



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO - GGH**

**Grupo de Estudo de Geração Hidráulica - GGH**

## **FERRAMENTA COMPUTACIONAL DE APOIO À REPOTENCIAÇÃO DE HIDROGERADORES SÍNCRONOS**

**Salles, M.B.C. (\*)  
POLI - USP**

**Martinho, L.B.  
POLI - USP**

**Nabeta, S.I.  
POLI - USP**

**Chabu, I.E.  
POLI - USP**

**Lebensztajn, L.  
POLI - USP**

**Micerino, F.J.  
ENERGEST**

### **RESUMO**

Uma nova metodologia para análise da viabilidade da repotenciação de hidrogeradores síncronos é apresentada. Um dos fatores determinantes que envolvem a decisão de aumentar a potência nominal destes geradores é a nova situação térmica alcançada em função da nova potência elétrica gerada. De forma geral, tal metodologia consiste na determinação de um circuito térmico equivalente utilizando métodos de otimização. Com a determinação do circuito térmico equivalente e o cálculo refinado das perdas envolvidas, as temperaturas no gerador podem ser determinadas para uma nova condição de carga. Esta metodologia foi implementada por meio de ferramenta computacional destinada ao estudo da repotenciação.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Circuito Térmico Equivalente, Hidrogeradores, Projeto de Máquinas Elétricas, Repotenciação

### **1.0 - INTRODUÇÃO**

O uso de fontes renováveis de energia vem se tornando cada vez mais importante e mais competitivo na composição de matrizes energéticas de países do mundo todo. Após o acidente na usina nuclear de Fukushima, no nordeste do Japão, os países que possuem centrais nucleares estão reavaliando os riscos envolvidos em tais instalações, fazendo com que a busca por energias renováveis aumente ([1]). Na Europa, devido ao esgotamento dos aproveitamentos hidráulicos, a principal alternativa se tornou a energia eólica. A intenção da Comunidade Européia é de atingir 20% de energias renováveis na sua matriz energética global ([2]). Nos Estados Unidos, recentes iniciativas do governo de Barack Obama mostram que se pretende aumentar consideravelmente a produção de energia elétrica baseada em fontes renováveis, planeja-se dobrar os 27,8 GW (em 2009) de potência instalada em energia elétrica baseada em fontes renováveis até 2012 ([3]).

Desta forma, a repotenciação de hidrogeradores pode ganhar especial atenção nas estratégias de aumento da oferta de energia renovável, principalmente em países com grandes aproveitamentos hidráulicos, embora tal interesse já tenha iniciado há décadas. Neste cenário, o Brasil destaca-se pela grande quantidade de hidrogeradores já instalados há mais de 40 anos, os quais poderiam ser analisados para passarem por um processo de repotenciação. Este fato poderia evitar que novas usinas fossem construídas para atender a crescente demanda por energia elétrica que o Brasil vem experimentando na atual situação de país emergente, evitando um maior impacto ambiental.

O avanço tecnológico nas últimas décadas possibilitou um aumento substancial na potência nominal de máquinas projetadas antes de 1960. Destacam-se avanços nas áreas relacionadas à isolamento dos enrolamentos do estator, à

ventilação e refrigeração, à análises térmicas mais precisas, às análises computacionais e à reconstrução do núcleo do estator ([4]).

A decisão de se repotenciar um gerador envolve diversas áreas e, consequentemente, diversos especialistas, o que torna todo o processo demorado e custoso. Um dos fatores determinantes nessa decisão de repotenciação é a nova situação térmica que o gerador alcançará em função de uma elevação da potência elétrica gerada. Muitas empresas de energia que são proprietárias de hidroelétricas ainda possuem geradores síncronos com potencial de repotenciação. Muitas vezes, porém, os estudos iniciais não são realizados por falta de conhecimento específico e pelo custo que uma eventual análise de um profissional especializado possa apresentar ([4],[5]). Desta forma, a disponibilidade de uma ferramenta computacional que, por meio de dados de fácil coleta, forneça resultados confiáveis da nova condição térmica e que possa ser operado por profissionais da própria empresa faz com que o processo de decisão seja mais rápido e menos oneroso. Destaca-se que não está disponível no mercado ferramenta para tal fim.

Nas próximas seções a metodologia utilizada no desenvolvimento da ferramenta computacional é descrita. Na seção 1.0 é feito uma breve introdução ao tema. A seção 2.0 descreve o circuito magnético equivalente de geradores síncronos. O circuito térmico é discutido na seção 3.0. Na seção 4.0 apresenta-se os resultados obtidos para um caso real de análise de repotenciação. As conclusões finais são discutidas na seção 5.0.

## 2.0 - MODELO ELETROMAGNÉTICO DO GERADOR

De forma geral, o cálculo do circuito magnético depende da geometria completa do gerador. Os dados da geometria do estator e do rotor devem ser conhecidos, bem como as condições operativas nominais. O caminho percorrido pelo fluxo magnético dentro da máquina elétrica pode ser resumido como mostra a Figura 1. O fluxo total é indicado pela seta em vermelho e os fluxos de dispersão em amarelo. Desta forma, o fluxo magnético total vai se enfraquecendo até concatenar o enrolamento do estator (setas em azul claro). Destaca-se que estes dados de geometria são dados de entrada do aplicativo.

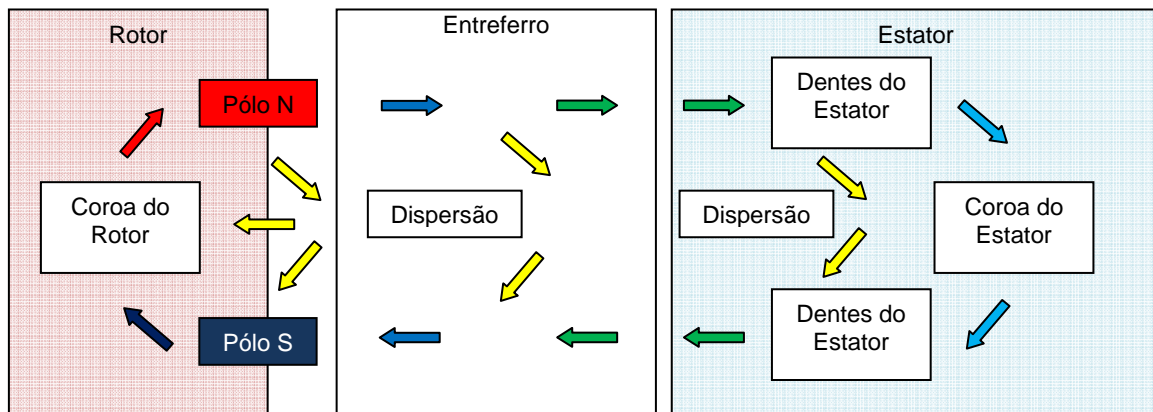


FIGURA 1 – Caminho percorrido pelo fluxo magnético (representado por setas) no gerador síncrono.

### 2.1 Corrente de Campo (ou excitação) em Vazio

Para o cálculo da corrente de excitação em vazio, necessária para garantir tensão nominal nos terminais do gerador, determina-se o fluxo que atravessa o estator, concatenado-se com o enrolamento de armadura pela equação (1) ([6],[7]):

$$\Phi_{estator} = V_n / (4,44 \cdot f \cdot N \cdot kw) \quad (1)$$

Sendo,

- $V_n$  = tensão nominal.
- $f$  = frequência da tensão induzida.
- $N$  = número de espiras do enrolamento do estator.
- $kw$  = fator de enrolamento.

Com o fluxo magnético necessário para induzir a tensão nominal em vazio, juntamente com a geometria da parte ativa do gerador e da curva B-H do material ferromagnético que a compõe, calcula-se a queda de força

magnetomotriz (ou tensão magnética, como utilizado em [6]), gerada no pólo pela corrente de campo, em cada trecho percorrido pelo fluxo magnético. Por meio da equação (2), calcula-se a força magnetomotriz total necessária:

$$Fmm_{total} = Fmm_{entreferro} + Fmm_{dente} + Fmm_{coroa\ do\ estaor} + Fmm_{pólo} + Fmm_{coroa\ do\ rotor} \quad (2)$$

A corrente de campo necessária pode ser calcula pela equação (3), sendo  $N_f$  o número de espiras do enrolamento de campo:

$$I_f = Fmm_{total} / N_f \quad (3)$$

Variando-se o valor de  $V_n$  (de zero a 1,1.  $V_n$ ) na equação (1), pode-se calcular a curva de tensão terminal em vazio do gerador (Figura 2), possibilitando a visualização da saturação do núcleo. A curva de saturação obtida permite a determinação posterior da excitação requerida em carga, considerando-se as quedas nas reatâncias síncronas e de Potier, para cada condição específica de carga e fator de potência.

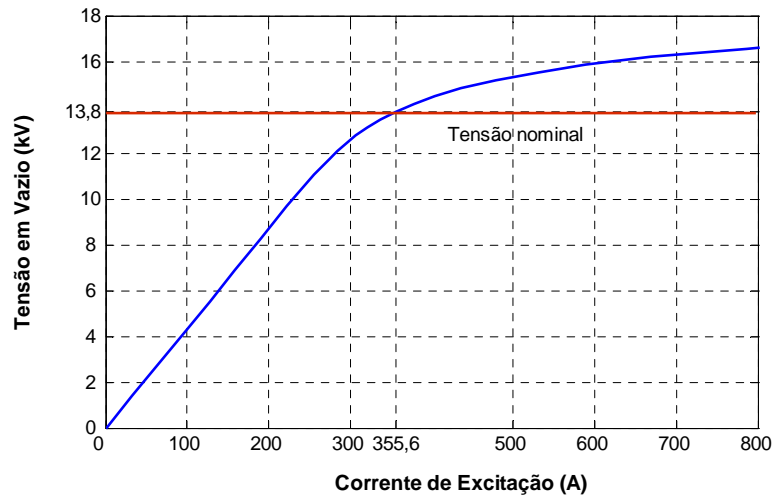


FIGURA 2 – Tensão terminal calculada no gerador síncrono na análise em vazio.

## 2.2 Cálculo das Perdas do Gerador em Carga

A corrente de campo necessária para garantir a tensão nominal nos terminais do gerador síncrono, em carga nominal, sofre um acréscimo devido, principalmente, à queda de tensão nos enrolamentos pela passagem da corrente. Desta forma, deve-se calcular a nova corrente de campo necessária para garantir a operação do gerador. Numa análise de repotenciação ilustrativa, utilizando o aplicativo desenvolvido e dados de um hidrogerador síncrono real em operação, calculou-se as principais perdas que contribuem para o aquecimento interno do gerador, em três condições distintas de carga (Tabela 1). As perdas magnéticas foram consideradas, para todos os casos, como sendo as perdas em vazio, pelo fato da variação do fluxo no estator sofrer uma variação muito pequena operando em carga nominal ([6], [7]).

Tabela 1 – Cálculo das principais perdas relacionadas ao aquecimento interno do gerador.

Potência Aparente (MVA)	Fator de Potência	Perda Joule Enrolamento Estator (kW)	Perda Joule Enrolamento de Campo (kW)	Perda Magnética Estator (kW)
0	-----	0	53,3	597,6
38,5	0,90	195,7	172,7	597,6
55,0	0,90	399,4	285,4	597,6
55,0	0,95	399,4	234,8	597,6

Com o cálculo das perdas de aquecimento do gerador, o perfil de temperatura para uma nova condição de carga será analisado com a metodologia descrita na seção seguinte. Tal análise pode indicar uma possível mudança na classe de isolamento dos enrolamentos do estator ou/e do rotor, para que o gerador possa operar na nova condição de carga nominal sem comprometer a isolamento.

### 3.0 - MODELO TÉRMICO DO GERADOR

Encontra-se na literatura descrições de circuitos térmicos de máquinas elétricas que consideram de forma detalhada condutâncias térmicas relacionadas a várias partes da máquina ([8]-[11]). Porém, estes modelos são mais adequados na fase de projeto, pois muitos detalhes construtivos não estão disponíveis para consulta na documentação encaminhada pelo fabricante, dificultando a aplicação de modelos térmicos mais completos.

Para contornar tal limitação, propõe-se o uso do circuito térmico equivalente mostrado na Figura 3. A identificação entre os nós do circuito térmico desta ilustração e as partes da máquina é feita conforme mostra a Tabela 2 que traz também a interpretação de cada uma das condutâncias térmicas e das fontes perdas em watts.

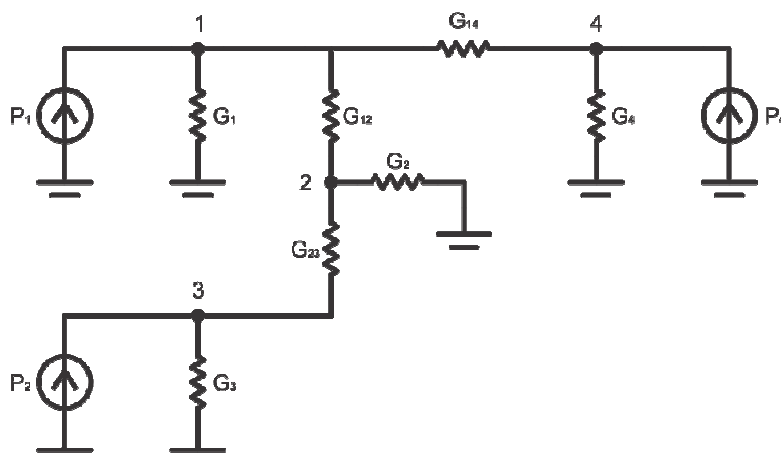


FIGURA 3 – Circuito térmico simplificado representativo da máquina elétrica a ser repotenciada.

Tabela 2 – Interpretação do circuito térmico simplificado.

Nó ou componente	Interpretação
Nó 1	Estator da máquina
Nó 2	Entreferro
Nó 3	Rotor da máquina e seu enrolamento
Nó 4	Enrolamento do estator
$G_1$	Condutância térmica associada ao estator
$G_2$	Condutância térmica associada ao entreferro
$G_3$	Condutância térmica associada ao rotor
$G_4$	Condutância térmica associada ao enrolamento do estator
$G_{12}$	Condutância térmica de troca de calor entre estator e entreferro
$G_{14}$	Condutância térmica de troca de calor entre o estator e seu enrolamento
$G_{23}$	Condutância térmica de troca de calor entre rotor e entreferro
$P_1$	Perdas no ferro do estator
$P_3$	Perdas no cobre do enrolamento do rotor
$P_4$	Perdas no cobre do enrolamento do estator

As fontes de calor  $P_1$ ,  $P_3$  e  $P_4$  injetam no circuito térmico potências conhecidas, cujos valores são estimados por meio da análise preliminar do circuito magnético detalhada na seção anterior. O equacionamento deste circuito térmico produz a equação matricial (4).

$$[G] \cdot [\theta] = [P] \quad (4)$$

Nesta última equação,  $[G]$  é a matriz de condutâncias térmicas do circuito,  $[\theta] = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$  é o vetor de elevações de temperaturas dos nós e  $[P] = [P_1 \ 0 \ P_3 \ P_4]^T$  o vetor de fontes de potências de perdas a eles associados. Deste modo, as elevações de temperatura estimadas pelo modelo podem ser calculadas pela equação (5).

$$[\theta] = [G]^{-1} \cdot [P] \quad (5)$$

Ocorre, porém, que são ainda conhecidos por meio de medição de valores representativos da elevação de temperatura dos enrolamentos do rotor e do estator em relação ao ambiente, em condição de potência original do gerador. Estes também se identificam com os potenciais térmicos dos nós 3 e 4 do circuito da Figura 3, e serão designados aqui por  $\theta_3$  e  $\theta_4$ .

A caracterização do comportamento térmico do gerador traduz-se então no problema de se determinar um conjunto de condutâncias térmicas  $G_k = \{G_1, G_2, G_3, G_4, G_{12}, G_{14}, G_{23}\}$  apropriado para a constituição deste circuito, ou seja, para a construção da matriz  $[G]$ . O conjunto de condutâncias procurado é aquele que minimiza o erro  $E$  existente entre as elevações de temperatura no rotor  $\theta_3$  e no estator  $\theta_4$ , estimadas com a resolução do circuito, e as medições correspondentes  $\theta_3$  e  $\theta_4$ . Uma maneira de se avaliar este erro é por meio da função mostrada na equação (6), na qual se ressalta a dependência funcional em relação à matriz de condutâncias  $[G]$ .

$$E([G]) = \left( \frac{\theta_3 - \theta_3}{\theta_3} \right)^2 + \left( \frac{\theta_4 - \theta_4}{\theta_4} \right)^2 \quad (6)$$

Quando colocado nestes termos, a determinação do circuito térmico que represente a máquina elétrica a ser repotenciada se converte então num problema de otimização, em que se buscam os parâmetros  $G_k$  que minimizam a função  $E([G])$ . A técnica adotada para a solução do problema de otimização, descrito anteriormente, consiste na aplicação de uma combinação de um algoritmo genético com um algoritmo determinístico de busca de mínimos de funções. Nesta abordagem, o domínio de busca do conjunto de condutâncias ótimas  $G_k$  é restringido, quando possível, por argumentos de caráter analítico, através dos quais se pode obter uma estimativa para algumas das condutâncias térmicas integrantes do circuito.

A condutância  $G_1$  pode ser analiticamente estimada se for identificada com aquela associada à transmissão de calor por convecção a partir da superfície de um cilindro para o ambiente. Analogamente, as condutâncias  $G_{12}$  e  $G_{23}$  podem ser relacionadas às trocas de calor por convecção por intermédio do ar contido no entreferro da máquina, no contexto de um escoamento do tipo Taylor-Couette ([6]). A condutância  $G_{14}$ , por sua vez, está relacionada à troca de calor por condução entre o estator e o enrolamento nele alojado ([7]). Na ausência de estimativas similares para as outras condutâncias, seus intervalos de variação e de busca foram determinados heurísticamente. Uma vez obtido o circuito térmico do gerador, com a respectiva matriz de condutância, torna-se possível também prever o seu comportamento térmico em outras condições operativas, por exemplo, uma condição repotenciada. Para isto, admite-se que a matriz de condutâncias  $[G]$  representativa do gerador permanece essencialmente inalterada, visto que as intervenções realizadas sobre a máquina elétrica no ato da repotenciação não afetam substancialmente as trocas de calor por convecção, as quais representam o mecanismo predominante de troca de calor para o ambiente.

O tipo de repotenciação considerado pela ferramenta computacional leva em conta alterações, essencialmente, feitas na isolamento e nos enrolamentos estático e/ou rotórico do gerador. Desta forma, apenas o componente secundário de troca de calor por condução é afetado.

Se por um lado admite-se que a matriz  $[G]$  permanece invariante com a repotenciação, por outro se modificam com ela as perdas desenvolvidas nas diversas partes da máquina. Estas alterações podem ser expressas na forma de um novo vetor de fontes de perdas  $[P]'$ , cujos componentes se calculam por intermédio de uma nova análise do circuito magnético do gerador (como descrito na seção 2.0), similar àquela inicialmente utilizada na determinação de  $[G]$ . Deste modo, conclui-se que as temperaturas na máquina na condição repotenciada passarão a ser determinadas pela equação (7).

$$[\theta]' = [G]^{-1} [P]' \quad (7)$$

O confronto destas novas elevações de temperatura com os valores máximos admitidos pelos materiais de isolamento permite então finalmente julgar se a repotenciação proposta pode ser feita ou não.

#### 4.0 - RESULTADOS OBTIDOS

Partindo dos dados de temperatura retirados do ensaio de aquecimento (*Heat-Run test*) e da geometria do gerador, a matriz de condutâncias foi calculada de acordo com a metodologia apresentada nas seções anteriores. Duas condições de operação considerando uma nova potência elétrica gerada (55 MVA, fator de potência 0,90 e 0,95) foram analisadas. As temperaturas para cada um dos casos são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Elevação das temperaturas nos nós do circuito térmico para 55 MVA de potência nominal.

Fator de Potência	rotor	enrolamento do estator
0,90	70,5	86,0
0,95	58,0	86,0

Quando o fator de potência é mais elevado (0,95), a corrente de excitação tem menor intensidade e, portanto, menores perdas joule. Desta forma, a temperatura no enrolamento do rotor também é de menor valor.

A classe de isolamento não-repotenciada dos enrolamentos do rotor e do estator combinadas com os dados mostrados na Tabela 3, devem ser considerados na decisão de repotenciação do gerador. Caso a classe de isolamento destes enrolamentos seja F (155°C) e a temperatura ambiente 40°C, a repotenciação não elevará em ambos os casos as temperaturas de forma a afetar a isolamento do gerador. Quando a classe de isolamento do enrolamento do rotor é B (130°C), a temperatura deste enrolamento repotenciado terá maior chance de atingir o valor limite da classe, fazendo-se necessário sua troca para a classe F.

#### 5.0 - CONCLUSÃO

A metodologia de análise desenvolvida e disponibilizada em uma ferramenta computacional facilita a análise de repotenciação de geradores síncronos pelas empresas detentoras de hidroelétricas. Além disso, tal ferramenta contribui de forma inovadora na área de repotenciação de geradores síncronos. De certa forma, esta ferramenta contribui, também, com a diminuição da construção de novas usinas hidroelétricas, pois o aumento de geração de energia por unidade geradora pode tornar desnecessário a construção de novas usinas.

#### 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Patel, P. "Fukushima's Impact on Nuclear Power", *Tech Talk – IEEE Spectrum*, 22 de Março, 2011 (acessado em: [http://spectrum.ieee.org/tech-talk/energy/nuclear/fukushimas-impact-on-nuclear-power/?utm\\_source=techalert&utm\\_medium=email&utm\\_campaign=032411](http://spectrum.ieee.org/tech-talk/energy/nuclear/fukushimas-impact-on-nuclear-power/?utm_source=techalert&utm_medium=email&utm_campaign=032411))
- [2] European Commission, "Renewable Energy: Progressing towards the 2020 target", 2011. (acessado em 21/03/2011 em: [http://ec.europa.eu/energy/renewables/reports/doc/com\\_2011\\_0031\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/energy/renewables/reports/doc/com_2011_0031_en.pdf))
- [3] Biden, J. "The Transformation to a Clean Energy Economy", *Memorandum for The President - The White House*, Dezembro, 2009.
- [4] IEEE Std 1147™-2005, "IEEE Guide for the Rehabilitation of Hydroelectric Power Plants", *IEEE Standards*, 2006.
- [5] Michel, B., Vuillerod, G., Francois, M., Kunz, T., "Rehabilitation of Hydro Generating Units", *Russian Power Conference*, Moscow, 14-16 March, 2006.
- [6] Pyrhönen, J., Tapani, J., Hrabovcová, V. "Design of Rotating Electrical Machines", 1st ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.
- [7] Liwschitz, M. "Le Macchine Elettriche – Parte Terza: Calcolo e Determinazione delle Dimensioni delle Macchine Elettriche", 1st ed. (em italiano), Milano: Ulrico Hoepli, 1964.
- [8] Boglietti, A., Cavagnino, A., Staton, D. "Determination of Critical Parameters in Electrical Machine Thermal Models", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 4, pp. 1150-1159, Julho/Agosto, 2008.
- [9] Nerg, J.; Rilla, M.; Pyrhonen, J.; "Thermal Analysis of Radial-Flux Electrical Machines With a High Power Density", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.55, no.10, pp. 3543-3554, outubro, 2008.

- [10] Staton, D.A.; Cavagnino, A.; "Convection Heat Transfer and Flow Calculations Suitable for Electric Machines Thermal Models", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.55, no.10, pp. 3509-3516, Outubro, 2008.
- [11] Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Staton, D.; Shanel, M.; Mueller, M.; Mejuto, C.; "Evolution and Modern Approaches for Thermal Analysis of Electrical Machines", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 3, pp. 871-882, Marco, 2009.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



**Maurício B. C. Salles** é graduado em Engenharia Elétrica Mod. Eletrotécnica pela Universidade Presbiteriana Mackenzie (1998), concluiu o mestrado em Engenharia Elétrica na UNICAMP em 2004. Concluiu o doutorado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) em 2009. Entre 2006 e 2008, trabalhou como pesquisador na Alemanha no Instituto de Máquinas Elétricas da RWTH Aachen University. É professor de Máquinas Elétricas junto à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (POLI/USP) desde julho de 2010. Tem experiência na utilização de ferramentas computacionais para análise de sistemas de energia elétrica, como também para análise de dispositivos eletromagnéticos, utilizando o método dos elementos finitos. Tem trabalhado na área de Geração de Energia Elétrica, atuando nos seguintes temas:

geração distribuída, geração de energia eólica, estabilidade de sistemas de potência e projeto e análise de máquinas elétricas.

**Lucas Blattner Martinho** é brasileiro e natural de Jundiaí-SP, onde nasceu em julho de 1983. Formou-se engenheiro eletricitista no ano de 2005 pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, na ênfase de energia e automação elétricas. Obteve também o título de mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Potência pela mesma instituição, após defesa de dissertação no ano de 2009. Foi ainda pesquisador no Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) entre os anos de 2008 e 2010. Desligou-se deste instituto em novembro daquele ano para retornar à Escola Politécnica, onde atualmente é aluno de pós-graduação em nível de doutorado.

**Silvio Ikuyo Nabeta** concluiu o doutorado em Genie Electrique - Institut National Polytechnique de Grenoble em 1994. Atualmente é Professor Associado da Universidade de São Paulo. Publicou 36 artigos em periódicos especializados e 80 trabalhos em anais de eventos. No Web of Science, tem 74 citações e índice h=5. Possui 1 produto tecnológico patenteado e outros 2 itens de produção técnica. Participou de 14 eventos no exterior e 10 no Brasil. Orientou 4 dissertações de mestrado e 6 teses de doutorado, além de ter orientado 5 trabalhos de iniciação científica e 3 trabalhos de conclusão de curso na área de Engenharia Elétrica. Recebeu 2 prêmios e/ou homenagens. Atua na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Máquinas Elétricas e Dispositivos de Potência. Em suas atividades profissionais interagiu com 65 colaboradores em co-autorias de trabalhos científicos. Em seu currículo Lattes os termos mais freqüentes na contextualização da produção científica, tecnológica e artístico-cultural são: Método dos Elementos Finitos, Acoplamento de Circuitos Elétricos, Máquina Síncrona, Motor de Relutância Chaveado, Otimização, Gerador de Relutância Chaveado.

**Ivan Eduardo Chabu** possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1978), mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (1990 e 1997 respectivamente). Atualmente é professor doutor da Universidade de São Paulo, onde ministra disciplinas de graduação, pós-graduação e extensão na área de máquinas elétricas e conversão eletromecânica de energia. Atua também no setor industrial, onde é diretor técnico da Equacional Elétrica e Mecânica. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Máquinas Elétricas e Dispositivos Eletromecânicos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: máquinas elétricas especiais, circuitos magnéticos, motores "brushless", motores lineares, motores de relutância, dispositivos eletromecânicos, sistemas com ímãs permanentes e com fluidos magnetoreológicos.

**Luiz Lebensztajn** é graduado em Engenharia Elétrica, modalidade Eletrotécnica pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (1982), concluiu o Mestrado, o Doutorado e a Livre Docência em Engenharia Elétrica na mesma Escola em 1989, 1995 e 2007 respectivamente. Realizou Pós-Doutoramento de 2001 a 2002 no Institut National Polytechnique de Grenoble, França na área de Otimização a Múltiplos Objetivos em Eletromagnetismo. Atualmente é Professor Associado da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Foi Tesoureiro, Segundo Secretário e membro do Conselho Deliberativo da Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo. É revisor das seguintes revistas indexadas: IEEE Transactions on Magnetics, COMPEL, Revista IEEE América Latina e Journal of Microwaves and Optoelectronics. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Circuitos Magnéticos, Magnetismos e Eletromagnetismos, atuando principalmente nos seguintes temas: Método dos Elementos Finitos, Eletromagnetismo, Otimização, Máquinas Elétricas e Funções de Aproximação.

**Fábio José Micerino** possui graduação em Engenharia pelo Centro Universitário da FEI (2006). Atualmente, trabalha na empresa ENERGEST. Tem experiência na área de sistemas de distribuição de energia elétrica e de automação.