

CORREIAS TRANSPORTADORAS: UM ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA O ACIONAMENTO A VELOCIDADE VARIÁVEL

FRANCISCO RODRIGO P. DE MAGALHÃES, RICARDO S. T. PONTES, RAFAEL O. DE SOUSA, DAVI N. OLIVEIRA E FRANCISCO EUDES O. BARROZO

Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Ceará

Caixa Postal 6001, Campus do PICI, Bloco 705, CEP: 60455-760, Fortaleza, Ceará, Brasil

E-mails: rodrigo@dee.ufc.br, ricthe@dee.ufc.br, rafael_oliveira@dee.ufc.br, davi@dee.ufc.br, eudesob@dee.ufc.br

VICTOR P. B. AGUIAR

NTC – Núcleo de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia e Física, Universidade Federal de Rondônia

Campus de Porto Velho, CEP: 78900-000, Porto Velho, Rondônia, Brasil

E-mail: victor@unir.br

Abstract— This paper aims to present a study case using a induction motor drove by speed variation on a conveyor belt plant and compare the results acquired experimentaly with the values estimated through mathematical modeling as well as presenting the error among them to validade the used method. It has been used for the purpose of result, the interpolation method through the software Matlab®.

Keywords— Conveyour belt, energy efficiency, industrial automation, variable speed drive.

Resumo— O presente trabalho objetiva apresentar um estudo de caso utilizando o acionamento de um MIT com variação de velocidade em uma planta de correias transportadoras e comparando os resultados obtidos experimentalmente com os valores estimados através de modelagem matemática bem como apresentação dos erros entre eles para validar o método adotado. Foi utilizada, para fins de resultado, método de interpolação via software Matlab®.

Palavras-chave: Correia transportadora, eficiência energética, automação industrial, acionamento a velocidade variável.

1 Introdução

Há, desde a última crise energética ocorrida em 2001, uma maior preocupação, por parte dos governantes, dos problemas que técnicos e engenheiros da área do setor elétrico já haviam alertado a respeito do acelerado crescimento do consumo das últimas décadas (Fig.1). Ocorrido o fato, e temendo com o risco constante de novos “apagões”, o Ministério de Minas e Energia intensificou, juntamente com a Eletrobrás como seu órgão de vinculação, ações que visam o uso racional de energia elétrica na indústria, no comércio e no setor residencial.

Destas áreas, a que representa o maior consumo em percentual (47%) é a indústria, segundo Balanço Energético Nacional em relação ao ano de 2006. Porém, em sua grande parte esse valor é representado pela utilização de motores: a força motriz.

Dentro das principais cargas acionadas por motores e com potencial de economia de energia dentro da indústria, destacam-se as máquinas centrífugas: compressores, ventiladores/exaustores e bombas centrífugas. Há, ainda dentro da indústria, uma parcela reduzida de consumo de energia associada às máquinas de ação contínua ou, correias transportadoras.

CONSUMO DE ELETRICIDADE - TWh

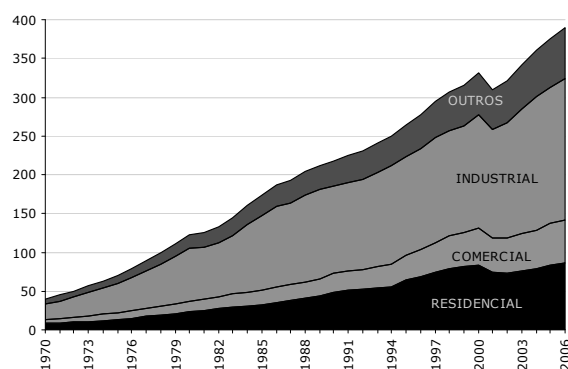


Figura 1. Gráfico do Consumo de Eletricidade (Fonte: Balanço Energético Nacional de 2007).

Os grandes transportadores são utilizados para mover os mais diversos materiais granulados (grãos, areia, brita, minério entre outros) percorrendo consideráveis distâncias. Em contrapartida, as esteiras de menor porte aplicam-se em processos fabris e no comércio varejista e atacadista.

Os processos de transporte não se limitam apenas a mover materiais de um lugar para outro, mas também estão incorporados conceitos de logística onde há seletividade e prioridade automática de car-

gas para cada situação apresentada. Portanto, a automação industrial se apresenta como solução aplicada.

Atualmente, os estudos em eficiência energética vão para além da substituição de equipamentos e partem para diagnósticos internos de cada processo, onde se buscam ações cada vez mais criteriosas para a otimização e racionalização do uso da energia elétrica. Com isso, os resultados apresentados em estudos anteriores, já saturados, dão lugar aos casos especialistas.

2 LAMOTRIZ: Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes

O Lamotriz da Universidade Federal do Ceará - UFC foi concebido pelo Departamento de Engenharia Elétrica da UFC com o apoio financeiro da Eletrobrás e inaugurado em 2006. Dispõe de cinco diferentes plantas industriais para estudos de eficiência energética. São elas: bombas hidráulicas, compressor, correias transportadoras, ventiladores axial e radial e bancada para motores do tipo padrão e de alto rendimento.

2.1 Bancada das Correias Transportadoras

Aqui, de onde foram realizados os ensaios para este trabalho, encontra-se quatro esteiras formando um percurso fechado totalizando 10,8 metros de extensão (Fig.2). O acionamento independente é realizado via inversor de frequência ou do modo convencional: utilizando redutores de velocidade nas saídas dos eixos dos motores de indução.

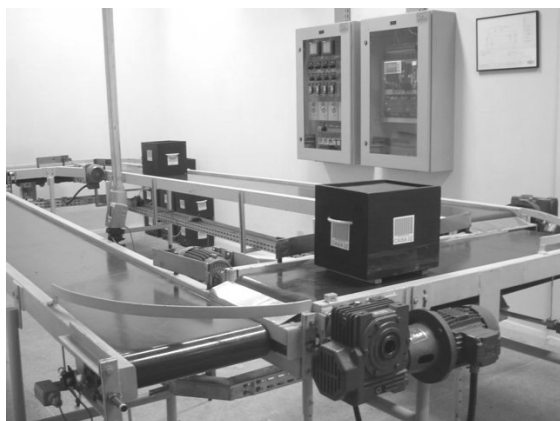


Figura 2. Bancada das Correias Transportadoras do Lamotriz – UFC.

A planta possui uma leitora de código de barras (scanner) para identificação e controle das cargas, sensores indutivos, sensores de temperatura e encoders.

2.2 Automação Industrial

A aquisição de dados, o monitoramento e controle de variáveis são etapas importantes no estudo de sistemas industriais. Para isso se dispõe de sensores e atuadores, que em conjunto com os controladores e um banco de dados fornecem informações sobre o sistema estudado.

No sistema em estudo, têm-se um multimedidor de grandezas elétricas, sensores indutivos, além de um painel de comando de motores que permite realizar o acionamento dos motores por inversores de frequência ou por partida direta.

Além da comunicação e integração entre os dispositivos acima citados, o controlador principal, no caso um controlador lógico programável (CLP), comunica-se com um sistema supervísório.

2.3 Controlador Lógico Programável

A planta em estudo possui como elemento central um CLP Siemens da família S7-200. Pelo fato de ser um CLP modular, foram acrescentados módulos de expansão de entradas e saídas analógicas e digitais, além de um módulo mestre para comunicação em rede AS-I (Actuator/Sensor-Interface).

2.4 Rede de Comunicação

O sistema é dotado de uma rede que utiliza o protocolo Modbus. A rede possibilita a comunicação entre os elementos da planta e a coleta de dados para um software supervísório. O protocolo Modbus é uma estrutura de mensagem desenvolvida pela Modicon em 1979, usada para estabelecer comunicação entre dispositivos mestre-escravo / cliente-servidor.

Integrados à rede Modbus estão os CLPs, inversores de frequência e os multimedidores de grandezas elétricas. Os dados são colhidos por um sistema supervísório e armazenados em um banco de dados.

O sistema ainda incorporou uma rede AS-I que é um sistema que permite a conexão entre o controlador e o mais baixo nível em sistemas de automação. Seu meio físico é composto por um par de cabos responsáveis por transmitir a alimentação necessária ao funcionamento dos periféricos e possibilitar a comunicação entre o mestre e os dispositivos. Por essa característica a rede AS-I, comparativamente a outros sistemas, permite a redução do volume de cabeamento necessário e, conseqüentemente, dos custos do projeto.

Como padrão aberto e sendo adotado por diversos fabricantes de dispositivos de campo, a rede AS-I possui grande escala de aplicação.

Ao módulo mestre da rede presente na planta estão associados sensores e dispositivos de sinalização. A estrutura da rede tem como vantagem a possibilidade de inserção de novos dispositivos sem a neces-

sidade de incremento ou alteração na estrutura física do controlador.

2.5 Sistema Supervisório

A planta em estudo possui uma associação com o software Elipse E3 como ferramenta de supervisão e controle do processo. O E3 é um sistema SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) totalmente voltado à operação em rede e aplicações distribuídas. Os sistemas desenvolvidos sobre o E3 geralmente partem da coleta de dados em tempo-real de equipamentos de aquisição de dados e/ou controle, como os CLPs, UTRs (Unidades Terminais Remotas), DAQs (Placas de Aquisição de Dados), dentre outros dispositivos. Para o estudo foram utilizados drivers de comunicação Modbus para conexão com o CLP, multimetedor e inversores de frequência, e um driver de comunicação ASCII (American Standard Code for Information Interchange) para comunicação com um leitor de código de barras.

O E3 lê e escreve dados dos equipamentos através de módulos (drivers de comunicação) que implementam o protocolo (de Domínio público ou privado) disponível em cada um destes equipamentos. Estes drivers podem, ainda, estar em um formato próprio da Elipse Software ou no formato OPC (OLE for Process Control). De posse dos dados, é possível exibir, analisar, controlar, comandar, gravar ou divulgar tais informações em telas, listas de alarmes e eventos, históricos ou relatórios.

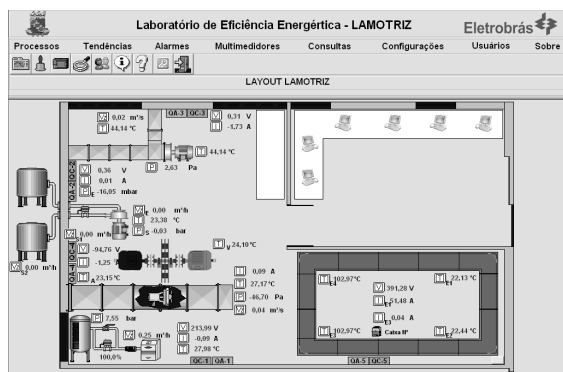


Figura 3. Tela do sistema supervisório do Lamotriz.

O software supervisório (Fig. 3) também está integrado a um banco de dados do tipo SQL (Structured Query Language ou Linguagem de Consulta Estruturada), o qual armazena os valores das grandezas lidas periodicamente. Isso permite a elaboração de relatórios e a consulta de valores em períodos específicos.

3 Acionamento e Eficiência Energética

A busca da eficiência energética nos sistemas motrizes vem sendo o foco de muitos gestores de manufatura nos últimos anos. São diversas as formas de

acionamento das máquinas elétricas para aplicações industriais. As técnicas mais empregadas e as funcionalidades de cada uma serão descritas a seguir com destaque para o uso em plantas do tipo correias transportadoras.

3.1 Acionamento por Dispositivos Mecânicos

Em sistemas de correias transportadoras, o mecanismo mais utilizado como forma de acionamento é através de redutor de velocidade ou simplesmente, redutor. Além de confiáveis, estes equipamentos permitem que se mantenha o torque elevado e constante para uma variação sensível de carga. A limitação desse tipo de acionamento é que a velocidade de ponta de eixo entregue pelo redutor de velocidade é constante e determinada pela relação de transformação pré-definido pelo fabricante.

3.2 Acionamento por Dispositivo Eletrônico

Atualmente, a demanda na fabricação de produtos em um tempo cada vez menor exige uma maior flexibilidade por parte dos processos industriais. Com essa filosofia, a automatização aliada aos dispositivos de variação de velocidade (inversores de frequência) vem a atender esta condição possibilitando, além de uma maior produtividade, em muitos casos, ganhos relevantes de eficiência energética quando comparados com acionamentos mecânicos tradicionais.

Como benefício dessa modalidade de acionamento, a planta ganha nas atuações desempenhadas junto ao processo como aceleração e frenagem de cargas, paradas e correção de trajetórias.

4 Ensaios e Resultados

O ensaio foi realizado utilizando-se a bancada das correias transportadoras do Lamotriz - UFC onde foram levantados dados de potência ativa a frequência variável para algumas cargas com pesos pré-definidos para utilização na planta.

Os valores foram definidos para cargas com pesos de 0kg, 3kg, 6kg, 9kg, 12kg e 15kg e variamos a frequência de 1Hz a 9Hz. Acima desses valores, a coleta de dados se torna inviável dada às condições experimentais, entre eles: o espaço físico, a velocidade linear da própria esteira que, a 9Hz já é de 1,3 m/s (velocidade esta considerada elevada para ambientes industriais) e também a manipulação das cargas sem auxílio de equipamento específico para o carregamento sobre a esteira.

O gráfico com os valores levantados experimentalmente, com destaque para a linha tracejada representando o consumo da planta pelo acionamento pelo redutor, pode ser verificado na figura 2.

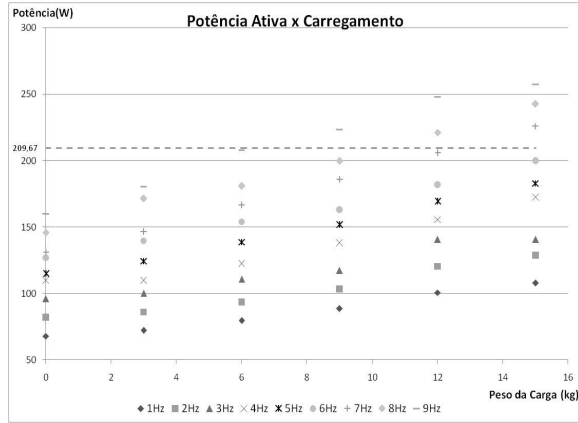


Figura 4. Gráfico Potência Ativa x Carregamento (em função do peso da carga).

Nota-se que para até 6kg, há um potencial de economia de energia utilizando-se inversores de frequência para todos os valores estudados (0 a 9 Hz) em comparação com o acionamento com redutor de velocidade padrão.

Com os dados levantados, determinamos com o auxílio da ferramenta Matlab® (que utiliza o método dos mínimos quadráticos) a função interpoladora dos pontos do gráfico para cada valor da frequência.

Com isso, apresentamos um polinômio para cada frequência fixa em função do peso da carga (representada pela variável x e dado em kilograma) de acordo com as equações de (1) a (9):

$$P_{(1Hz)} = 0,0615x^2 + 1,8964x + 67,0357 \quad (1)$$

$$P_{(2Hz)} = 0,1210x^2 + 1,4798x + 81,2500 \quad (2)$$

$$P_{(3Hz)} = 0,0635x^2 + 2,4190x + 94,2857 \quad (3)$$

$$P_{(4Hz)} = 0,2718x^2 + 0,3036x + 108,9643 \quad (4)$$

$$P_{(5Hz)} = 0,0615x^2 + 3,7250x + 114,3214 \quad (5)$$

$$P_{(6Hz)} = 0,0893x^2 + 3,4226x + 127,9643 \quad (6)$$

$$P_{(7Hz)} = 0,0397x^2 + 5,7952x + 130,4286 \quad (7)$$

$$P_{(8Hz)} = 0,0556x^2 + 5,3667x + 149,0000 \quad (8)$$

$$P_{(9Hz)} = -0,1409x^2 + 8,8274x + 158,2500 \quad (9)$$

A partir da interpolação dos pontos determinou-se o erro inerente ao próprio processo iterativo de acordo com a equação (10) para cada valor levantado experimentalmente e cada valor calculado através dos polinômios. Os resultados desses erros podem ser observados na tabela 1.

$$\varepsilon = \left| \frac{Potência_{MED} - Potência_{CALC}}{Potência_{MED}} \right| \times 100 \quad (10)$$

Tabela 1. Erro absoluto entre valores calculados (em função do peso) e os obtidos experimentalmente.

P(kg)	Frequência (Hz)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,44%	0,92%	1,82%	0,95%	0,59%	0,75%	0,44%	2,01%	1,11%
3	1,29%	0,90%	2,07%	2,07%	1,09%	0,46%	1,01%	3,67%	1,71%
6	1,19%	0,86%	0,37%	1,74%	0,08%	1,51%	0,02%	1,20%	0,90%
9	0,47%	1,00%	3,19%	3,45%	0,54%	1,61%	0,11%	0,89%	1,16%
12	2,05%	3,35%	6,20%	2,59%	1,07%	0,06%	0,15%	0,03%	1,69%
15	1,21%	1,53%	2,89%	1,15%	0,38%	0,30%	0,02%	0,41%	0,63%

A tabela comprova que apenas 9,26% dos pontos estão acima de 3% ($\varepsilon \geq 0,03$). Com isso, os dados obtidos demonstram validar os polinômios a fim de se obter pontos não levantados dentro da faixa de amostragem considerada.

De forma análoga, levantamos os mesmos pontos, porém, em função da frequência. A curva obtida é apresentada a seguir:

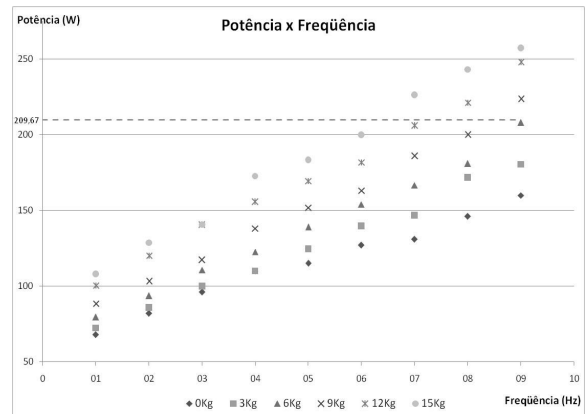


Figura 5. Gráfico Potência Ativa x Frequência de operação.

Como foi realizado para o caso anterior, interpolamos as curvas e calculamos os erros dos valores obtidos experimentalmente. Porém, a variável x , para esse caso, está em função da frequência e não mais do peso das cargas como anteriormente.

$$P_{(0kg)} = -0,1786x^2 + 12,5690x + 57,8095 \quad (11)$$

$$P_{(3kg)} = 0,1808x^2 + 11,7261x + 61,3500 \quad (12)$$

$$P_{(6kg)} = 0,2980x^2 + 12,3308x + 68,3931 \quad (13)$$

$$P_{(9kg)} = 0,2965x^2 + 13,5741x + 75,2579 \quad (14)$$

$$P_{(12kg)} = 0,2676x^2 + 14,8129x + 89,0562 \quad (15)$$

$$P_{(15kg)} = -0,1159x^2 + 20,1413x + 87,4069 \quad (16)$$

Novamente, determinadas as equações pelo método dos mínimos quadráticos, calculamos a partir dos pontos medidos e os comparamos através dos erros.

Tabela 2. Erro absoluto entre valores calculados (em função da frequência) e obtidos experimentalmente.

P(kg)	Frequência (Hz)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	4,51%	1,20%	0,40%	3,55%	1,61%	0,92%	4,83%	1,41%	1,14%
3	0,03%	1,47%	4,03%	1,06%	1,24%	0,59%	2,71%	0,68%	1,07%
6	0,49%	0,25%	2,79%	1,56%	1,01%	0,91%	1,58%	1,56%	1,29%
9	0,05%	0,75%	2,15%	0,44%	1,52%	0,82%	0,54%	0,50%	2,19%
12	5,27%	2,77%	2,54%	0,55%	1,14%	3,02%	0,08%	1,46%	0,07%
15	1,76%	2,71%	1,31%	5,15%	0,64%	2,30%	1,60%	0,37%	0,13%

Nota-se que, neste caso, existem somente dois pontos acima de 5% ($\epsilon \leq 0,05$).

Para verificar os polinômios obtidos, tomamos, experimentalmente, dois pontos fora das curvas padrões já apresentadas e comparamos com um valor calculado com o auxílio das equações. São eles:

Tabela 3. Pontos aleatórios fora dos padrões levantados.

	P(kg)	f(Hz)	P(W)
Caso 1:	7,725	4,500	138,000
Caso 2:	7,725	6,750	177,000

Caso 1: Tomam-se as equações (4) e (5) para peso de carga $x = 7,725$ e dos resultados, toma-se a média aritmética. Assim:

$$P_{(4Hz)} = 127,529W$$

$$P_{(5Hz)} = 146,767W$$

$$P_{(4.5Hz)} = 137,15W$$

Caso 2: Tomam-se as equações (14) e (15) para frequência de $x = 6,75$ e dos resultados, tomam-se subseqüentes médias aritméticas para um valor referente ao peso aproximado de 7,875kg afim de se obter a estimativa para 7,725kg (utilizado no experimento). Assim:

$$P_{(6kg)} = 165,2036W$$

$$P_{(9kg)} = 180,3923W$$

$$P_{(7,875kg)} \cong P_{(7,725kg)} = 174,69W$$

Para o *caso 1* erro verificado é de 0,62% o no *caso 2*, 1,30% o que demonstra a validade das equações apresentadas.

Concluimos, portanto, que, para uma determinada faixa de valores de ambos os casos, o consumo requisitado pela rede ao se utilizar inversores de frequência é inferior ao uso de partida direta com redutor de velocidade, o que também pode ser observado facilmente pelos gráficos das figuras 1 e 2 tendo como referência a linha tracejada indicada como o consumo por utilização deste dispositivo.

5 Conclusão

Os resultados experimentais preliminares apresentados demonstram que há potencial de eficiência energética em plantas de correias transportadoras operando em baixas velocidades, através da utilização de inversores de frequência quando comparada com a utilização de redutor de velocidade, acionamento padrão empregado na indústria.

Observa-se também a possibilidade de aliarem-se os conceitos de automação industrial com a eficiência energética, que, para uma determinada faixa de velocidade da correia, poder-se-ia programar configurações e rotinas tais como: aceleração e desaceleração e frenagem em função do tipo de carga que apresentassem um menor consumo de energia quando comparada ao acionamento mecânico com velocidade fixa.

Além disso, a modelagem matemática demonstrou sua validade como forma de se estimar dados calculados para um erro aceitável.

Também foi evidenciado, observando os termos independentes das equações (1) - (16), que há perdas iniciais inerentes às forças resistentes do processo, portanto, quando focamos eficiência energética, também é imprescindível a manutenção preventiva de rolamentos e outros dispositivos mecânicos bem como a troca do óleo lubrificante dos redutores segundo indicação do fabricante. Um adequado sistema de limpeza e a verificação de partículas junto às partes móveis do sistema, também são imprescindíveis dentro da manutenção preventiva em um programa de eficiência energética na indústria.

Agradecimentos

Agradeço ao LAMOTRIZ/UFC pela estrutura fornecida para os ensaios, Eletrobrás, CAPES e aos colaboradores desse artigo.

Referências Bibliográficas

- Brasil, Ministério das Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética (2007). Balanço Energético Nacional – Ano base: 2006.
- Nogueira, F. (2004). Programa de Eficiência Energética Industrial. Módulo: Correias Transportadoras, Eletrobrás, Procel Indústria.
- Americo, Marcio (2004). Programa de Eficiência Energética Industrial. Módulo: Acionamento Eletrônico, Eletrobrás, Procel Indústria.
- Shmidlin Jr., Celso Rogério (2004). Operação do Conjunto Bomba Centrífuga, Motor de Indução Trifásico e Conversor de Frequência Visando a Eficiência no Uso da Energia Elétrica.
- Fitzgerald, A. E. (1975). Máquinas Elétricas: Conversão Eletromecânica da Energia Processos, Dispositivos e Sistemas. Ed. McGRAW-HILL.

- Spivakovsky, A. O. (1985). Conveying Machines. Volumes 1 e 2. Tradução: V. Afanasyev. Ed. Mir Publishers, Moscow.
- Filho, João Alves (2003). Matriz energética brasileira: da crise à grande esperança. Editora: MAUAD, Rio de Janeiro.