

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL VISANDO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS EM SISTEMAS MOTRIZES INDUSTRIAIS

Wellington Rocha Araújo^{*}, Luciana Cambraia Leite[‡], Saulo Gomes Moreira[¥], Valmir Machado Pereira[‡], Amâncio Rodrigues da Silva Júnior[¥]

^{*}BITS – Comércio de Equipamentos Pneumáticos Ltda.
Avenida do Comércio, 200 – Setor Santa Genoveva – Goiânia – GO - Brasil
www.eletricaengenharia.com – gerenciamento@gmail.com

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - Departamento de Eng^o. Elétrica - [¥]Laboratório de Eficiência Energética - [‡]BATLAB – Laboratório de Inteligência Artificial - Cidade Universitária, s/n – Caixa Postal 549 – Campo Grande – MS – Brasil - [¥]eficiencia@del.ufms.br – [‡]valmir@del.ufms.br – [‡]luciana@del.ufms.br

Resumo — Cabe à investigação do comportamento eletromecânico dos sistemas motrizes existentes numa planta industrial dar subsídios para se ter uma análise enfocando a conservação de energia. Apresenta-se neste artigo um estudo referente à otimização energética em sistemas motrizes industriais (bomba centrífuga, ventilador centrífugo e correia transportadora), a partir de dados levantados no laboratório LAMOTRIZ-UFMS. O trabalho contribui com parâmetros reais adequados ao desenvolvimento de software e hardware para o controle automático de sistemas motrizes e para a tomada de decisão. Foram desenvolvidos: (a) um modelo, baseado em redes neurais artificiais, para estimação de parâmetros e grandezas mecânicas, e (b) uma análise de estratégias baseadas em lógica fuzzy que visam aumentar a eficiência energética do processo industrial. As redes neurais mostraram-se eficientes na capacidade de generalizar soluções e estimar parâmetros de forma satisfatória. O modelo baseado em lógica fuzzy, além de propiciar a simulação de diversas situações encontradas na indústria, apresentou-se como uma ferramenta viável na modelagem de sistemas motrizes.

Palavras-Chave — Eficiência Energética, Lógica Fuzzy, Redes Neurais Artificiais, Sistemas Motrizes Industriais.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNIQUES AIMING AT ENERGY EFFICIENCY AND PARAMETER ESTIMATION IN INDUSTRIAL MOTOR SYSTEMS

Abstract — The investigation of the electromechanical behavior of motive power in an industrial plant is responsible for giving subsidies to investigate energy saving. This paper reports the analysis of energy optimization in industry systems (centrifugal pump, centrifugal fan and conveyor belt) from experimental data collected at LAMOTRIZ-UFMS laboratory. This study contributes with real parameters, suitable for the development of software and hardware to the automatic control of industry systems and to decision-making. Two issues were discussed: (a) a neural network-based model to estimate parameters and mechanical variables, and (b) fuzzy logic-based strategy analyses aiming at increasing energy efficiency in industrial process. The neural network proved to be efficient as it is able to generalize solutions and estimate parameters in a

satisfactory way. The fuzzy logic-based model, besides enabling the simulation of diverse situations found in the industry, showed to be a viable tool in the modeling of motor systems.

Keywords — Artificial Neural Networks, Energy Efficiency, Fuzzy Logic, Industrial Motors Systems.

I. INTRODUÇÃO

De acordo com os números apontados nos últimos anos pelo Balanço Energético Nacional, BEN (2007), e ilustrados na Figura 1, o crescente aumento no consumo de energia elétrica tem exigido uma considerável ampliação na capacidade do parque de geração, com a finalidade de atender a demanda. Uma das funções da eficiência energética é contribuir para que a redução de perdas atue como um fator compensador na ampliação da capacidade energética brasileira.

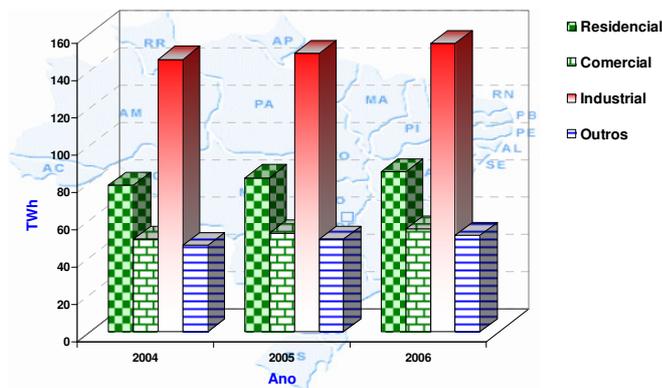


Fig. 1. Consumo final de energia elétrica para cada um dos setores da economia o Brasil. (fonte: BEN 2007)

Na indústria, a diminuição das perdas de energia nos processos de produção pode ser realizada com a especificação de equipamentos com a máxima eficiência [1] [2]. Entretanto, uma das dificuldades em se conseguir máxima eficiência é a pequena quantidade de informação quanto ao comportamento da carga a ser utilizada e/ou de seu histórico, como o perfil de vazão de ar nos sistemas de ventilação, consumo de água nos sistemas de bombeamento, pressão nos sistemas de ar comprimido e características na relação tempo-velocidade no transporte de carga em sistemas de correia transportadora.

O conhecimento dos parâmetros elétricos, mecânicos e hidráulicos que determinam o comportamento de cada sistema

¹ Artigo submetido em 16 de maio de 2008; primeira revisão em 03 de outubro de 2008; segunda revisão em 13 de novembro de 2008. Recomendado para publicação pelos Editores da Seção Especial, João Carlos dos Santos Fagundes e Felix Alberto Farret.

motriz permite a implementação de métodos que possam combinar tais variáveis, possibilitando uma análise mais detalhada de estratégias que visam a maximização da eficiência do processo em questão.

Muitos estudos referentes à simulação dinâmica de sistemas mostram a modelagem matemática em aplicações factíveis com o uso de sistemas especialistas baseados em técnicas de Inteligência Artificial (IA), advindos principalmente das Redes Neurais Artificiais (RNA) e Lógica Fuzzy (LF). Diferentes pesquisas têm demonstrado a capacidade da teoria de IA em interpretar fenômenos do nosso dia-a-dia, representando-os matematicamente em modelos com maior robustez do que os princípios matemáticos usuais [3] [4] [5].

O presente trabalho visa uma investigação dos sistemas motrizes industriais, tendo em vista a busca por técnicas de IA que permitam contribuir com estratégias e parâmetros para otimizar os processos de produção, aliando qualidade à menor relação custo-benefício, configurando a abordagem no que diz respeito à eficiência energética.

II. SISTEMAS MOTRIZES INDUSTRIAIS

Da potência total instalada no parque industrial brasileiro, em torno de 74,4% refere-se a motores em sistemas de ventilação, compressão e bombeamento [6]. Cerca de 25% do consumo de energia elétrica total na indústria nacional corresponde a bombas centrífugas e correias transportadoras, este último representando 2% das cargas industriais [7].

Em média, os motores em plantas industriais operam a 60% do valor nominal, devido ao superdimensionamento das instalações, tendo como resultado um sistema com baixa eficiência [8].

Ensaio realizado no LAMOTRIZ – Laboratório de Eficiência Energética em Sistemas Motrizes Industriais, da Universidade Federal do Ceará, mostraram que o controle de vazão no sistema de bombeamento via controle da rotação do motor apresenta redução acentuada na potência ativa exigida pelo motor. Entretanto, há uma redução gradativa do fator de potência e do rendimento do conjunto motor-bomba [9].

A representatividade do consumo de energia elétrica e da potência instalada dos sistemas motrizes na matriz energética, aliados à utilização de processos com baixa eficiência, são elementos que estimulam a conservação de energia nas cargas industriais predominantes.

Os principais aspectos analisados em sistemas motrizes industriais são a estimativa dos parâmetros torque e rotação, a partir da tensão e corrente de entrada do motor, e a relação entre tempo e rotação com as variáveis mecânicas e hidráulicas, como vazão, velocidade e temperatura.

III. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A caracterização das condições sob as quais foi obtida a base de dados analisada, as relações entre os tópicos propostos e as técnicas aplicadas são descritas abaixo.

A. LAMOTRIZ/UFMS

Baseando-se no Programa de Eficientização Industrial da Eletrobrás/PROCEL foi firmado convênio entre a ELETROBRÁS e a UFMS – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, tendo como objeto a implantação do LAMOTRIZ/UFMS [10], com fins didáticos, compreendendo atividades de ensino, pesquisa e extensão.

O LAMOTRIZ/UFMS, apresentado na Figura 2, permite a simulação de diversas condições operativas de cargas utilizadas pela indústria: compressor de ar (1), correia transportadora (2), ventilador centrífugo (3) e sistema de bomba centrífuga (4). Cada uma das cargas é instalada em bancada de ensaio independentes umas das outras, formando um sistema de acionamento completo.

As quatro estações de simulação são acionadas por dois tipos de motores de 1,5 cv, convencional e de alto rendimento, com três modos de partida, direta, *soft-starter* e inversor de frequência, VSI – *Voltage Source Inverter*. O monitoramento é realizado via *software* supervisor, o qual pode registrar os parâmetros elétricos (tensão, corrente, potência etc.) e mecânicos (torque, rotação, vazão, velocidade, pressão, etc.).



Fig. 2. LAMOTRIZ/UFMS.

A Figura 3 apresenta a janela do fluxograma do ventilador centrífugo visto no *software* supervisor. No duto de ar é instalado um *damp*er elétrico que permite o controle da vazão de ar.

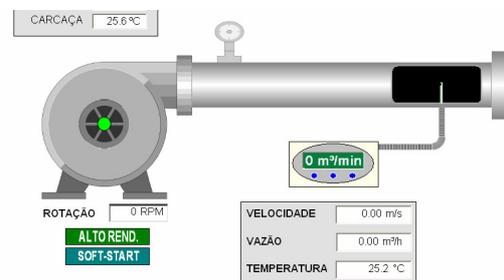


Fig. 3. Janela no *software* supervisor do fluxograma do ventilador centrífugo do LAMOTRIZ-UFMS.

A Figura 4 apresenta o fluxograma da bancada da correia transportadora (esteira), que possui 1 metro de comprimento, ajuste do ângulo de inclinação até 30° e velocidade máxima de 0,1 m/s. A simulação de carga é realizada por um sistema de deslocamento linear, com variação da carga sendo realizada por um sistema pneumático. O fluxograma da bancada da bomba centrífuga é mostrado na Figura 5. A bomba centrífuga é de 1" (uma polegada) e movimenta água entre dois tanques de acrílico transparente de 100 litros, com desnível de 2 metros.

As estações de simulação permitem o levantamento de curvas características, estudo de eficiência energética em função da variação de carga, comparação entre grandezas elétricas e mecânicas considerando os tipos de acionamento, levantamento de parâmetros elétricos e mecânicos monitorados em função do tempo de funcionamento, etc.

Estratégias para redução de parcela significativa do consumo de energia elétrica (kWh), e/ou demanda (kW), podem ser elaboradas a partir do conhecimento das

características do perfil de operação de cada sistema motriz, determinando-se o tipo de acionamento e condições de funcionamento (tempo e velocidade, por exemplo), como apresentado a seguir na seção B.

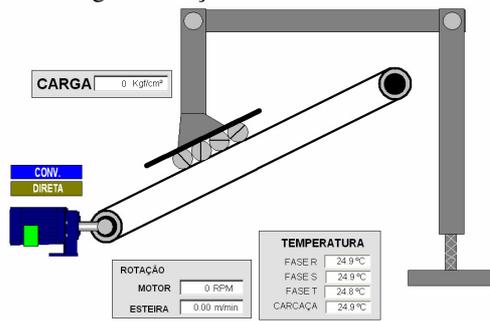


Fig. 4. Janela no software supervisor do fluxograma da correia transportadora do LAMOTRIZ-UFMS.

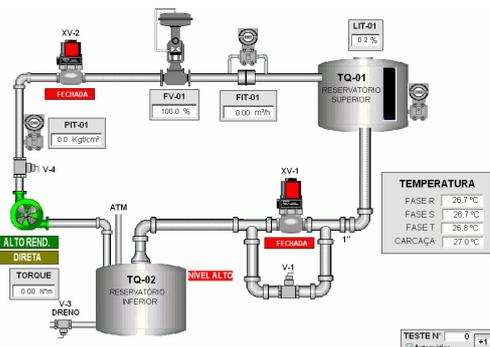


Fig. 5. Janela no software supervisor do fluxograma da bomba centrífuga do LAMOTRIZ-UFMS.

B. Eficiência Energética

Um sistema de bombeamento que não é capaz de repor, proporcionalmente, o volume de água consumido apresenta a desvantagem de consumir potência desnecessária. As leis de afinidades podem ser descritas pelas equações apresentadas em (1), respectivamente, da vazão, pressão e potência em função da rotação ω [9] [12].

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right) \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \quad \frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^3 \quad (1)$$

A altura manométrica (mca – metro coluna d’água) no sistema de bombeamento e no sistema de ventilação é equivalente à pressão (kgf/cm^2) [9] [11]. Portanto, a curva da bomba na Figura 6 equivale à curva do ventilador, da mesma forma que o uso de válvulas de estrangulamento na tubulação de água corresponde à utilização do *dampner* no duto do ventilador. Tais dispositivos, válvulas e *dampners*, quando inseridos nas linhas de água e ar, representam um aumento nas perdas do sistema [13]. A utilização de inversor de frequência para alterar a curva da bomba (ou ventilador) resulta num ganho quando há variação na vazão. A energia economizada se dá aumentando o tempo de bombeamento (ou ventilação) em função da necessidade de atender o fornecimento, seja de volume de água, ar, ou temperatura/umidade no caso dos silos de armazenamento de grãos ou torres de resfriamento.

A diferença entre a curva do sistema e a curva do sistema com válvulas, a partir do valor de vazão no qual esta última cruza a curva da bomba, é a perda inserida no processo (Figura 6). A energia economizada é caracterizada pela alteração na curva da carga acoplada no eixo do motor (bomba ou ventilador), por meio do inversor de frequência.

C. Metodologia proposta para as simulações computacionais

Os sistemas baseados em técnicas de IA propostos neste trabalho, basicamente, são:

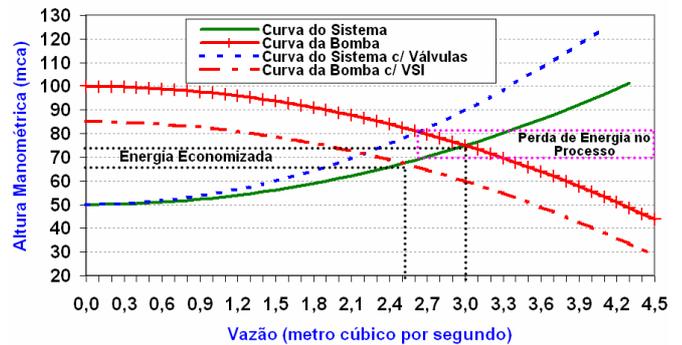


Fig. 6. Curva característica da bomba considerando variação na instalação.

- Uma rede neural artificial, do tipo MLP (*Multi-Layer Perceptron*), com parâmetros de entrada sendo a corrente elétrica (A) e a velocidade de rotação (rpm), para estimar a vazão (m^3/h), pressão (kgf/cm^2) e torque (N.m) no eixo do motor do sistema de bombeamento e vazão (m^3/h) e velocidade do ar (m/s) no sistema de ventilação;
- Um sistema de controle baseado em lógica *fuzzy* para controlar a variável de saída ‘velocidade de rotação (rpm)’, a partir dos dados de entrada: o nível dos reservatórios nos sistemas de bombeamento e a velocidade nos sistemas de correia transportadora.

Os conjuntos de dados utilizados no treinamento das redes neurais artificiais durante as simulações são os obtidos nos ensaios em laboratório. No modelo *fuzzy*, além dos dados reais, também são utilizados nos testes dados gerados aleatoriamente.

Na Figura 7 é apresentada a topologia da rede MLP [14] proposta para estimação do torque no eixo do motor no sistema de bombeamento. Os dados de entradas são: corrente elétrica eficaz (A) e a velocidade de rotação do eixo do motor (rpm). O dado de saída é o torque (N.m). Quanto às arquiteturas utilizadas, foram submetidas diversas redes com variação tanto no número de camadas escondidas como na quantidade de neurônios em cada uma das camadas. Para ilustrar a notação utilizada para identificá-las, eis alguns exemplos: 2-9-1, 2-5-5-1 (se lê 2 neurônios na camada de entrada, 5 na 1ª camada escondida, 5 na 2ª camada escondida e 1 neurônio na camada de saída), 2-10-5-1, 2-35-1 etc.

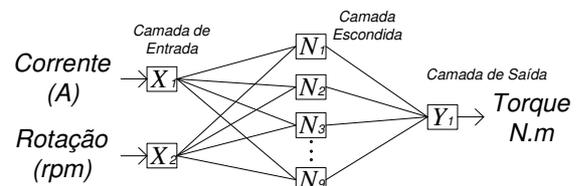


Fig. 7. Topologia da rede MLP utilizada para estimação do torque no eixo do motor no sistema de bombeamento.

De forma análoga, a topologia da rede para estimação da vazão ou da velocidade de ar no sistema de ventilação, da pressão ou da vazão de água no próprio sistema de bombeamento e da velocidade linear e/ou da carga sobre a correia, segue as mesmas características apresentadas, modificando apenas o parâmetro de saída da rede neural

artificial. A Figura 8 apresenta o diagrama de processamento da rede neural para cada sistema motriz durante o treinamento. Nas etapas preliminares o treinamento da rede baseia-se em diferentes condições de parada, tanto para as épocas (entre 1 e 100) quanto para o erro mínimo (entre 0,001 e 0,01) a ser atingido (Goal).

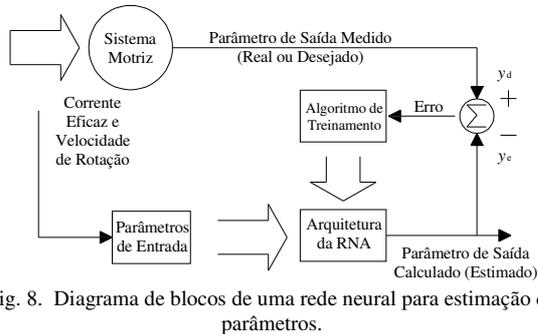


Fig. 8. Diagrama de blocos de uma rede neural para estimação de parâmetros.

O modelo proposto leva em consideração os parâmetros em regime permanente, uma vez que o sistema implementado possui uma taxa de amostragem de no máximo 4 Hz, impossibilitando a aquisição de dados em regime transitório. O período transitório do conjunto motor-carga é inferior a 250 ms, tempo de amostragem mínimo do sistema implementado.

A vazão de entrada num reservatório de abastecimento de água pode ser controlada por um sistema *fuzzy*, visando aumentar o tempo de bombeamento com o motor operando a uma rotação abaixo da nominal. Similarmente, é possível utilizá-lo em sistemas com esteira controlando a velocidade linear com base na variação da carga colocada sobre a esteira. Determinar o ponto ótimo de operação de cada sistema através do monitoramento dos parâmetros, atendendo as características da carga acoplada ao eixo do motor, é uma tarefa típica dos sistemas baseados em lógica *fuzzy* [15].

O diagrama apresentado na Figura 9 permite o controle de nível num sistema de abastecimento de água. O controlador faz com que o motor de indução opere a uma dada rotação com a finalidade de manter a variável de saída entre valores máximos e mínimos [16]. O bloco denominado 'controle de nível', equivalente a 'controle de temperatura/umidade' em sistemas de ventilação e 'controle de velocidade' em sistemas de correia transportadora, apresenta-se como o sistema motriz em questão, compreendendo o motor elétrico em regime permanente e o controlador *fuzzy* inserido com a base de regras propostas [16]. Os dados de entrada do sistema podem ser reais ou gerados aleatoriamente, seguindo o padrão de comportamento da carga e dentro da faixa de seus limites.

No sistema *fuzzy* proposto, para o método de inferência, as funções de pertinência das variáveis de entrada são relacionadas com a variável de saída a partir de sete regras utilizando o método Mamdani, com operador de implicação "Min". O operador *fuzzy* utilizado é o "E" lógico (AND), "Min". O método de agregação é estabelecido através do operador "Max". O procedimento de "Defuzzificação" obedece ao método do centróide. A ferramenta de suporte na simulação foi o editor FIS do Matlab.

Na Figura 10 é mostrada, além dos universos de discurso, uma topologia *fuzzy* do sistema de bombeamento [17], em que o parâmetro de entrada 'altura' é o nível do reservatório em m^3 e a variável de saída é dada em rpm. O sinal de erro determina se o nível está aumentando ou diminuindo.

Quanto ao mapa de regras *fuzzy* com as variáveis linguísticas, o Erro é definido como Negativo, Nulo ou Positivo (3 condições). Com referência à segunda variável de

entrada, "altura" na Figura 10 para o caso do sistema de bombeamento, é definido como Mínimo, Pequeno, Médio, Grande ou Máximo (5 condições). O produto entre 3 e 5 resulta em 15 possibilidades para a variável de saída rpm, definidas como Mínimo quando o erro for Negativo e Máximo quando o erro for Positivo. Para o erro Nulo, são: Muito Pequeno, Pequeno, Médio, Grande e Muito Grande.

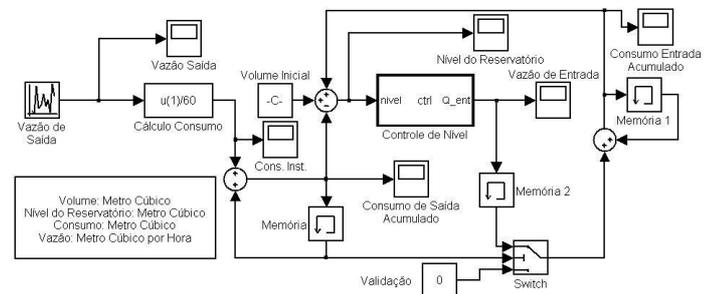


Fig. 9. Sistema para controle dos parâmetros de saída em sistemas motrizes e medição do consumo.

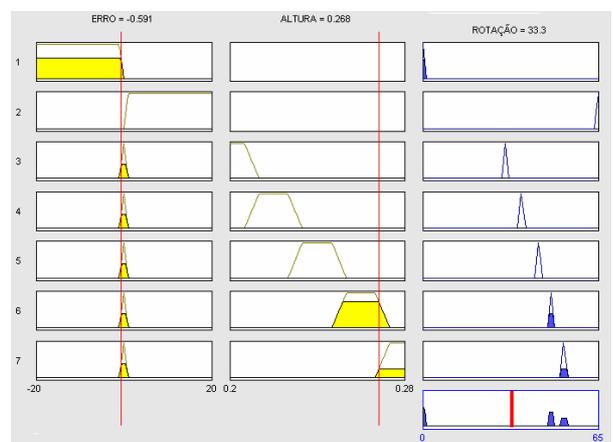


Fig. 10. Topologia *fuzzy* para determinar o ponto ótimo de operação do MIT em sistemas motrizes.

No sistema de bombeamento, o conhecimento da curva de carga típica para o consumo de água propicia a determinação da taxa de abastecimento, ou seja, qual a vazão mínima de entrada no reservatório que implica no funcionamento do sistema sem falta de água durante o tempo de operação. Tais procedimentos possuem influência na redução da velocidade de rotação do eixo do motor, resultando num provável aumento da vida útil desse equipamento.

A operação do sistema sem atuação do inversor apenas desliga o motor quando ultrapassa o limite máximo do nível no tanque e religa quando reduz de um limite mínimo.

O conhecimento prévio do comportamento da variável que se deseja controlar pelo sistema *fuzzy* é primordial para determinar estratégias ótimas na operação de cada sistema motriz. Embora o modelo *fuzzy* tenha sido apresentado com parâmetros inerentes ao sistema de bombeamento, ele pode ser aplicado nos sistemas de ventilação e correia transportadora.

A modificação na ocupação da correia transportadora, caracterizada pela variação na força exercida sobre a mesma, permite reduzir sua velocidade linear, implicando uma redução de potência demandada. A determinação da velocidade de rotação adequada para o aumento da eficiência do processo pode ser realizada pelo sistema *fuzzy* proposto, mantendo constante o transporte de carga em kgf/min. Portanto, se ocorre o aumento no carregamento da esteira, o sistema *fuzzy* pode determinar um decremento na velocidade

de rotação em busca da velocidade ótima que proporcionará o menor consumo de energia.

IV. RESULTADOS DOS ENSAIOS NO LAMOTRIZ/UFMS

A Tabela I apresenta os parâmetros registrados nas bancadas do ventilador, bomba e correia transportadora.

A Figura 11 apresenta a comparação entre o efeito da variação no fluxo de ar utilizando *dampner* e o uso de inversor de frequência para controlar a velocidade do eixo do motor. Com o motor operando à velocidade nominal, acionado por partida direta e utilizando o *dampner* para variação da vazão, a potência ativa registrada para uma vazão de aproximadamente 100 m³/h foi de 518 W. Para uma vazão em torno de 550 m³/h a potência ativa exigida pelo sistema foi de 890 W.

Utilizando o inversor, a vazão de 100 m³/h é obtida com o motor operando a 10% da velocidade nominal, demanda uma potência ativa de 42 W. A 50% da velocidade nominal a vazão é de 550 m³/h, para uma potência ativa de 303 W. A economia de energia com o motor operando a 10% da velocidade nominal é em torno de 90% (476 W), enquanto que o funcionamento com carregamento em torno de 50% a economia é de 66% (587 W).

TABELA I
PARÂMETROS REGISTRADOS EM CADA SISTEMA MOTRIZ.

Sistema	Corrente Elétrica (A)	Velocidade de Rotação (rpm)	Potência Ativa (W)	Vazão (m ³ /h)	Velocidade do Ar (m/s)	Pressão (kgf/cm ²)	Torque (N.m)
Ventilador Centrifugo							-
Bomba Centrifuga							
Correia Transportadora				Carga (kgf/cm ²)	Velocidade Linear (m/s)		-

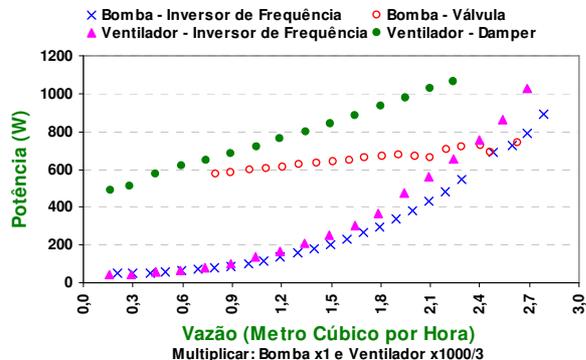


Fig. 11. Potência Ativa versus Vazão nos sistemas do ventilador e bomba.

Para o sistema de bombeamento, a Figura 11 apresenta o comportamento utilizando o inversor de frequência e ainda a válvula de estrangulamento. Com o motor acionado por partida direta e operando à velocidade nominal, a regulação da válvula de estrangulamento para obter a vazão de 0,9 m³/h resulta numa potência ativa em torno de 580 W. Para uma vazão de 1,5 m³/h a potência ativa equivalente é de 640 W.

A aplicação do inversor para controlar a velocidade de rotação e, conseqüentemente, variar a vazão de água, mostrou uma redução de potência ativa na seguinte relação: para um carregamento de 40% e uma vazão de 0,9 m³/h, é de 85% (493W), enquanto que a redução com operação a 60% da velocidade nominal e uma vazão de 1,5 m³/h, é de 68% (438W). Os valores de potência ativa registrados para os carregamentos do motor de 40% e 60% com a utilização do inversor de frequência foram, respectivamente, de 87 W e 202 W.

Quanto aos ensaios na correia transportadora, foram levantados os parâmetros apresentados na Tabela II. A operação do sistema à velocidade nominal, com acionamento do motor por partida direta e com uma força aplicada sobre a correia de 124,64 kgf/cm², exige uma potência ativa de 881,46 W. Entretanto, com a aplicação do inversor, o funcionamento da correia transportadora a 50% da velocidade nominal, mesmo com praticamente o dobro de carga sobre ela, resultou numa potência ativa de 513,16 W, representando uma redução de potência demandada de aproximadamente 42% (368 W).

Quando o motor é acionado por partida direta à velocidade nominal, observou-se que a variação da carga aplicada sobre a correia transportadora de 10 kgf/cm² a 240 kgf/cm² não acarretou variações significativas na corrente elétrica, rotação e velocidade linear. Entretanto, quando o motor é acionado pelo inversor a uma velocidade em torno de 1.710 rpm, a mesma variação na carga implica numa variação na corrente elétrica entre 1,8 A e 2,0 A, mantendo-se praticamente constante as velocidades de rotação e linear, esta última em valores próximos a 8,9 m/min, conforme apresentado na Tabela II.

TABELA II
ENSAIOS NA BANCADA DA CORREIA TRANSPORTADORA

Acionamento	Carga (kgf/cm ²)	Rotação (rpm)	Velocidade (m/min)	Potência Ativa (W)
Partida Direta	124,64	3.501,06	17,56	881,46
Inversor de Frequência	242,54	1.770,28	8,89	513,16

V. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS COM APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE IA

Foram realizadas simulações com várias topologias de redes neurais, em que as funções de ativação testadas em cada camada foram a sigmóide (LOGSIG), linear (PURELIN) e tangente hiperbólica (TANSIG), individualmente ou permutadas [14] [18]. Após o processo de treinamento, a rede é capaz de estimar os parâmetros torque, vazão, velocidade e pressão a partir de valores seqüenciais de corrente e rotação.

Nas Figuras 12 a 17 podem ser observados alguns dos resultados obtidos em ensaios nas bancadas (valor real ou desejado) e os simulados a partir da rede neural específica (valor estimado ou calculado).

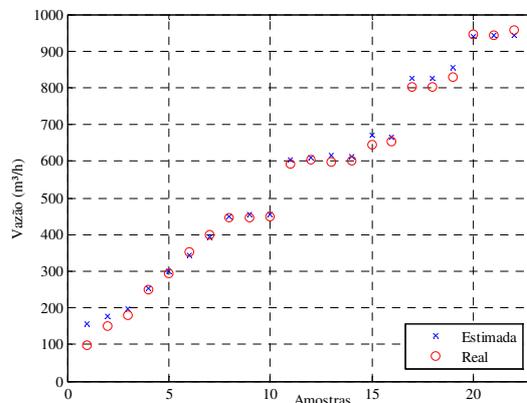


Fig. 12. Valores de vazão de ar estimados pela RNA e os obtidos em ensaios na bancada do sistema de ventilação (rede MLP 2-2-1).

Na estimativa da vazão de ar no sistema de ventilação, as redes com função de ativação linear (PURELIN) apresentaram os menores erros quadráticos médios, bem como a menor dispersão dos pontos estimados, sendo que a

rede com sete neurônios na única camada escondida apresentou a melhor convergência, com menor intervalo de tempo no processamento. Tal arquitetura apresentou um erro relativo médio de 2,36%, erro quadrático médio de 15,65 m³/h e desvio padrão de 1,36%.

Similarmente, os modelos que melhor se adaptaram à estimação da velocidade do ar foram aqueles com função de ativação linear. Entretanto, a topologia utilizou dez neurônios numa única camada escondida, atingindo um erro quadrático médio de 0,13 m/s e erro relativo médio de 3,05%, este último com um desvio padrão de 1,74%.

Dentre as redes utilizadas para estimação da vazão de água no sistema de bombeamento, a rede mostrada na Figura 14 apresentou o melhor desempenho nos testes de validação do modelo, embora tenha apresentado uma das piores performances durante o treinamento. O erro quadrático médio foi de 0,09 m³/h, desvio padrão de 5,40% e erro relativo médio de 6,78%.

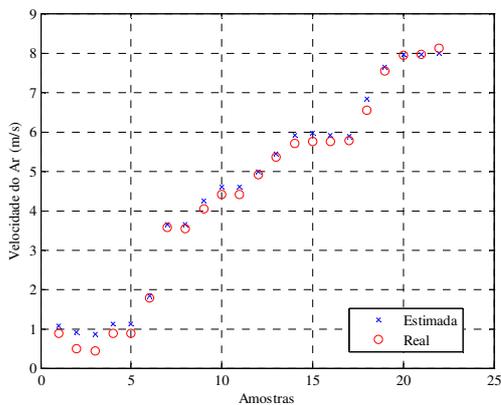


Fig. 13. Valores de Velocidade do Ar estimados pela RNA e os obtidos em ensaios na bancada do sistema de ventilação (rede MLP 2-7-1).

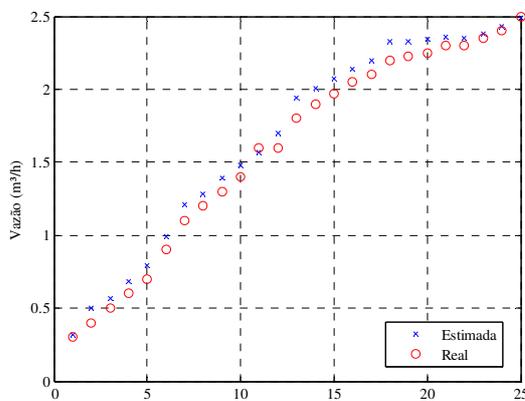


Fig. 14. Valores de Vazão de Água estimados pela RNA e os obtidos em ensaios na bancada do sistema de bombeamento (rede MLP 2-10-5-1).

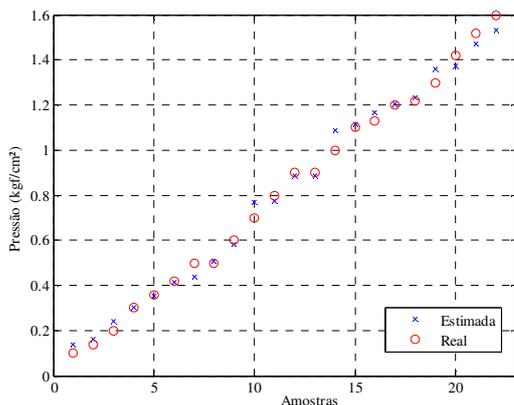


Fig. 15. Valores de Pressão estimados pela RNA e os obtidos em ensaios na

bancada do sistema de bombeamento (rede MLP 2-5-1).

Todas as redes testadas para estimar a pressão no sistema de bombeamento apresentaram um erro quadrático médio de 0,04 kgf/cm². A rede com duas camadas escondidas, com 10 e 5 neurônios, respectivamente, apresentou o menor erro relativo médio, de 5,53%, e desvio padrão de 6,76%. Esta arquitetura atingiu as 100 épocas (especificadas nos critérios de parada do treinamento) sem alcançar o erro mínimo de treinamento (0,001), da mesma forma que as demais redes.

As arquiteturas de rede testadas para a estimativa do torque no eixo do motor no sistema de bombeamento, apresentaram bom desempenho durante o treinamento. A topologia mostrada na Figura 16 apresentou os melhores resultados nos testes de validação, com erro relativo médio de 1,88% (desvio padrão de 1,69%). O erro quadrático médio obtido na simulação foi de 0,02 N.m. A rede MLP mostrada na figura 17 apresentou o menor erro quadrático médio (0,01 N.m).

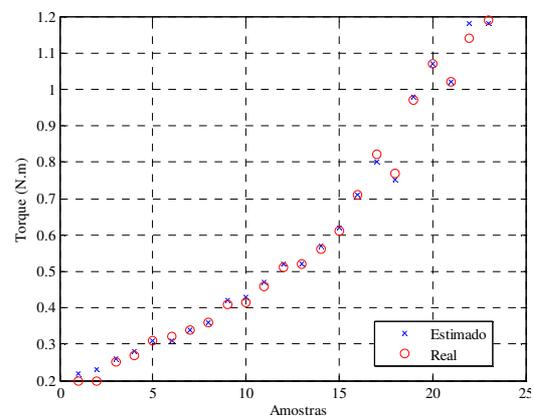


Fig. 16. Valores de Torque estimados pela RNA e os obtidos em ensaios na bancada do sistema de bombeamento (rede MLP 2-3-5-1).

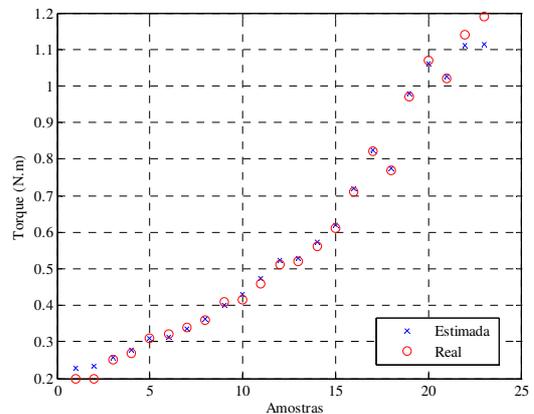


Fig. 17. Valores de Torque estimados pela RNA e os obtidos em ensaios na bancada do sistema de bombeamento (rede MLP 2-9-1).

Com o objetivo de representar uma curva característica semelhante a um determinado comportamento de consumo de água numa indústria, por exemplo, tanto o laboratório LAMOTRIZ-UFMS quanto o modelo *fuzzy* proposto permitem simular a variação de carga e analisar a estratégia que proporcione o menor consumo de energia. A Figura 18 apresenta a variação de carga realizada no ensaio em laboratório para um determinado consumo de água no sistema de bombeamento, caracterizando um perfil definido como a curva de carga típica para o presente estudo, e que também pode representar, perfeitamente, um determinado perfil industrial de consumo de água, mesmo em proporções diferentes [9].

Não são apresentadas todas as redes utilizadas no estudo, devido ao fato de ter realizado testes com mais de 100 redes. Os resultados apresentados nas figuras 12 a 17 são os mais representativos do estudo em questão.

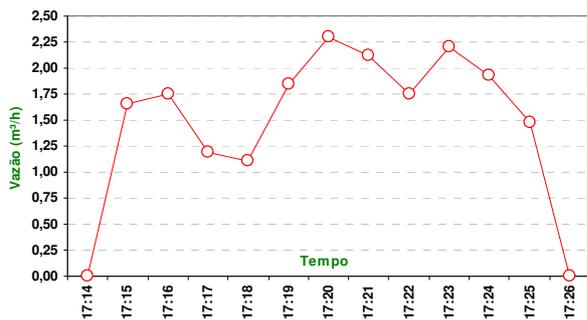


Fig. 18. Curva de carga típica adotada para o sistema de bombeamento.

São consideradas três formas de realizar o abastecimento do reservatório para atender à demanda de água: vazão constante durante o tempo de abastecimento com o motor operando à velocidade nominal; vazão constante durante o tempo de abastecimento e o motor operando com velocidade abaixo da velocidade nominal; vazão variável de acordo com a demanda. Esta última situação foi testada apenas na simulação computacional com o modelo *fuzzy* proposto. Os níveis mínimo e máximo durante o tempo de abastecimento do reservatório foram estabelecidos, respectivamente, em 30% e 80% de sua capacidade. Quando o reservatório atinge o nível máximo o motor é desligado e quando atinge o nível mínimo é religado.

Generalizando a curva de carga típica para o sistema de bombeamento, considerando a comparação ao sistema operando durante uma hora à velocidade nominal, é evidenciada, na simulação computacional apresentada na Figura 19, a redução no consumo de energia elétrica quando o sistema opera com controle de velocidade em função da variável de saída. A variável de saída no caso do sistema de bombeamento é o consumo de água em m³/h (no sistema da correia transportadora é a quantidade de carga a ser conduzida). O consumo registrado sem a utilização do inversor de frequência (VSI) é a operação à velocidade nominal.

O medidor de energia elétrica ativa da bancada da bomba registrou consumo de 381 Wh e de 254 Wh, respectivamente, sem e com o inversor de frequência controlando a velocidade de rotação constante em 2.400 rpm (frequência de 40 Hz). Devido ao comportamento da vazão de saída apresentada na curva de carga típica, a operação a 40 Hz manteve o nível do reservatório entre 30% e 80% durante todo o período de funcionamento. A operação do sistema com rotação superior a 2.700 rpm (frequência de 45 Hz) atingiu o nível máximo antes de completar o tempo de abastecimento, implicando no desligamento do motor dentro do intervalo de 1 hora em que foi realizado o ensaio. Tanto a alteração no nível do reservatório como no funcionamento do motor (liga/desliga) foram observados na simulação com o modelo *fuzzy*.

A simulação mostrada na Figura 19 apresentou um consumo de 375 Wh para o sistema funcionando sem inversor e de 255 Wh com velocidade constante e abaixo da nominal, representando uma economia de energia da ordem de 32% (no ensaio prático a economia foi de 33,3%). A operação liga/desliga ou com inversor variando a velocidade provoca um maior desgaste mecânico no motor de indução trifásico.

No sistema de bombeamento, o aumento na carga (vazão

de saída) implica no aumento na rotação, da mesma forma que o aumento da temperatura no sistema de ventilação. O aumento da rotação tem a finalidade de manter o abastecimento de água no sistema de bombeamento entre os limites pré-definidos. No sistema da correia transportadora ocorre o inverso, o aumento do carregamento da esteira permite a redução na velocidade. Para cada unidade de comprimento da esteira, a relação entre carga (kgf por unidade de área) e velocidade (m/min) fornece a capacidade de transporte por unidade de tempo (kgf/min).

Adotando-se como referência o ensaio realizado em laboratório com o motor acionado com o inversor de frequência a uma velocidade de rotação de 1.710 rpm (em torno de 29 Hz) e 120 kgf/cm², com a esteira movimentando-se a 8,6 m/min, simulou-se no sistema *fuzzy* proposto o aumento em 15% na carga para verificar a alteração permitida na velocidade linear, ou seja, qual a velocidade permitida para manter o transporte caso a carga seja aumentada para 144 kgf/cm². A potência ativa medida na bancada para a condição inicial de 120 kgf/cm² foi de 502 W. Como resultado, a simulação computacional apresentou a velocidade de rotação do motor em torno de 1.560 rpm (frequência de 26 Hz). Realizando o ensaio no laboratório para essa nova situação de carga e rotação, foi obtida a velocidade linear de 7,4 m/min, exigindo uma potência ativa de 458 W. A economia obtida é de 8,76%. A Tabela III apresenta o comparativo entre os parâmetros registrados.

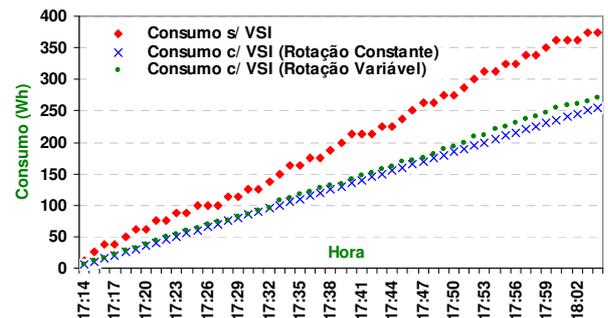


Fig. 19. Comparação através da simulação computacional do consumo de energia elétrica para um determinado perfil de carga.

TABELA III
COMPARAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS REGISTRADOS NA BANCADA DA CORREIA TRANSPORTADORA.

Carga (kgf/cm ²)	Rotação (rpm)	Velocidade (m/min)	Potência Ativa (W)	Economia (%)
120	1.710	8,6	502	-
144	1.560	7,4	458	8,76

Os resultados percentuais apresentados, quanto à análise dos dados experimentais obtidos nas bancadas, mostraram a preeminência da aplicação do inversor de frequência no acionamento dos sistemas motrizes. Enquanto que os parâmetros de análise do desempenho dos modelos computacionais expressam a aplicabilidade das técnicas de inteligência artificial.

VI. CONCLUSÕES

Com base nos dados práticos levantados em laboratório, sob diversas condições de operação em regime permanente, as arquiteturas de redes neurais desenvolvidas permitiram generalizar soluções quanto à determinação dos parâmetros disponíveis nos sistemas motrizes. Esta abordagem mostrou-se eficiente para estimar as variáveis: vazão, pressão,

velocidade do ar e torque a partir de dados adquiridos em ensaios experimentais.

Adicionalmente, foi desenvolvido um modelo utilizando a teoria de lógica *fuzzy* para determinar pontos de operação considerados ótimos para cada sistema motriz. A partir das informações do parâmetro que se deseja controlar, o modelo *fuzzy* proposto determina a velocidade de rotação adequada, de modo que sejam mantidos os limites de operação desejados/especificados, como por exemplo, o nível do reservatório no sistema de bombeamento, a temperatura ou umidade no sistema de ventilação e a carga ou velocidade no sistema de transporte por correia.

As técnicas de IA mostram-se como ferramentas bastante viáveis na determinação de parâmetros e comportamentos, os quais podem contribuir na tomada de decisão e no desenvolvimento de *softwares* capazes de controlar os sistemas motrizes industriais, fazendo-os operar com a menor relação custo/benefício.

Sob o ponto de vista da eficiência energética, os ensaios práticos apresentaram resultados suficientemente satisfatórios com a aplicação do inversor de frequência no controle de velocidade do eixo do motor de indução, em todos os sistemas motrizes analisados neste estudo. Os ensaios realizados nos sistemas motrizes apresentaram a influência de sinais de ruído bastante significativa quando o motor esteve operando numa faixa de velocidade de rotação considerada baixa, particularmente para frequência abaixo de 15 Hz. O funcionamento em baixa velocidade requer técnicas mais sofisticadas de controle e acionamento.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos dos autores ao Departamento de Engenharia Elétrica da UFMS, à ELETROBRÁS, à Capes e ao CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] E. C. Bortoni, J. Haddad, A. H. M. Santos, E. M. Azevedo e R. A. Yamachita, "Analysis of Preventive and Corrective Maintenance on Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motors Performance", *IAS* 2005.
- [2] F. J. T. E. Ferreira e A. T. de Almeida, "Method for In-Field Evaluation of the Stator Winding Connection of Three-Phase Induction Motors to Maximize Efficiency and Power Factor", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, n.º 2, Jun/2006.
- [3] F. J. Lin e R. J. Way, "Adaptive Fuzzy-Neural-Network Control for Induction Spindle Motor Drive", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 17, pp. 507-513, 2002.
- [4] M. G. Simões, N. N. Franceschetti e B. K. Bose, "Otimização de um Sistema de Geração de Energia Eólica em Velocidade Variável através de Controle Fuzzy", *SBA Controle e Automação*, Vol. 10, n.º 1, pp. 48-58, 1999.
- [5] C. Y. Wang, T. C. Chen e C. L. Huang, "Robust Control of Induction Motor with a Neural-Network Load Torque Estimator and a Neural-Network Identification", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46, pp. 990-997, 1999.
- [6] V. A. Santos, C. H. Moya, R. Piffer, Otimização de Sistemas Motrizes. *Anais do Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*, Belo Horizonte - MG, p. 198-203, 2005.
- [7] R. D. S. Silva, F. M. S. Oliveira, A. F. N. Júnior, Problemas de Qualidade da Energia e sua Influência no Rendimento de Sistemas Motrizes Industriais. *Anais do VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica*, p. 733-739, 2005.
- [8] B. Lu, T. G. Habetler, e R. G. Harley, "A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 42, n.º 4, pp.924-933, 2006.
- [9] C. R. Schmidlin Jr., A. B. Moreira, T. N. Cavalcante Neto, E. S. Pitombeira e R. S. T. Pontes, "Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento", *Universidade Federal do Ceará*, 2006.
- [10] PROCEL/Eletróbás, "Convênio ECV 024/2004 Eletróbás-UFMS", Novembro de 2004.

- [11] A. B. Moreira, "Análise da Operação de Sistemas de Ventilação Industrial Visando à Eficiência Energética", *Dissertação de Mestrado, UFC*, 2006.
- [12] B. K. Bose, "Expert System, Fuzzy Logic and Neural Networks in Power Electronics and Drives", *Power Electronics and Variable Frequency Drives*, *IEEE Press*, p. 559-627, NJ: 1996.
- [13] P. Vieira Júnior, A. L. A. Mesquita, P. R. N. da Silva, C. M. G. Rocha e V. H. P. de Souza, "Verificação da Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento Utilizando Simulação de Modelo Matemático", *INDUSCON*, 2006.
- [14] S. Haykin, "Redes Neurais – Teoria e Prática". Bookman. 2ª Ed., 2001.
- [15] J. Haddad, G. Lambert-Torres, C. I. A. Costa e G. M. Jannuzzi, "A Fuzzy Logic Decision-Making Approach For Industrial Power System Planning", *IEEE*, pp. 3244-3248, 1995.
- [16] D. Driankov, H. Hellendroorn e M. Reinfnak, "An Introduction to Fuzzy Control". Second Edition. Springer. EUA, 1996.
- [17] Mathworks, Inc., Fuzzy Logic Toolbox User's Guide Matlab. 2008a.
- [18] Mathworks, Inc., Neural Network's Toolbox User's Guide Matlab. 2008b.

BIOGRAFIAS

Wellington Rocha Araújo nasceu em Trombas-GO em 10 de julho de 1981. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), em 2004, e Mestrado em Engenharia Elétrica na UFMS (2008). Atualmente realiza trabalhos em parceria com a empresa BITS – Comércio de Equipamentos Pneumáticos, representante comercial da indústria CP – Chicago Pneumatic Brasil e com o Laboratório de Eficiência Energética da UFMS. Suas áreas de atuação estão relacionadas à eficiência energética, qualidade de energia, sistemas motrizes industriais e inteligência artificial com aplicações em sistemas de energia (www.eletricaengenharia.com).

Luciana Cambraia Leite nasceu no estado de São Paulo. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de M. Filho – UNESP (1993), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia – UFU (1997) e doutorado pela Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP (2003). Atualmente é professora adjunta do Depto. de Engenharia Elétrica da UFMS. Suas áreas de atuação estão relacionadas a acionamentos de máquinas elétricas e aplicações de técnicas de inteligência artificial na engenharia.

Saulo Gomes Moreira nasceu em Franca-SP em 31 de julho de 1981. Possui graduação (2004) em Engenharia Elétrica e mestrado (2008) na área de Energia, Planejamento, Operação e Controle de Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS. Atualmente é engenheiro eletricitista do Laboratório de Eficiência Energética do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Suas áreas de atuação estão relacionadas a eletrotécnica, subáreas de eficiência energética, qualidade de energia e sistemas motrizes industriais.

Valmir Machado Pereira nasceu no Rio Grande do Sul. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria em 1983. Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas em 1996 e 2003. Desde 1992 é professor no Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Mato Grosso do Sul. Suas áreas de atuação estão relacionadas a máquinas elétricas, acionamentos eletrônicos e aplicações de eletrônica de potência no uso de fontes renováveis para produção de energia elétrica.

Amâncio Rodrigues da Silva Júnior nasceu no estado de São Paulo. Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), em 1983. Obteve os graus de mestre e de doutor em 1987 e 1990, respectivamente, também pela UNESP. Atualmente é professor titular em nível de graduação e de pós-graduação e diretor do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). Suas linhas de pesquisa são: aterramento elétrico e proteção, energização rural, conservação de energia e sistemas motrizes industriais.