



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GET/25
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO – XIV

GRUPO DE ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E GESTÃO DA TECNOLOGIA, DA INOVAÇÃO E DA EDUCAÇÃO – GET

DETERMINAÇÃO DE PERDAS E RENDIMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO UTILIZANDO TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA.

**Jamil Haddad(*)
UNIFEI**

**Edson da Costa Bortoni
UNIFEI**

**Roberto Akira Yamachita
UNIFEI**

**João Marcondes C. Guimarães
UNIFEI**

**Mateus C. de Castro Santos
UNIFEI**

RESUMO

Os motores de indução trifásicos são cargas representativas no consumo de energia elétrica em alguns setores, como por exemplo, industrial e saneamento. Desta forma, é importante conhecer as perdas e o rendimento dos motores instalados para decidir pela substituição por outro mais eficiente, pois a energia elétrica apresenta uma tendência de elevação nos custos.

Este artigo apresenta uma metodologia de medição das perdas baseada na termografia infravermelha onde são mostrados os resultados para motores de até 7,5 cv. Este procedimento possui a vantagem de não necessitar a parada do motor para a instalação dos equipamentos de medição.

PALAVRAS-CHAVE

Motor de indução, perdas, rendimento, termografia infravermelha, eficiência energética

1.0 - INTRODUÇÃO

O presente trabalho apresenta uma metodologia para a obtenção das perdas e o rendimento do motor elétrico pelo método termográfico, o qual parte do princípio de que as perdas em um motor de indução se dissipam na forma de calor, e o compara com um método tradicional de separação de perdas com medição direta da potência elétrica e mecânica.

O consumo energético brasileiro vem crescendo muito ao longo dos anos e isso se deve principalmente ao crescimento populacional, ao desenvolvimento tecnológico e à dependência cada vez maior do ser humano por energia elétrica. Outro motivo que causa um crescimento desse consumo é o desperdício, o uso inadequado dos equipamentos e a utilização de equipamentos ineficientes.

Um dos grandes problemas que pode ser encontrado é que, buscando uma confiabilidade alta, pessoas responsáveis pela manutenção instalam o motor superdimensionado. Logo é desejável realizar uma análise dos motores para verificar se estão sendo utilizados de acordo com a carga que está acoplada no eixo. Outro ponto de desperdício que pode ser observado é que os motores deterioram ao longo do tempo de operação, assim é necessário analisar viabilidade técnica e econômica da troca.

Para determinar se é realmente viável a troca é preciso determinar as perdas e o rendimento do motor. Essa tarefa não é simples visto que na maioria dos casos essa avaliação só pode ser realizada com a parada da linha de produção que muitas vezes não é possível fazer devido à política da empresa, com isso, essa metodologia poderá ser utilizada para a obtenção das perdas no motor sem a necessidade de parada.

(*) Universidade Federal de Itajubá - Av. BPS, n° 1.303 – ISEE - EXCEN – CEP 37.500-903 Itajubá, MG – Brasil
Tel: (+55 35) 3629-1241 – Fax: (+55 35) 3629-1411 – E-mail: jamil@excen.com.br

A indústria, segundo Narrol e Stiver (2008), consome boa parte da energia elétrica mundial e os motores elétricos são responsáveis por cerca de 75% desse consumo. Outra informação importante é que os motores elétricos são responsáveis por cerca de 25% do consumo de energia elétrica no Brasil (BORTONI, 2006). Sendo assim, a implementação de estudos sobre eficiência energética podem evitar ou postergar o investimento em fontes de geração de energia.

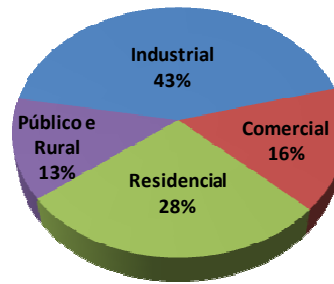


FIGURA 1 – Utilização da energia elétrica no Brasil
Fonte: Bortoni (2006)

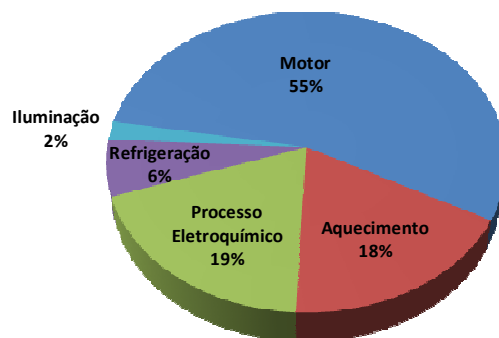


FIGURA 2 – Utilização da energia elétrica na indústria
Fonte: Bortoni (2006)

Através das figuras apresentadas percebe-se que reduzir as perdas no motor pode representar um ganho importante para a economia energética.

2.0 - DESEMPENHO DOS MOTORES ELÉTRICOS

Atualmente existem alguns padrões para ensaio de máquinas elétricas, e para os motores de indução trifásicos; as normas mais importantes são a americana IEEE Standard 112-Method B, a européia IEC 60034-2 e a japonesa JEC 37. A norma IEC foi revisada para a nova IEC 61972. Os métodos de ensaio em motores resultam em valores de rendimento significativamente diferentes. Isso ocorre devido às considerações e tratamento diferenciados dados às perdas que ocorrem durante o processo de conversão de energia no interior do motor.

Os métodos de ensaio de rendimento podem ser divididos em duas principais categorias: aquela que determina o rendimento pela medida direta e outra que determina indiretamente, pelo cálculo das perdas do motor através de dados obtidos em ensaios com carga e com o rotor livre. A norma IEEE 112, método de ensaio A, B e C determina o rendimento diretamente de medidas de potência elétrica de entrada e potência mecânica de saída sob condições operacionais de carga.

A norma IEEE, método de ensaio E e F e as normas IEC e JEC usam diferentes técnicas para determinar a potência de entrada e saída, ou ambas, quando uma medida direta não está disponível. A principal diferença entre os diferentes métodos é o tratamento das perdas por dispersão em carga.

A norma IEEE 112 método E e F requer um ensaio separado para as perdas por dispersão em carga enquanto a IEC 34-2 assume um valor percentual a plena carga para essas perdas. A norma JEC 37 utiliza um diagrama circular como método principal para calcular o rendimento e não inclui uma medida direta das perdas por dispersão em carga. Uma vez que as perdas por dispersão em carga representam de 8-15% de toda a perda, estimar as perdas por dispersão pode comprometer a exatidão no valor calculado por esses métodos.

2.1 Tipos de perdas

O motor é um conversor eletromecânico que, apoiado em princípios eletromagnéticos, converte energia elétrica em energia mecânica no eixo, porém esta conversão não é completa devido à existência das perdas que ocorrem no interior da máquina durante este processo. As perdas energéticas estão relacionadas com o tipo de material utilizado e a tecnologia de fabricação dos motores e são determinantes no rendimento do motor e podem ser agrupadas em quatro classes, conforme descritos a seguir:

2.1.1. Perdas por efeito Joule no estator e no rotor

As perdas por efeito Joule são as que ocorrem nos condutores do estator e do rotor pelo efeito da passagem da corrente. Para obter-se uma redução na perda Joule no estator pode-se aumentar a área transversal dos condutores de cobre do estator. Já no rotor, esta opção de melhoria deve ser analisada de forma rigorosa, pois o torque de partida do motor é proporcional à resistência do secundário.

2.1.2. Perdas no ferro

As perdas no ferro são devidas às correntes parasitas (Foucault) e às perdas por histerese. Estas perdas variam com a frequência, e como no rotor a variação do fluxo é muito pequena, estas são desprezadas no mesmo, ficando as perdas no ferro restritas somente ao estator.

2.1.3. Perdas por atrito e ventilação

As perdas por atrito e ventilação ocorrem devido aos atritos nos mancais e à ventilação do motor, por isso dependem do tipo de mancal, da lubrificação, do sistema de ventilação, da velocidade de rotação e do estado de conservação do motor, no que diz respeito à limpeza do mesmo. São chamadas também de perdas mecânicas e geralmente em condições normais constituem a menor parcela de perdas em motores.

2.1.4. Perdas por dispersão em carga

Incluem todas as perdas não classificadas anteriormente e normalmente crescem com o carregamento da máquina. Alguns dos fatores que são causadores de tais perdas são: o fluxo de dispersão, a distribuição não uniforme da corrente, imperfeições mecânicas e irregularidades no entreferro.

Na Tabela 1 estão sumarizadas as perdas que ocorrem no motor de indução, bem como sua contribuição no percentual de perdas totais.

TABELA 1 - Tipo e distribuição percentual de perdas totais no motor de indução

Tipo de Perda	Percentual de contribuição	Como reduzir
Perdas no ferro (núcleos)	15 a 25 %	Alongamento do núcleo e pelo uso de laminação mais fina no núcleo
Perdas mecânicas (atrito e ventilação)	5 a 15 %	Desenvolvimento de ventiladores mais eficientes, mancais e rolamentos de baixo atrito
Perdas Joule no estator	25 a 40 %	Aumento da bitola dos condutores, melhoria do desenho das ranhuras para comportar maior inserção de cobre.
Perdas Joule no rotor	15 a 25 %	Aumento da quantidade de alumínio, aumento do tamanho das barras condutoras do rotor.
Perdas por dispersão	10 a 20 %	Desenvolvimento de um bom projeto do motor, com afastamento das cabeças de bobina do rotor, tratamento térmico do rotor, enrolamento do estator em dupla camada.

Fonte: Litman (1990)

2.2 Método calorimétrico

O método calorimétrico consiste em determinar as perdas da máquina calculando o calor absorvido pelos meios refrigerantes, partindo do princípio que a somatória das perdas do motor é transformada em calor. É um método expedito prático e em alguns casos o único aplicável devido às características de operação do sistema.

Primeiramente para se determinar o calor absorvido pelo meio refrigerante é preciso calcular a diferença de temperatura entre a superfície do motor e a temperatura do ar ambiente, que será o ar refrigerante.

Portanto, ao invés da instalação de medidores de temperatura por contato nas entradas e saídas dos trocadores de calor e nas superfícies radiantes, a metodologia apresentada propõe realizar medidas de temperatura à distância.

Através da termografia é possível transformar as imagens térmicas, que fornecem as temperaturas de superfície, em taxas de perda de energia, que possibilita determinar as perdas e o rendimento do motor.

Para o cálculo das perdas pelo método calorimétrico, o motor foi instalado dentro de um volume de controle conforme apresentado na Figura 3; onde foi possível medir as características do ar na entrada e na saída.



FIGURA 3 – Volume de controle do motor

Através da equação fundamental da calorimetria pode-se obter as perdas no motor calculada pela quantidade de calor trocado no motor ao sofrer uma variação na sua temperatura conforme a equação apresentada a seguir.

$$P_{\text{perdas}} = \dot{m}_{\text{ar}} \cdot C_{\text{ar}} \cdot (\theta_{\text{saida}} - \theta_{\text{entrada}})$$

Onde:

\dot{m}_{ar} é a vazão mássica de ar [kg/s];

C_{ar} é o calor específico do ar [kJ/kg·K];

θ_{saida} é a temperatura do ar de saída [K];

θ_{entrada} é a temperatura do ar de entrada [K].

Essas perdas representam o calor dissipado pelo motor por condução, irradiação e convecção. Devido à pequena contribuição, as parcelas das perdas por condução e radiação foram desprezadas e as perdas por convecção foram caracterizadas em duas: natural e forçada. A convecção natural representa o calor na superfície que flui naturalmente para o meio ambiente, enquanto que a convecção forçada está relacionada com a perda absorvida pelo fluxo de ar empurrado pelo ventilador do motor.

Logo, para calcular essas perdas, foram utilizadas basicamente duas equações principais, juntamente com técnicas de medição de temperatura através da termografia infravermelha e processamento de imagens termográficas. As imagens termográficas da superfície do motor foram segmentadas em pequenas regiões com as mesmas faixas de temperatura (isotermas), conforme pode ser observado na figura a seguir

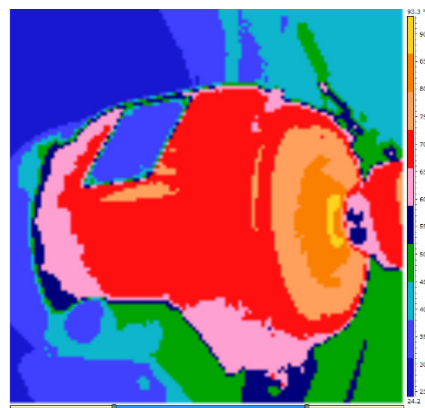


FIGURA 4 – Motor em representação de isotermas

2.2.1. Perdas por convecção natural

Para o cálculo das perdas por convecção natural o motor foi dividido em partes onde foram efetuadas imagens da parte superior, lateral direita, lateral esquerda, frontal direita e frontal esquerda. A Figura 5 apresenta a imagem da tampa traseira direita do motor.

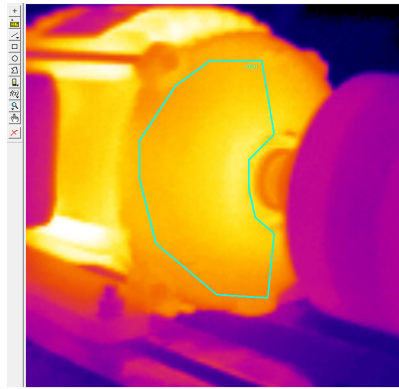


FIGURA 5 – Imagem da tampa traseira lado direito

Através do processo de isotermas (regiões com mesma temperatura). A equação da perda por convecção foi fragmentada em um somatório de áreas de isotermas com 2 °C de passo para gerar maior precisão.

$$P_{conv} = h \cdot \sum_{i=1}^n [S_i \cdot (\theta_{s_i} - \theta_{ar})]$$

Onde:

n é o número de faixas de isotermas;

S_i é a área corresponde a cada isoterma;

θ_{s_i} é a temperatura média de cada isoterma.

A equação anterior pode ser escrita da seguinte maneira:

$$P_{conv} = h \cdot \sum_{i=1}^n [S_i \cdot \Delta\theta]$$

Onde $\Delta\theta$ é a diferença entre a temperatura do pixel e o meio ambiente.

O coeficiente de convecção natural é obtido conforme a norma IEC 34-2, onde a velocidade v usada é a média das velocidades de saída do ar na tampa defletora:

$$h = 11 + 3v$$

2.2.2. Perdas por convecção forçada

A convecção forçada é um tipo de convecção em que o movimento de fluido é devido a uma força externa. Em motores elétricos esta parcela tem uma grande importância, devido ao ventilador fixado no final do eixo que sopra ar na direção axial. Esta forma de transferência de calor pode ser representada pela equação seguinte:

$$P_{convf} = Q \cdot \rho \cdot C_{ar} \cdot (\theta_{saída} - \theta_{entr})$$

Onde:

Q é a vazão do ar [m^3/s];

ρ é a massa específica do ar [kg/m^3];

C_{ar} é o calor específico do ar [$kJ/kg \cdot K$];

$\theta_{saída}$ é a temperatura do ar de saída [K];

θ_{entr} é a temperatura do ar de entrada [K].

A Figura 6 apresenta os pontos de medição no motor relacionados com a temperatura do ar de saída.

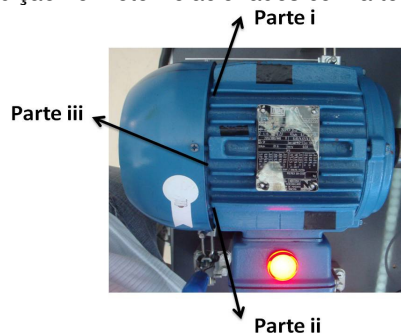


FIGURA 6 – Pontos de medição da temperatura do ar de saída

A vazão de ar que flui na ventilação forçada é dada por:

$$Q = v_f \cdot S_v \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Onde:

S_v é a área da tampa defletora que o ar atravessa [m²];

v_f é a velocidade do ar da ventilação forçada [m/s].

3.0 - RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos em dois motores utilizando a metodologia apresentada para a medição de perdas.

TABELA 2 – Resultados motor 2 cv

Separação de perdas	100 % carga	75 % carga	50 % carga
Estator (W)	161,6 ± 8,7	106,2 ± 5,7	72,7 ± 5,7
Rotor (W)	78,9 ± 2,5	37,8 ± 1,8	15,3 ± 1,8
Núcleo (W)	117,8 ± 5,8	117,7 ± 5,8	117,6 ± 5,8
Atrito e ventilação (W)	19,7 ± 4,8	19,7 ± 4,8	19,7 ± 4,8
Adicionais (W)	35,5 ± 12,6	19,7 ± 7,0	8,6 ± 7,0
Total perdas (W)	413,5 ± 17,2	301,1 ± 11,9	233,9 ± 9,2
Rendimento (%)	76,3 ± 1,0	76,1 ± 1,0	72,2 ± 1,1
Termografia	100 % carga	75 % carga	50 % carga
Convecção Natural (W)	198,1 ± 19,7	158,3 ± 4,3	127,5 ± 3,9
Convecção Forçada (W)	172,5 ± 28,0	112,3 ± 35,4	91,6 ± 23,3
Total perdas (W)	370,5 ± 32,8	270,6 ± 35,2	219,2 ± 23,4
Rendimento (%)	78,8 ± 1,9	78,5 ± 2,8	74,0 ± 2,8

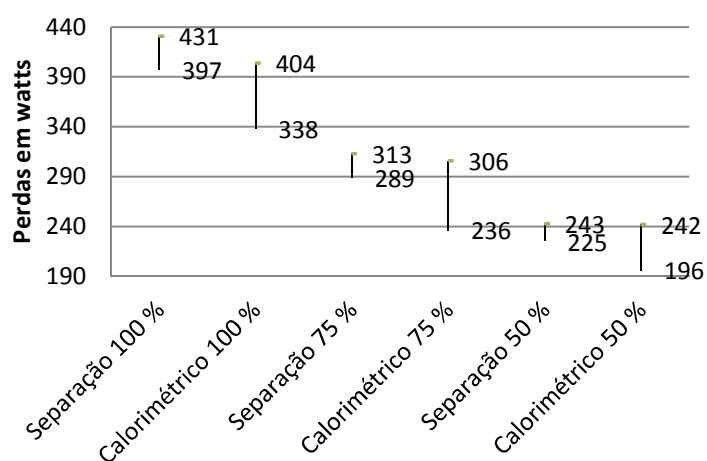


FIGURA 7 – Valores de perdas do motor de 2 cv com limite superior e inferior

TABELA 3 – Resultados motor alto rendimento 5 cv

Separação de perdas	100 % carga	75 % carga	50 % carga
Estator (W)	279,8 ± 13,9	184,7 ± 9,1	123,9 ± 9,1
Rotor (W)	154,2 ± 6,8	98,8 ± 5,0	42,4 ± 5,0
Núcleo (W)	128,1 ± 6,8	127,9 ± 6,8	127,8 ± 6,8
Atrito e ventilação (W)	27,0 ± 4,8	27,0 ± 4,8	27,0 ± 4,8
Adicionais (W)	14,6 ± 22,0	8,0 ± 13,0	3,6 ± 13,0
Total perdas (W)	603,7 ± 28,0	446,4 ± 18,1	324,7 ± 12,1
Rendimento (%)	85,8 ± 0,7	85,9 ± 0,6	85,2 ± 0,6
Termografia	100 % carga	75 % carga	50 % carga
Convecção Natural (W)	274,5 ± 22,2	189,3 ± 5,7	149,9 ± 5,6
Convecção Forçada (W)	292,7 ± 50,5	236,1 ± 39,9	184,2 ± 35,9
Total perdas (W)	567,2 ± 54,6	425,4 ± 40,3	334,1 ± 36,3
Rendimento (%)	86,6 ± 1,3	86,5 ± 1,3	84,7 ± 1,7

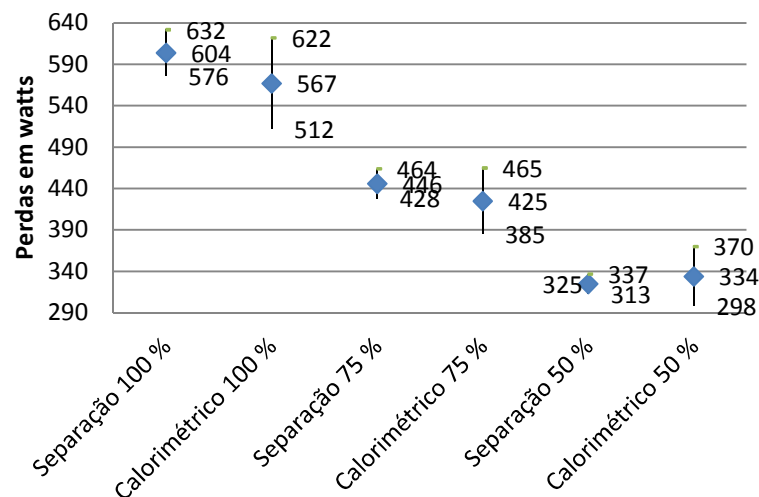


FIGURA 8 – Valores de perdas do motor alto rendimento de 5 cv com limite superior e inferior

Com relação aos valores de perdas obtidos nos ensaios dos motores, observa-se que valores por separação de perdas e calorimétrico a 100%, 75% e 50% de carga apresentaram valores satisfatórios e, considerando a incerteza da medição, estatisticamente iguais.

4.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta para determinação de perdas e rendimento em motores elétricos empregando a termografia infravermelha, onde as perdas foram determinadas através da utilização do método de separação de perdas e comparadas com os resultados dos ensaios realizados pela metodologia proposta no trabalho através da análise das imagens termográficas.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, verificou-se que, embora a proposta inicial fosse apresentar uma metodologia expedita, o método demonstrou que os resultados foram bastante precisos quando comparados com os valores obtidos por métodos normatizados.

Ressalta-se que deve se tomar os cuidados necessários para os ajustes iniciais da câmera infra vermelha durante a realização das imagens termográficas e a câmera deve ser operada por técnicos que possuam certificação para a utilização. Finalmente tem-se que a utilização da termografia infravermelha permite realizar uma análise do motor

sem a necessidade de parada do motor comprovando a praticidade da metodologia, dispensando montagem de equipamentos de medição provisórios.

Agradecimentos especial ao Programa nacional de Conservação de Energia Elétrica - PROCEL, pela oportunidade de desenvolvermos este trabalho, por meio da parceria entre a Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – ELETROBRAS, a Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI e a Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão – FAPEPE.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) NARROL, M.; STIVER, W.; Quantitative Thermography for Electric Motor Efficiency Diagnosis. University of Guelph, 2008.
- (2) BORTONI, E. C.; HADDAD, J.; YAMACHITA, R. A.; ET ALI.; Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações. Fupai, Unifei, PROCEL/Eletrabras, 2006.
- (3) LITMAN, T.; MACCOY, G. A.; DOUGLASS, J. G.; Energy Efficient Electric Motor Selection Handbook. Washington State Energy Office, outubro, 1990.
- (4) IEC STD 60034-2, Rotating electrical machines. Part 2: Methods for determining losses and efficiency of rotating electrical machinery from tests (excluding machines for traction vehicles) Measurement of losses by the calorimetric method. 1996.
- (5) IEC 61972, Method for determining losses and efficiency of three phase cage induction motors. 2002.
- (6) IEEE STD 112, IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. IEEE Power Engineering Society, 2004.
- (7) JEC 37, Induction Machine. Standard of Japanese Electrotechnical Committee.
- (8) NBR 17094, Máquinas elétricas girantes - Motores de indução. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, outubro, 2008.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Jamil Haddad, nascido em Itajubá, MG em 1959. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1982), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1989) e doutorado em Planejamento Energético pela Universidade Estadual de Campinas (1993). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Itajubá. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: conservação de energia, legislação, eficiência energética e planejamento energético. Atualmente é Presidente da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético - SBPE e coordenador do Centro de Excelência em Eficiência Energética - EXCEN da UNIFEI.



Edson da Costa Bortoni, nascido em Baependi, MG em 1966. Engenheiro Eletricista graduado pela Universidade Federal de Itajubá (1990), mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos pela UNICAMP (1993), Doutor em Sistemas Elétricos de Potência pela USP (1998), Livre Docente na área de Planejamento Energético pela USP/EESC (2012). Foi coordenador do mestrado em Engenharia da Energia da Unifei e Diretor da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético. Membro do CAA de Engenharia Elétrica do ENADE/INEP. Editor Responsável da Revista Brasileira de Energia, pesquisador Sênior do EXCEN. Membro Sênior do IEEE. Membro Fellow da ISA. Membro ativo de comitês do IEEE, ISA e CIGRÉ. Coordenador do comitê de Monitoramento de máquinas rotativas do CIGRÉ. Revisor de journals como Energy Policy, IEEE Trans. on Energy Conversion e IEEE Trans. on Power Systems. Consultor do PNUD. Quatro livros publicados, nove capítulos de livros e mais de 200 artigos técnicos em congressos e em periódicos nacionais e internacionais.



Roberto Akira Yamachita, nascido em Guarulhos, SP em 1966. Engenheiro Eletricista pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (1991); mestrado em Engenharia Elétrica pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (1998); Curso de Especialização pela EFEI/USP/Unicamp sobre o Novo Ambiente Regulatório, Institucional e Organizacional dos Setores Elétrico e Gás Natural CENARIOS (2000) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (2013). Pesquisador do Centro de Excelência em Eficiência Energética - Excen/Unifei. Atuação nas áreas de eficiência energética, diagnóstico energético, máquinas elétricas, otimização energética, fontes renováveis de energia, sistemas de iluminação, tarifação de energia, análise econômica, medidas elétricas, projetos educacionais, termografia infravermelha, medição e verificação.