

Controle de Velocidade de uma Correia Transportadora utilizando Controlador PI

Samuel V. Dias ¹, Laurinda L. N. dos Reis ², José C. T. Campos ²

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – IFCE – Campus Maracanaú
samueldias@ifce.edu.br

² Universidade Federal do Ceará – UFC – Departamento de Engenharia Elétrica – DEE
laurinda@ufc.br / teles@dee.ufc.br

Abstract - O artigo apresenta a identificação e o controle da malha de velocidade de uma correia/esteira transportadora a partir de uma entrada randômica e em degrau, respectivamente. O controlador foi projetado de forma que atenda as necessidades de desempenho e funcionamento do sistema como, por exemplo, manter a velocidade de deslocamento constante independente da carga ou ponto de operação. Os parâmetros do controlador proporcional-integral (PI) foram sintonizados a partir dos algoritmos propostos por Ziegler-Nichols. A estratégia de controle PI foi implementada no protótipo da correia existente no laboratório LAMOTRIZ-UFC. Um estudo comparativo foi realizado entre o sistema da correia sendo acionada através de um redutor de velocidade e através do controlador proposto visando a eficiência energética do processo. Os resultados de simulação e experimental são apresentados para a validação do modelo obtido com desempenho satisfatório.

I. INTRODUÇÃO

Em 2007, o Governo Federal, através do PAC – Plano de Aceleração do Crescimento, traçou planos e metas para o desenvolvimento econômico brasileiro incentivando o investimento privado, aumentando o investimento público em infra-estrutura e estimulando o crédito e financiamento [1]. Porém, em meados de 2008, uma crise econômica mundial provocou uma desaceleração na atividade industrial [2] e o Brasil enfrentou esta crise apresentando um crescimento robusto e sustentado por sua economia que pode ser observado através da projeção de aumento do PIB em 0,5% para 2009, 6% para 2010 e uma média de 5% para os anos seguintes até 2018. Em função destes números, o EPE (Empresa de Pesquisa Energética), ligado ao Ministério de Minas e Energia, estima que em 2010 o consumo total de eletricidade será de 455,2 mil gigawatts hora (GWh), ou seja, o equivalente a um aumento de 9,4% em relação a 2009 [1].

Do total da energia elétrica consumida pelo país, 40,7% são consumidas pelas indústrias sendo os sistemas motrizes os que mais consomem e que, no entanto, apresentam maior potencial de economia de energia elétrica [3]. Portanto, o estudo de tais sistemas é imprescindível para ações de eficiência energética a nível industrial. No caso, 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 UFC – Universidade Federal do Ceará.

O transportador de correia é o meio mais versátil e mais difundido para movimentação de carga em instalações industriais [4]. Possui a característica de receber cargas e transportá-las de maneira praticamente contínua ao longo de um caminho precisamente definido. Ele é consideravelmente fácil de ser automatizado, possui grande confiabilidade e se destaca por sua elevada produtividade e baixo custo operacional [5].

Além disso, uma linha de produção industrial está fadada ao insucesso se não assegurarmos um funcionamento impecável dos processos de transporte de matérias-primas, produtos semi-acabados e da produção terminada, em todas as fases da fabricação ao armazenamento [5].

Portanto, devido às características mencionadas, a esteira transportadora é um equipamento fundamental dentro de uma indústria. Logo, seu estudo e a implementação de técnicas de identificação de sistemas a estes dispositivos é necessária para a utilização de algoritmos de controle que visem à eficiência energética [6].

No entanto, as correias transportadoras são acionadas, de um modo geral, através de um redutor de velocidade que garante elevado torque ao sistema independente da carga. Tal operação inviabiliza o trabalho à velocidade variável e a implementação de algoritmos de controle de velocidade. Logo, o deslocamento da correia é realizado diretamente pela rotação do eixo do motor elétrico através do controle de velocidade proposto sem a presença do redutor.

Pesquisas de controle aplicadas a correias transportadoras são desenvolvidas como em [7], que apresenta o controle de posição da correia utilizando um controlador robusto em ponto de operação fixo. Já em [4], resultados de simulação são mostrados com a utilização da estratégia de controle LQG-LTR para efetuar o controle de velocidade obtendo-se resultados satisfatórios.

Neste artigo propõe-se a identificação da malha de velocidade de uma correia transportadora existente no LAMOTRIZ-UFC para o projeto de um controlador PI visando melhorar a eficiência energética do sistema. O artigo apresenta na seção II a introdução levando-se em conta a necessidade de se ter o controle de velocidade de tais sistemas. Na seção III apresenta-se a modelagem da esteira e a identificação da função de transferência que relaciona velocidade/tensão. A seção IV apresenta o projeto do

controlador PI de velocidade e finalmente nas seções V e VI são mostrados os resultados da simulação e da parte experimental para validação da modelagem utilizada e as conclusões.

II. MODELAGEM DO SISTEMA

A. Descrição do Sistema Físico

A Fig. 1 ilustra a correia transportadora do LAMOTRIZ – UFC que será utilizada nos experimentos deste trabalho.



Fig. 1. Correia transportadora utilizada nos experimentos.

O transportador de correia é modelado como um sistema *SISO* (*Single Input Single Output*), onde a variável de entrada será um sinal de tensão elétrica analógica de 0 a 5 volts e a variável de saída será a velocidade de deslocamento da esteira em m/s.

Para a obtenção da função de transferência deste sistema motriz, é preciso verificar o comportamento da dinâmica do mesmo através da inserção de um ou mais níveis de tensão na entrada do sistema e verificar os valores gerados de velocidade de deslocamento da esteira. A qualidade do modelo estimado depende em parte da natureza do sinal de entrada aplicado durante a fase de coleta das amostras [8].

Existem vários tipos de sinais que podem ser aplicados à entrada do sistema, como por exemplo, a entrada em degrau que possibilita que o sistema trabalhe em um determinado ponto de operação. Tem-se também a entrada através do método do relé que faz com que o sistema oscile em um ponto de operação, de onde se obtém os valores de K_u (ganho de oscilação) e T_u (período de oscilação) que servem de parâmetros para a sintonia de controladores PID. Além destes, tem-se o 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. Finalmente, tem-se o *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 $a < b$.

Portanto, para avaliar a dinâmica do processo aplica-se uma entrada do tipo *PRAS* com o intuito de excitar a planta em vários pontos de operação, permitindo posteriormente obter a partir desses dados um modelo muito mais condizente

com a realidade do sistema físico [9]. A Fig. 2 apresenta o sinal de entrada *PRAS* aplicado.

Os sinais de tensão são gerados e alterados de meio em meio 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.

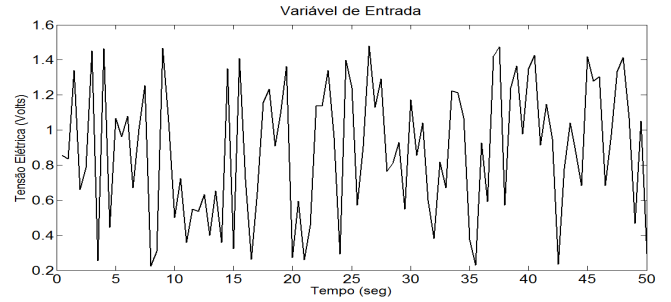


Fig. 2. Sinal de Entrada PRAS

B. Identificação do Sistema

O sistema é identificado utilizando-se um modelo do tipo *ARX* (*AutoRegressive with External Input*) sem ruído adicionado a saída e será representado pela seguinte equação discreta:

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

Em que os polinômios A e B são dados como,

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{na}z^{-na} \quad (2)$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_{nb}z^{-nb} \quad (3)$$

Efetuando-se manipulações matemáticas em (1), (2) e (3) pode-se encontrar a equação a diferenças do sistema como sendo:

$$y(t) = -a_1y(t-1) - \dots - a_{na}y(t-na) + b_0u(t-d) + b_1u(t-d-1) + \dots + b_{nb}u(t-d-nb) \quad (4)$$

A ordem do processo a ser identificado é definida pela ordem dos polinômios A e B, na e nb, e os coeficientes a_i ($i=1, \dots, na$) e b_j ($j=0, \dots, nb$) são encontrados a partir das medidas de entrada, $u(t)$, e saída, $y(t)$, do processo [8].

Para se obter a função de transferência discreta do sistema, utiliza-se o algoritmo dos mínimos quadrados *off-line* originado dos trabalhos de Gauss sobre estudos astronômicos. Trata-se de um dos estimadores mais conhecidos e utilizados nas mais diversas áreas da ciência e tecnologia [10].

Depois de efetuada a coleta de dados de entrada $u(t)$ e saída $y(t)$ do processo e com base no algoritmo dos mínimos

quadrados, foram construídos e testados modelos de primeira, segunda, terceira e quarta ordens que se adequassem ao sistema da correia transportadora, obtendo-se taxas de acerto, respectivamente, de 73.61%, 81.55%, 82.09% e 82.2%. Sendo estes valores encontrados a partir de (5).

$$Txacerto = \left[1 - \frac{|y - y_{est}|}{|y - media(y)|} \right] \times 100 \quad (5)$$

em que as variáveis y , y_{est} e $media(y)$ definem, respectivamente, velocidade real, velocidade estimada e média aritmética dos valores reais de velocidade coletados da correia transportadora.

De acordo com as taxas de acerto apresentadas, o modelo de primeira foi descartado por apresentar uma taxa inferior aos demais modelos. Os outros modelos apresentaram taxas de acerto bastante próximas, logo se escolheu o modelo de segunda ordem. Utilizando-se o modelo de segunda ordem é possível estimar a velocidade de deslocamento da correia cujo resultado pode ser observado na Fig. 3.

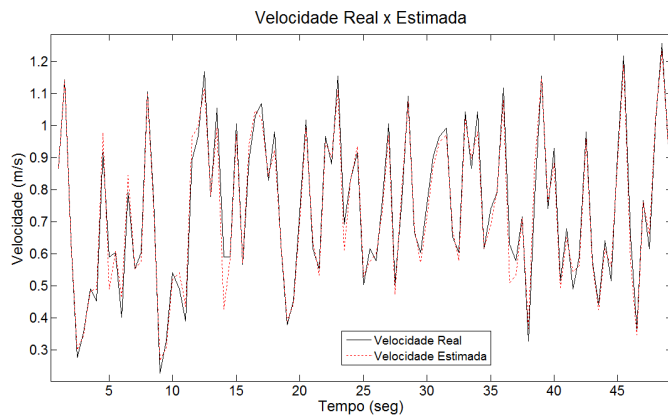


Fig. 3. Velocidade Estimada utilizando Modelo de terceira ordem

O modelo encontrado apresenta a seguinte equação a diferenças:

$$y(t) = 0,4025y(t-1) - 0,1613y(t-2) + 0,6165u(t) \quad (6)$$

A partir de (6), pode-se encontrar a função de transferência discreta da correia transportadora relacionando velocidade / tensão, que irá descrever a dinâmica do referido sistema.

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{0,6165}{1 - 0,4024z^{-1} + 0,1613z^{-2}} \quad (7)$$

III. PROJETO DO CONTROLADOR DE VELOCIDADE DA CORREIA TRANSPORTADORA

Para efetuar o controle da velocidade da correia bem como a validação da modelagem encontrada na seção II, é utilizado um controlador do tipo *PI* (*Proporcional-Integral*). A malha de controle que será utilizada no sistema motriz pode ser observada na Fig. 4.

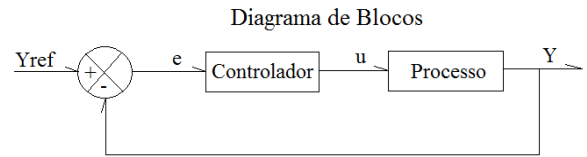


Fig. 4. Diagrama de Blocos com Controlador

De acordo com [11], este processo apresenta uma entrada, chamada de variável manipulada (u) e uma variável controlada ou de saída (y) que é medida por um sensor. Além destas entradas, o sistema apresenta uma referência ou *setpoint* (Y_{ref}) e um erro de controle (e), definido como a diferença entre Y_{ref} e Y .

O Controlador *PI* proposto será sintonizado utilizando o algoritmo de sintonia de Ziegler-Nichols utilizando a metodologia proposta por Chien, Hrones e Reswick (CHR) e Ziegler-Nichols modificado (ZNM).

Segundo [11], o algoritmo CHR faz a sintonia do controlador *PI* tendo como critério de projeto uma resposta rápida do sistema em função de uma entrada em degrau, tendo como consequência um *overshoot* no sinal de saída e o algoritmo ZNM realiza a sintonia baseada no ganho do sistema em estado permanente.

Após a sintonia dos controladores, foram encontrados as seguintes funções de transferência para CHR e ZNM, respectivamente:

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{-0,025 + 0,3927z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (8)$$

$$\frac{y(t)}{u(t)} = \frac{0,6975 - 0,3804z^{-1}}{1 - z^{-1}} \quad (9)$$

IV. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

Através de simulação, foi inserida no sistema controlado uma entrada em degrau para efetuar análise do comportamento da dinâmica do mesmo no domínio do tempo. Os resultados são apresentados nas Fig. 5 e 6.

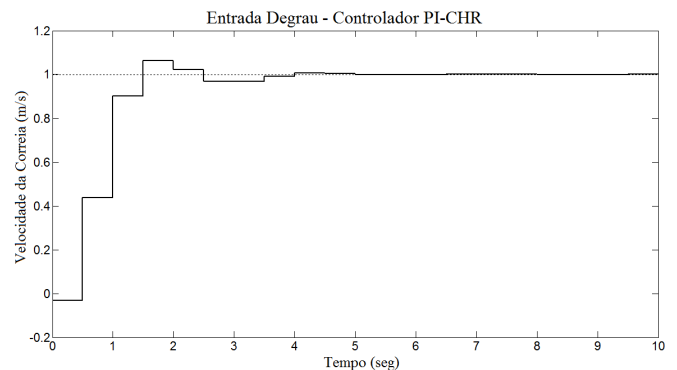


Fig. 5. Entrada Degrau - Controlador PI-CHR

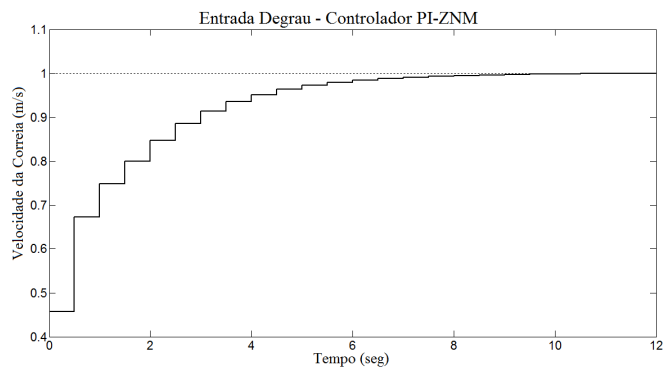


Fig. 6. Entrada Degrau - Controlador PI-ZNM

Observa-se na Fig. 5 que o esforço de controle na partida do sistema é bem mais elevado do que o apresentado na Fig. 6, em que no primeiro caso, o sistema atinge o regime permanente em torno de 3,25 segundos enquanto que no outro em 6,69 segundos, tempo este também considerado satisfatório conforme [12]. Além disso, no primeiro caso o sistema apresenta um *overshoot* de 6,16% em 1,5 segundos que é considerado satisfatório pra o processo em questão, além de possuir uma característica oscilatória na partida. A oscilação ocorre devido ao elevado sinal de controle gerado na partida para vencer a inércia e as resistências do sistema. No caso da Fig. 6, o sinal de controle aumenta gradativamente com o tempo e note que neste caso a saída do sistema não apresenta *overshoot*.

A partir da simulação observou-se que ambos controladores atendem com êxito o controle da correia, portanto torna-se viável a sua implementação *on-line* na planta. Para tal propósito, utilizou-se uma seqüência de quatro degraus de velocidade com valores de 0,5, 0,7, 0,3 e 1,0 m/s e taxa de amostragem de 0,5 segundos. O desempenho dos controladores *PI-CHR* e *PI-ZNM* são mostrados nas Fig. 7 e 8, respectivamente.

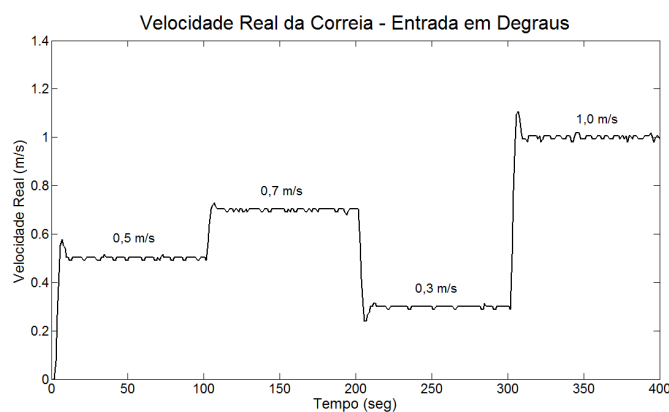


Fig. 7. Controlador PI-CHR.

A Fig. 7 mostra que nas mudanças de *set-points*, surgem picos de velocidades em decorrência do elevado sinal de controle gerado para mudar a faixa de velocidade de um determinado ponto de operação para outro. Portanto, essa mudança ocorre de forma mais rápida do que a encontrada no controle PI-ZNM apresentado na Fig. 8.

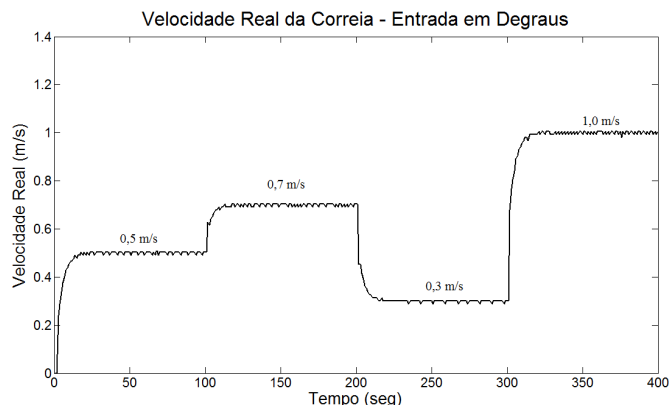


Fig. 8. Controlador PI-ZNM.

O desempenho do controlador apresentado na Fig. 8, mostra que a velocidade da correia, quando da mudança da referência, ocorre de forma suave, portanto consumindo um maior tempo para mudar de uma determinada faixa de operação para outra. Veja que não ocorrem picos de velocidade, pois os esforços de controle na mudança de velocidade são mais reduzidos se comparados ao controlador da Fig. 7.

Portanto, pode-se concluir que ambos controladores conseguem desempenhos satisfatórios de seguimento de referência, porém cada um com suas características particulares.

Finalmente, foram realizados ensaios com carga de 18 kg com o objetivo de visualizar o desempenho dos controladores no momento da inserção, operação e retirada da carga. Desta forma, aplicou-se um degrau de velocidade de 0,7 m/s e os resultados obtidos podem ser observados nas Fig. 9 e 11.

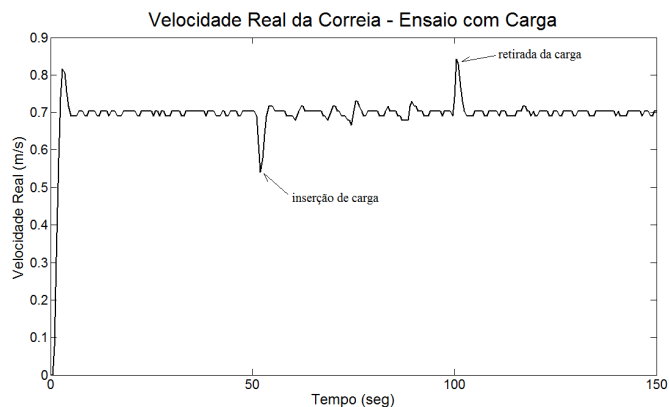


Fig. 9. Controlador PI-CHR.

De acordo com a Fig. 9, tem-se que ao inserir carga ao processo, ocorreu uma queda de velocidade a qual foi compensada com um aumento do sinal de controle feito através do controlador PI. Com a retirada da carga, aconteceu o contrário, a velocidade tendeu a aumentar e, devido à ação do controlador, a velocidade retornou ao valor de referência devido à diminuição do sinal de controle.

O comportamento do sinal de controle pode ser visualizado através da Fig. 10 que mostra que para manter a velocidade

de referência o controlador teve que aumentar o valor do sinal de controle.

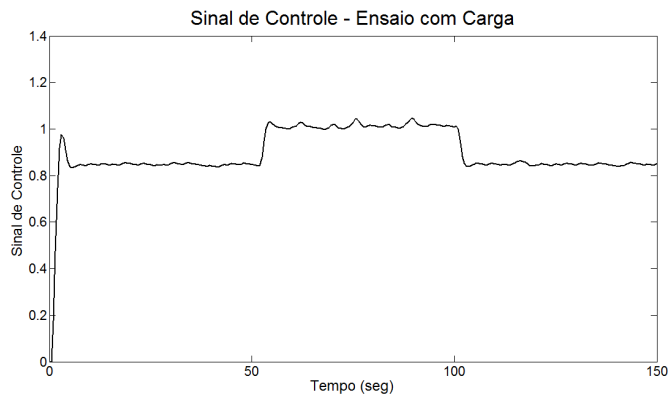


Fig. 10. Sinal de Controle – Controlador PI-CHR.

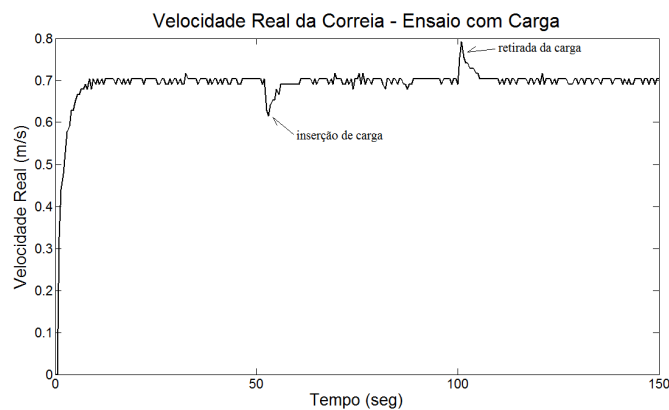


Fig. 11. Controlador PI-ZNM.

Comparando os picos de velocidade mostrados na Fig. 9 e 11, nota-se que no primeiro caso a base do pico é menor do que a encontrada no segundo caso, ou seja, o controlador PI-ZNM consome um maior tempo para fazer com que a velocidade da correia retorne ao valor de referência quando da inserção ou retirada da carga. Com relação ao sinal de controle, o controlador PI-ZNM apresentou desempenho mostrado na Fig. 12.

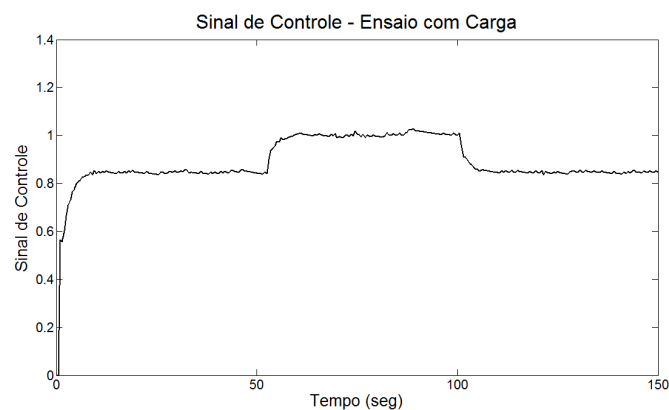


Fig. 12. Sinal de Controle – Controlador PI-ZNM.

Das Fig. 10 e 12, pode-se notar que no controlador PI-ZNM a partida do sistema é feita de forma lenta e suave, bem

como quando na inserção e retirada da carga o sinal de controle aumenta e diminui mais lentamente do que no controlador PI-CHR.

Finalmente, para verificar a eficiência energética do processo com controle de velocidade foram realizados dois experimentos, sendo o primeiro através da utilização de um redutor de velocidade que possibilita o deslocamento da correia a uma velocidade de 0,12 m/s e o segundo utilizando o controle de velocidade para seguir a mesma velocidade desenvolvida pelo sistema com redutor. No sistema com redutor de velocidade, o motor elétrico trabalha a rotação nominal e no sistema com controle de velocidade o motor gira apenas o necessário para deslocar a correia na velocidade pré-estabelecida. Como foram implementados dois controladores de velocidade, é válido afirmar que em regime de trabalho permanente o consumo de corrente elétrica no motor foi o mesmo.

A Fig. 13 mostra a corrente elétrica consumida pelo sistema nos dois experimentos e pode-se concluir que no sistema com controle de velocidade a corrente elétrica média obtida foi de 0,75 amperes, enquanto que no sistema com redutor o consumo médio foi de 1,64 amperes.

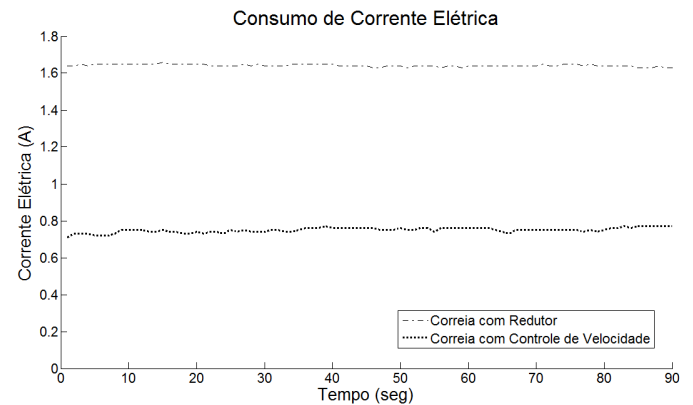


Fig. 13. Consumo de Corrente Elétrica

V. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentou-se a modelagem da correia transportadora com o objetivo de se projetar um controlador que atenda as necessidades do sistema. Neste caso, foram apresentados resultados simulados e experimentais para a validação da malha identificada utilizando-se entrada em degrau. Foram efetuadas variações de velocidade no sistema, além de ensaios com e sem carga. Em todos os casos os resultados mostraram que os dois sistemas de controle de velocidade obtiveram resultados com seguimento da referência verificando-se que o sistema atende às especificações de funcionamento bem como a validação da modelagem para a malha de velocidade. Por fim, através da observação dos valores de consumo de corrente elétrica, foi possível visualizar que a operação com controle de velocidade consumiu menos corrente do que na operação com redutor. Em ambos os casos, a velocidade de operação foi a mesma.

REFERÊNCIAS

- [1] Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Nota técnica: “Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos”. Ministério de Minas e Energia. Rio de Janeiro, 2009.
- [2] Lopes, R. Reportagem: “Indústria Brasileira já sente efeitos da crise econômica mundial”. Agência Brasil. Brasília, 2008.
- [3] Medeiros, C. Reportagem: “Procel e CNI mostram em estudo oportunidades para eficiência energética na indústria”. Procel Info. Rio de Janeiro, 2009.
- [4] Dias, J. H.; Lima, A. S.; Tostes, M. E. “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, 2008.
- [5] Nogueira, F. J. H. “Correias Transportadoras – Guia Avançado”. Procel Indústria. Rio de Janeiro, 2004.
- [6] Dias, S. V.; Ramalho, G. L. B. “Estimação da Velocidade de deslocamento de uma esteira transportadora utilizando redes neurais artificiais”. IX ENPPG, IX ENICIT, III SIMPIT. Fortaleza, 2009.
- [7] Tsai, M. C.; Lee, C. H. “Tracking control of a conveyor belt: design and experiments”. *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 12, Feb. 1996.
- [8] Coelho, A. A. R.; Coelho, L. S. “Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares”. Editora da UFSC. Florianópolis, 2004.
- [9] Rocha, R. R.; Lopes, L. C. O.; Murata, V. V. “Implementação e Avaliação de Técnicas de Identificação de Sistemas Lineares usando software livre”. 4ª Semana do Servidor e 5ª Semana Acadêmica - UFU. Uberlândia, 2008.
- [10] Aguirre, L. A. “Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-lineares aplicadas a Sistemas Reais”. 2ª ed. UFMG. Belo Horizonte, 2004.
- [11] Astrom, K.; Hagglung, T. “PID Controllers: Theory, Design and Tuning”. 2ª ed. 1994.
- [12] Ogata, K. “Engenharia de Controle Moderno”. 4ª ed. Pearson Prentice Hall. São Paulo, 2003.