference control Asian. Asian.
- Rocha, R. R.; Lopes, L. C. O.; Murata, V. V. (2008). Implementação e Avaliação de Técnicas de Identificação de Sistemas Lineares usando software livre. 4º Semana do Servidor e 5º Semana Acadêmica - UFU. Uberlândia - MG.
- Tsai, M. C.; Lee, C. H. (1996). Tracking control of a conveyor belt: design and experiments. IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 12, Feb.
- Wellstead, P.E.; Zarrop M.B. (1991). Self-tuning systems. John Wiley & Sons, England.
- Yamamoto, T.; Inoue, A.; Shah, S. L. (1999). Generalized minimum variance self-tuning pole-