

Proposta de uma Bancada de Bombas Hidráulicas para Avaliação da Eficiência Energética em Consumidores Industriais

José T. Assunção, Paulo C. A. Leão, Tereza C. B. N. Assunção

Resumo-Através de um convênio celebrado entre a Eletrobrás e a UFSJ, está sendo implantado, na Universidade, o Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes (LOSIM), cujo objetivo principal é avaliar aspectos relacionados à eficiência energética em consumidores industriais. O LOSIM será composto por cinco bancadas: bomba hidráulica, compressor, ventilador, correia transportadora e dinamômetro. Este artigo apresenta a configuração proposta para a bancada de bombas hidráulicas, onde várias condições operativas poderão ser simuladas via um sistema de supervisão e controle, em três modos de acionamentos distintos: partida direta, partida suave (“softstarter”) e inversor de frequência. Aspectos relacionados à qualidade da energia elétrica também poderão ser avaliados.

Palavras chaves-Eficiência Energética, Sistemas Motrizes, Bombas Hidráulicas.

I. INTRODUÇÃO

Na atualidade, diversas ações têm sido propostas com o objetivo de aumentar a eficiência energética, através do uso racional da energia e pela redução do enorme desperdício: Gestão Energética, Energia nas Edificações, Eficiência Energética na Indústria, Educação, Saneamento, dentre outras [1].

No Brasil, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, vinculado ao Ministério das Minas e Energia e gerido pela Centrais Elétricas Brasileiras S.A. - Eletrobrás, tem como objetivo promover a racionalização da produção e do consumo de energia elétrica, para que se eliminem os desperdícios e se reduzam os custos e os investimentos setoriais.

Alguns programas desenvolvidos pelo PROCEL são voltados para o setor industrial, que é responsável por 46,7% do consumo de energia elétrica no país, conforme a composição setorial do consumo de eletricidade apresentada no Balanço Energético Nacional - BEN 2006 [2], e sistematizada na Fig. 1.

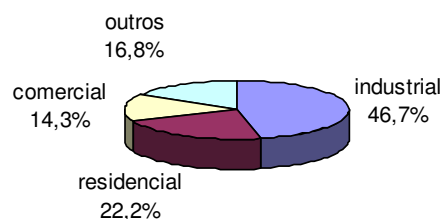


Fig.1. Consumo de energia elétrica no Brasil por setor – 2006.

Além de representar parte considerável do consumo total do país, conforme já mencionado, ao setor industrial se atribui expressiva parcela de desperdício de energia. Os sistemas motrizes, responsáveis por quase 50% do consumo do setor industrial, apresentam o maior potencial de redução de perdas. Constituídos por motores elétricos, acionamentos eletroeletrônicos, acoplamentos motor-carga, cargas mecânicas acionadas (bombas, compressores, correias transportadoras, ventiladores e exaustores) e instalações, esses sistemas utilizam 23,35% da energia total consumida no país [1].

Esses dados revelam a importância dos sistemas motrizes como fonte consumidora de energia elétrica e como campo para a implementação de medidas objetivando o aumento de sua eficiência energética, e justificam, também, o empenho da Eletrobrás em desenvolver programas que visem alcançar esses objetivos, a exemplo do PROCEL INDÚSTRIA [3].

Neste cenário, foi estabelecido um convênio entre a Eletrobrás e a Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ, que tem como objetivo a cooperação técnico-financeira entre os conveniados, visando a implantação do Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes (LOSIM). Nesse Laboratório destinado às atividades de ensino, pesquisa e extensão, aspectos relacionados a eficiência energética em consumidores industriais poderão ser avaliados.

Pretende-se que esse laboratório possa tornar-se referência para estudos de eficiência energética de consumidores industriais, proporcionando aos nossos pesquisadores, alunos e técnicos de indústrias da região, a possibilidade de realizar experimentos com equipamentos, instrumentos e tecnologias que realmente são utilizadas nas plantas industriais.

O LOSIM será composto de quatro bancadas de cargas: bomba hidráulica, compressor de pistão; ventilador centrífugo, correia transportadora e uma bancada com dinamômetro para testes de máquinas motrizes. Cada bancada será composta

Este trabalho é financiado parcialmente pela Centrais Elétricas Brasileiras S. A. - Eletrobrás através do convênio Nº ECV-023/2004.

José T. Assunção (tarcisio@ufsj.edu.br), Paulo C. A. Leão (pcaleao@ufsj.edu.br), Tereza C. B. N. Assunção (bessa@ufsj.edu.br). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ.

basicamente por: fonte de energia, acionamento, sistemas de medição, controle e supervisão e finalmente pela carga. A descrição da configuração do LOSIM pode ser encontrada em [4].

Este artigo tem como objetivo principal apresentar o projeto básico da bancada de bombas hidráulicas, elaborado a partir de consultas à literatura pertinente [5]-[8]. A bancada permitirá o estudo de diversas condições operativas das cargas, atuando individualmente ou em associação série-paralelo, o estudo dos acionamentos elétricos e dos sistemas de aquisição de dados, supervisão e controle. Aspectos relacionados à qualidade da energia elétrica também poderão ser avaliados.

II. BANCADA DAS BOMBAS HIDRÁULICAS

Cargas cujo conjugado varia com o quadrado da velocidade, como as bombas hidráulicas centrífugas, apresentam um grande potencial de eficientização energética e correspondem a uma parcela considerável das cargas industriais. Diante de tais fatos, a bancada tem os seguintes objetivos, dentre outros:

- Levantamento das curvas características da bomba: altura manométrica x vazão ($H \times Q$), vazão x potência ($Q \times P$), vazão x velocidade de rotação ($Q \times n$);
- Estudo da associação de bombas série/paralelo;
- Estudo das características da bomba e sistema em função da velocidade de operação x estrangulamento da tubulação;
- Eficientização em instalações de bombeamento.

A. Descrição da bancada de bombas hidráulicas centrífugas

Para atender os objetivos propostos para a bancada de Bombas Hidráulicas Centrífugas, foi projetado um circuito fechado de bombeamento de água, conforme esquematizado na Fig. 2.

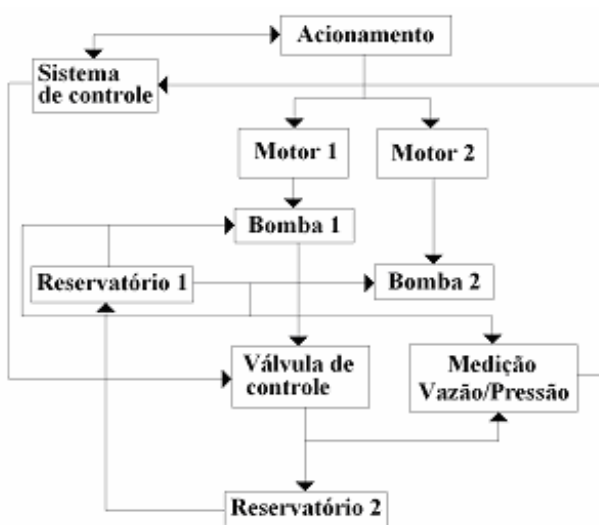


Fig. 2. Diagrama esquemático da bancada de bombas.

B. Principais características da bancada

- Duas bombas hidráulicas iguais (mesma capacidade, mesmo fabricante e mesmo modelo), com as seguintes características nominais: $15 \text{ m}^3/\text{h}$; 12 mca; 1750 rpm, sendo uma acionada por um motor de alto rendimento de 2 cv; 220 V; 60 Hz; 4 pólos, e a outra, por um motor padrão de mesmas características nominais. Essa montagem permitirá, além dos testes e ensaios de cada bomba, o estudo e a análise da associação em série e paralelo de bombas hidráulicas;
- Dois desníveis geométricos de bombeamento, o que permitirá simular instalações de bombeamento e armazenamento de água, típicos em instalações industriais. Ao invés do reservatório superior, será utilizado um sistema para descarga e retorno da água bombeada, constituído de um tubo de diâmetro apropriado para evitar o efeito sifão. Como ilustrado na Fig. 3, a variação da altura de recalque é feita através das válvulas 2 e 3, da seguinte forma: $H_0 = 6 \text{ m}$; válvula 2 fechada e válvula 3 aberta e $H_0 = 3 \text{ m}$; válvula 2 aberta e válvula 3 fechada;

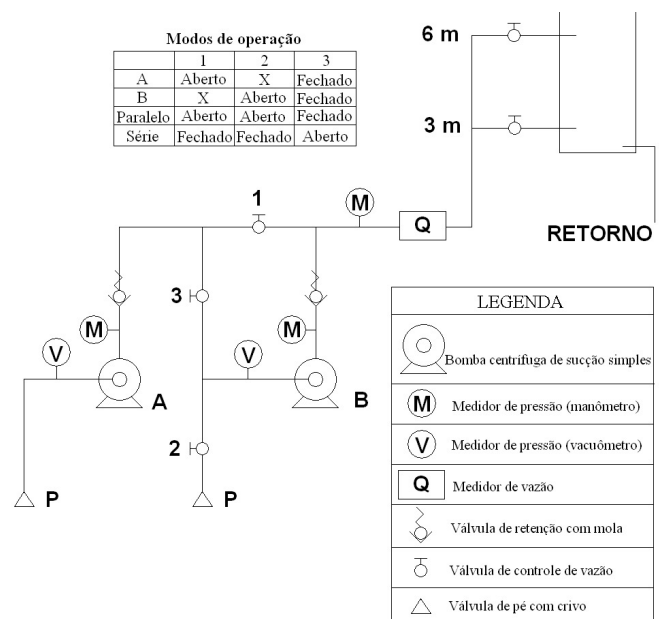


Fig. 3. Circuito fechado de bombeamento de água.

- O reservatório de sucção foi projetado para permitir a variação da altura de sucção, como mostrado na Fig. 4. O nível mínimo da lâmina de água do poço de sucção é de 1,0 m; que corresponde a uma altura de sucção positiva de 0,50 m. O nível máximo é de 2,0 m, o que corresponde à uma altura negativa de sucção também igual à 0,50 m. O poço de sucção será alimentado (retorno do reservatório de regularização) por canalização submersa e será dividido em duas câmaras para evitar a interferência entre os fluxos de cada uma das bombas;
- Para permitir variação da altura de sucção, entre -0,50 e +0,50 m, foi projetado um segundo reservatório de

regularização, que através dos controles adequados das válvulas 1, 4 e 5, possibilita ajustar e manter constante o nível de água do poço de sucção;

- Foi especificado um medidor de nível para o poço de sucção e de regularização, que além de permitir maior precisão nos ensaios das bombas, constitui-se em uma malha de controle de grande versatilidade para a aplicação didática e ambientação com equipamentos e sensores no controle de processos industriais. É possível, por exemplo, o bombeamento de água entre os reservatórios, variando seus níveis, ou mantendo o nível constante em um determinado reservatório, como exercício de programação de comando e controle com o Controlador Lógico Programável – CLP;
- As válvulas 1, 2 e 3 do barrilete (Fig. 3) e as válvulas 1, 2, 3, 4 e 5 dos reservatórios de recalque (Fig. 4) são do tipo solenóides “on-off”. Uma válvula de controle de vazão (0 a 100%), também será instalada no barrilete;
- As tubulações serão de PVC, reforçadas externamente com fibra de vidro de diâmetro igual a 60 mm (2 pol); com velocidade de escoamento inferior a 2 m/s, que é a velocidade recomendada pelo método do diâmetro econômico.

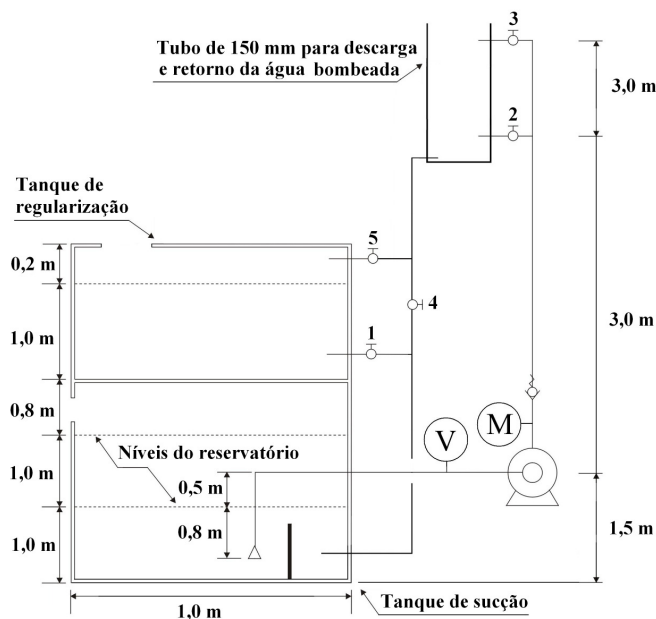


Fig. 4. Detalhes dos reservatórios.

Baseada nas curvas características fornecidas pelo fabricante, a operação da bancada de bombeamento foi simulada, como ilustrado na Fig. 5.

- Operação das bombas em paralelo: $Q = 22 \text{ m}^3/\text{h}$ ($11 \text{ m}^3/\text{h}$ para cada bomba), $H = 13,6 \text{ mca}$;
- Operação das bombas em série: $Q = 20 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 13 \text{ mca}$ ($6,6 \text{ mca}$ para cada bomba).

Todas as válvulas são controladas pelo supervisório, que também deverá impedir a operação da bomba a vazão (sem água), ou com vazão nula (tubulação de recalque

completamente fechada).

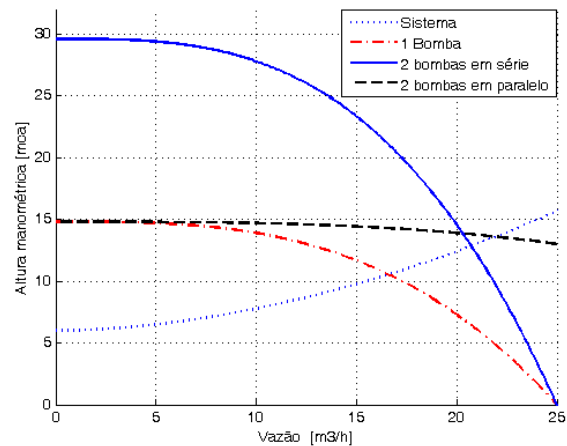


Figura 5. Curvas características do sistema de bombeamento.

Os principais componentes da bancada de bombas hidráulicas estão listados na Tabela I.

C. Alimentação e Controle

A alimentação elétrica do LOSIM é constituída de duas fontes para a alimentação simultânea de até duas bancadas de ensaio com as seguintes características: tensão trifásica de 220 V; 3F+N+T; 60 Hz. com proteção geral e proteção individual para cada fonte, proteção contra descargas atmosféricas e contra sobretensões transitórias e permanentes.

Cada fonte permite a seleção de três tipos de partida: partida direta; partida suave (“softstarter”) e partida controlada por um inversor.

Cada fonte possui ainda um medidor multifunção para a medida dos parâmetros elétricos da entrada dos motores elétricos. A comunicação desse instrumento com o CLP é realizada via rede ModBus, sendo que todas as grandezas elétricas serão mostradas e monitoradas (histórico, curva no tempo, etc.) no supervisório em tela própria. Além de permitir estudos de eficiência energética dos sistemas motrizes, o medidor multifunção, juntamente com um analisador de qualidade da energia elétrica, serão ambos utilizados para estudos relacionados à qualidade de energia, particularmente, na avaliação dos efeitos dos harmônicos causados pelo inversor de frequência. O registro de eventuais distúrbios na qualidade da tensão de suprimento, particularmente os afundamentos (“sags”), também poderá ser realizado, possibilitando verificar os impactos que os mesmos podem causar nas condições operativas dos equipamentos mais sensíveis.

Sinais de tensão e corrente estarão disponíveis tanto na entrada quando na saída dos acionamentos, permitindo sua verificação em osciloscópios.

A seleção do tipo de acionamento (inversor ou fonte constante) e a partida da bancada, serão realizadas remotamente, por meio do Sistema de Supervisão e Controle (SSC), bem como o ajuste, também remoto, das válvulas de controle de vazão.

Os sistemas de partida suave e por inversor de frequência, têm seus parâmetros determinados pelo supervisor. Dessa forma, as rampas de aceleração e frenagem, tempo de operação, velocidade e demais parâmetros referentes às características operacionais das máquinas, serão configurados através de tela específica do supervisor. O sinal de controle do inversor de frequência consiste de um sinal de 4 a 20 mA, atuando como “set point” para o valor da velocidade do motor, fornecido pelo transdutor de torque e velocidade. Assim, será possível a realização de controle em malha fechada, utilizando os medidores de grandezas físicas e o CLP. O inversor permite as seguintes modalidades de controle: escalar, vetorial “sensorless” e vetorial com encoder.

TABELA I
LISTA DOS PRINCIPAIS COMPONENTES DA BANCADA DE BOMBAS

Item	Especificação	Qte.
	Bomba hidráulica centrífuga:	
1	15 m ³ /h, 12 mca, 1750 rpm, um estágio, sucção simples horizontal e recalque na posição vertical, água limpa, eixo livre (sem motor).	2
2	Válvula de retenção: 100 psi, 2 pol..	2
3	Válvula de pé com crivo: 100 psi, 2 pol..	2
	Válvula elétrica de estrangulamento:	
4	0 – 100%, 24 V CC, 100 psi, 2 pol., água.	1
5	Válvula elétrica solenóide: “on-off”, 24 V CC, 100 psi, 2 pol., água.	8
6	Transmissor de nível: água, 0 – 100%, 4 a 20 mA, linear, 24 V CC.	2
7	Transmissor de pressão: água, 0 - 6 bar; 4 a 20 mA, linear, 24 V CC, precisão < 0,5%.	3
8	Transmissor de pressão: água, -1 - 2 bar, 4 a 20 mA, linear, 24 V CC, precisão < 0,5% (vacuômetro).	2
9	Transmissor de vazão: água, 0 – 50 m ³ /h, 0 – 100%, 4 – 20 mA, linear, tubulação 2,5 pol., precisão < 0,5%.	1
10	Transdutor de torque e velocidade: 0 - 20Nm; 3000 rpm; 0 – 100% 4 a 20 mA; precisão < 0.2%.	1
11	Motor elétrico de indução trifásico, alto rendimento: 2 CV, 380/220 V, 60 Hz, 4 pólos, com sensores tipo PT 100.	1
12	Motor elétrico de indução trifásico, padrão: 2 CV, 380/220 V, 60 Hz, 4 pólos, com sensores tipo PT 100.	1
13	Reservatórios de água (sucção e recalque/regularização).	2

Os principais equipamentos/materiais do CCM para a alimentação das bancadas, além do dispositivo para partida direta, são:

- **Medidor multifunção de energia:** trifásico, tensão (fase fase ou fase neutro), corrente; frequência, potência ativa, reativa e aparente (por fase e total), fator de potência (por fase e total), THD% de tensão e corrente, demanda, energia ativa, energia reativa indutiva e capacitiva, medição True RMS, exatidão básica igual ou menor que 0,1% para medidas de tensão e corrente, comunicação RS485 e RS232, protocolo modbus RTU, oscilografia, harmônicos de tensão e corrente, de no mínimo, até a 50ª ordem. Taxa de amostragem menor ou igual a 100ms, resolução igual ou superior a 100 amostras/ciclo, detecção de quedas e oscilações na tensão (*sag/swell*) e memória de massa.
- **Dispositivo de partida suave (“softstarter”):** 2 CV, trifásico, 220 V, para motor de 2 CV, comunicação via rede através do módulo de comunicação Profibus DP, cabos de comunicação, entradas e saídas digitais, módulo de economia de energia.
- **Inversor de Frequência:** 2 CV, trifásico, , 220 V, para motor de 2 CV, 60 Hz, controle escalar, vetorial e fluxo ótimo, frenagem regenerativa e reostática, comunicação via rede através do módulo de comunicação Profibus DP, cabos de comunicação, entrada para encoder, controle PID, entrada 0 – 10 V analógica para controle de velocidade, outras entradas e saídas analógicas e digitais.

As principais características do Software de Supervisão e Controle (SCADA) e dos CLP’s para atendimento do LOSIM estão resumidas a seguir:

- **Software de Supervisão e Controle (SCADA):**
 - Permitir gravação de dados em histórico com taxa inferior a 100 ms;
 - Permitir comunicação com até 300 Tag's simultaneamente;
 - Permitir implementação de rotinas para geração de relatórios;
 - Disponibilizar biblioteca de objetos,
 - Permitir visualização das telas através da web;
 - Permitir comunicação com bancos de dados;
 - Conter servidor de aplicação que permita visualização e comando através da estação servidora e das estações de visualização;
 - Permitir comunicação com a maioria dos Controladores Lógicos Programáveis (CLP) encontrados no mercado nacional utilizando rede Ethernet TCP/IP sem a necessidade de um servidor OPC;
 - Rodar em plataforma Windows XP Professional.
- **Controlador Lógico Programável**
 - CPU alimentação 110 VCA ou 24 VCC;
 - Tempo de varredura menor que 1 ms;
 - Permitir programação nas linguagens padronizadas pela norma IEC 61131;

Porta de comunicação *Ethernet* 100 Mbs;
 Porta de comunicação Modbus RTU RS 485;
 Porta de comunicação Profibus DP;
 48 canais de entrada e 32 canais de saída.

III. CONCLUSÃO

Este trabalho apresenta os objetivos e as principais características da bancada de bombas hidráulicas proposta para o Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes - LOSIM, da Universidade Federal de São João del-Rei, cuja finalidade principal é avaliar aspectos relacionados à eficiência energética em consumidores industriais.

Como resposta ao desafio colocado, propõe-se uma bancada didática, que possa fomentar atividades de pesquisa e extensão. Construída com equipamentos utilizados na indústria e reproduzindo no laboratório um modelo de uma planta industrial monitorada e controlada por sensores e transdutores com grau de precisão menor ou igual a 0,5%, a bancada poderá propiciar a disseminação de conceitos de otimização de sistemas motrizes industriais.

Deve-se ressaltar ainda que a realização de diagnósticos energéticos nas indústrias, abordando sistemas motrizes, requer conhecimentos multidisciplinares, enfocando aspectos relacionados a sistemas de potência, eletrônica, controle e automação, mecânica, dentre outros.

Espera-se que os trabalhos a serem desenvolvidos no LOSIM possam realizar a sinergia entre essas diversas áreas, contribuindo para uma maior difusão dos conceitos de eficiência energética.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Procel. [Citado em 28 de março de 2006]. [on line]. Disponível: <http://www.eletronbras.gov.br/procel/>
- [2] Ministério das Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional 2006*. [citado em 28 de março de 2006]. [on line]. Disponível: <http://www.mme.gov.br/>
- [3] V. A. Santos, G. A. Soares, F. P. D. Perrone, C. A. Ferreira, H. L. Oliveira, B. R. Motta, C. H. Moya e R. Piffer. "Otimização de Sistemas Motrizes Industriais". In: *Anais do I Congresso Brasileiro de Eficiência Energética – CBEE 2005*, pp. 198-203.
- [4] D. A. Teixeira, E. B. Pereira, G. F. V. Amaral, J. T. Assunção, P. C. A. Leão e E. G. Nepomuceno. "Laboratório de Otimização de Sistemas Motrizes na UFSJ". In: *Anais do I Congresso Brasileiro de Eficiência Energética – CBEE 2005*, pp. 210-215.
- [5] A. N. C. Viana. *Conservação de Energia: - Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos*, Capítulo 7: Bombas de Fluxo e Ventiladores, Itajubá, Editora EFEL, 2001, pp. 213-244.
- [6] J. A. Macintyre, *Bombas e Instalações de Bombeamento*. Editora Guanabara, 1987, p. 782.
- [7] F. C. S. Neto. *Bombas: Guia Avançado*, Procel Indústria, Edição Seriada, Eletrobrás, 2004, p. 316.

- [8] Centrais Elétricas Brasileiras, FUPAI/EFFICIENTIA. *Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento*. Rio de Janeiro, 2005, p. 272 [CD-ROM].

V. BIOGRAFIAS

José Tarcísio Assunção possui graduação em Engenharia Industrial Elétrica pela Universidade Federal de São João Del-Rei (1982), especialização em Sistemas Elétricos (1986) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1990). Atualmente é professor assistente IV da Universidade Federal de São João Del-Rei - UFSJ. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Acionamentos Elétricos, atuando principalmente nos seguintes temas: conversão de energia, máquinas elétricas, sistemas motrizes, eficiência energética e instalações elétricas.

Paulo Cesar Abreu Leão possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (1979), especialização em Métodos Computacionais Aplicados à Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (1985), mestrado em Engenharia Mecânica (Área de Concentração: Fontes Não Convencionais de Energia) pela Universidade Federal de Minas Gerais (1989) e doutorado em Engenharia Elétrica (Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica) pela Universidade Federal de Uberlândia (2002). Atualmente é professor adjunto III da Universidade Federal de São João del-Rei - UFSJ. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia, atuando principalmente nos seguintes temas: qualidade da energia elétrica, eficiência energética e circuitos elétricos.

Teresa Cristina Bessa Nogueira Assunção possui graduação em Engenharia Elétrica pela Fundação Educacional de Barretos (1984), especialização em Sistemas Elétricos pela Universidade Federal de Itajubá (1985), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2000) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2007). Atualmente é professora assistente III da Universidade Federal de São João Del-Rei - UFSJ. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Instalações Elétricas Industriais, atuando principalmente nos seguintes temas: máquinas elétricas, transformadores, acionamentos elétricos, circuitos de corrente alternada, "sliding mode", redes neurais e instalações elétricas.