



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

CB/GPT/22

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - II

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA DETERMINAR OS PARÂMETROS DE GERADOR DE ÍMÃS
PERMANENTES**

**Walter Evaldo Kuchenbecker(*)
WEG / UFABC**

**Julio Carlos Teixeira
UFABC**

RESUMO

Os ensaios normalizados utilizados nas máquinas síncronas convencionais não são adequados para aplicação em máquinas síncronas a ímãs permanentes. Nessas máquinas, o fluxo rotórico é fixo e as indutâncias são pequenas impossibilitando, assim, a realização dos ensaios normalizados em máquinas de potência elevada, como as utilizadas na geração eólica. Neste trabalho é apresentado o desenvolvimento do ensaio de degrau de tensão para a determinação dos parâmetros dessas máquinas e a sua comparação com os métodos tradicionais.

O método de degrau de tensão desenvolvido é baseado numa fonte de tensão simples: uma bateria. Suas vantagens são a simplicidade e a adaptabilidade a qualquer potência de máquinas elétricas com ímãs permanentes. Sua desvantagem é a dificuldade de conseguir um nível de tensão constante durante o ensaio, o que exige o uso de um algoritmo de redução dos resíduos quadráticos. Como o fluxo resultante é fortemente dependente do ímã, e forças elevadas surgem durante o ensaio, é fundamental o correto posicionamento do rotor para a obtenção das indutâncias L_d e L_q , de eixo direto e em quadratura respectivamente, características dos modelos.

A validação desse método foi realizada usando o ensaio de curto-circuito instantâneo e o método de rotor posicionado, ambos normalizados. Para a determinação da indutância de eixo direto (L_d), foi possível comparar os resultados dos três métodos: degrau de tensão, curto-circuito instantâneo e rotor posicionado. Já no caso da indutância de eixo de quadratura (L_q), foi determinado somente pelo degrau de tensão e pelo método do rotor posicionado, pois, pelo ensaio de curto-circuito instantâneo, não é possível determinar o L_q .

Não foram encontradas diferenças significativas nos valores de indutâncias de eixo direto obtidas nos diferentes métodos. Já no eixo em quadratura da máquina ensaiada, com ímãs enterrados, as indutâncias são influenciadas pelo nível de saturação e os resultados são, assim, dependentes da corrente aplicada. O método desenvolvido pode ser utilizado para a análise do efeito da corrente nesta indutância.

PALAVRAS-CHAVE

Geradores a ímãs permanentes, procedimento de testes, parâmetros de máquinas síncronas, curto-circuito, degrau de tensão.

1.0 - INTRODUÇÃO

A máquina elétrica com ímãs permanentes está se tornando popular em muitas aplicações, principalmente na energia eólica e em veículos elétricos. Esta máquina despontou com uma das melhores opções, por causa de seu desempenho, robustez e simplicidade de controle. No entanto, a utilização dos ímãs permanentes na construção de máquinas elétricas é recente e, conseqüentemente, de domínio tecnológico ainda limitado. Esta é uma das razões para ainda não existir qualquer padronização para a fabricação, teste ou aplicação.

A avaliação do desempenho das máquinas elétricas é feita por meio de procedimentos de teste normalizados há várias décadas [1]. O ensaio de curto circuito pleno é clássico na avaliação de máquinas síncronas. Os motores de indução e as máquinas síncronas convencionais seguem padrões normalizados e já foram tecnologicamente desenvolvidos [7] e [8]. No entanto, no caso de geradores de ímãs permanentes, essas normas não podem ser aplicadas por causa do fluxo fixo imposto pelos ímãs permanentes no rotor. Assim, surge a necessidade de se desenvolver métodos de ensaio simples e reproduzíveis no intuito de se criar processos de avaliação normalizáveis também para este tipo de máquina.

A fim de determinar as indutâncias das máquinas a ímãs permanentes, um método de ensaio baseado no degrau de tensão é proposto. Em [2], esta metodologia já foi aplicada num PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*), porém comparado com outros métodos equivalentes indiretos. Naquele trabalho, as características especiais de tensão e frequência aliadas à alta potência, impossibilitaram a realização dos ensaios de curto circuito por causa das limitações do laboratório.

Tumageaniam e Keyhani [3] já propuseram o degrau de tensão CC para a determinação das indutâncias em máquinas síncronas convencionais, entretanto não compararam os resultados com outros métodos já normalizados. Neste trabalho, desenvolveu-se um protótipo com a finalidade de validar o método proposto do degrau de tensão a partir de resultados do teste de curto-circuito instantâneo tradicional, adaptado para as condições de geradores de ímãs permanentes [6].

2.0 - MÉTODOS PROPOSTOS

O modelo de um gerador com ímãs permanentes sem o enrolamento de amortecimento é composto por duas indutâncias, do eixo direto e do eixo em quadratura. O método proposto do degrau de tensão CC pode determinar ambas as indutâncias, no entanto a comparação com o curto-circuito instantâneo tradicional é somente possível no eixo direto (Ld). O terceiro método pode ser utilizado em qualquer ângulo da máquina. Segue a descrição detalhada do procedimento de teste dos três métodos.

2.1 Método do degrau de tensão CC

O método do degrau de tensão CC consiste em aplicar uma tensão CC nos condutores de saída da máquina por meio de uma bateria. Esse novo método foi proposto em [2], onde a validação foi feita utilizando uma máquina síncrona convencional, com enrolamento de campo. A escolha da bateria como fonte de tensão implica num sistema simples, porém com tensão variável, pois altas correntes produzem queda de tensão nos terminais da fonte.

Para determinar os parâmetros do gerador síncrono a ímãs permanentes em cada um dos eixos, inicialmente o rotor deve ser posicionado corretamente, ou no fluxo máximo (eixo direto - Ld) ou no fluxo mínimo (eixo de quadratura - Lq).

No método proposto, a máquina a ímãs permanentes teve seu rotor posicionado aplicando-se uma corrente CC entre dois terminais do estator. As forças eletromagnéticas resultantes alinham o rotor na posição de fluxo máximo, exatamente na direção de Ld. Em seguida, a polaridade da corrente é invertida, e a máquina fica automaticamente alinhada a 180 graus elétricos do valor anterior. O ponto de fluxo mínimo (Lq) está localizado fisicamente no meio dos dois eixos diretos. Os processos de alinhamento e de medida devem ser feitos num número de vezes suficiente para garantir a reprodutibilidade dos resultados. Neste trabalho, foi necessário apenas 3 repetições deste processo, um para cada par de fases

Depois de definir o posicionamento correto do rotor, na direção desejada (Ld ou Lq), o eixo deve ser travado para evitar qualquer movimento que possa gerar oscilações na medida e no gráfico de resposta do degrau de tensão CC. Para o teste de degrau de tensão CC, a bateria deve ser conectada nos mesmos cabos de saída do gerador usados para posicionar o rotor. As conexões elétricas e o posicionamento do rotor são apresentados na Figura 1.

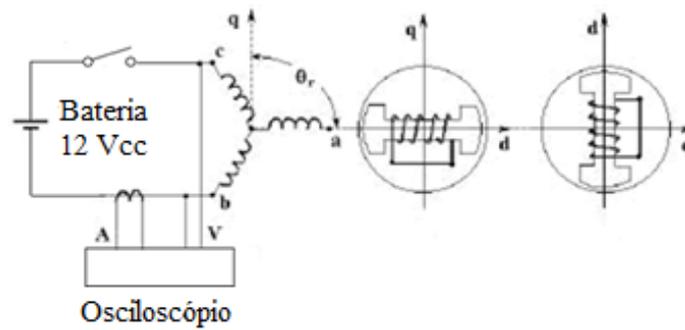


FIGURA 1 – Ligações elétricas e posição do rotor, modificadas de [4].

No método proposto, a tensão e a corrente ao longo do tempo são monitorados por meio de um osciloscópio digital. As informações são registradas e enviadas a um programa de computador baseado no matlab ®. Este programa busca o conjunto de parâmetros que minimiza o erro quadrático das correntes (I_d e I_q , sequencialmente) considerando que as tensões são aquelas medidas pelo osciloscópio. O modelo utilizado está representado na figura 2. Como a máquina está rigidamente fixa, não há as forças eletromotrizes representadas, apesar da existência do fluxo no eixo direto.

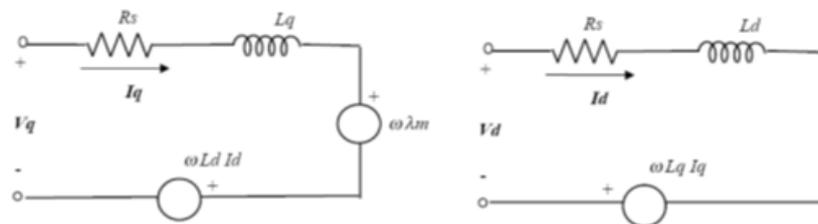


FIGURA 2 – Circuito elétrico de um PMSG [5].

2.2 Método do curto-circuito instantâneo

Numa máquina com diversos enrolamentos, a sua indutância operacional é usada para determinar a resposta da máquina síncrona ao fenômeno transitório, no qual a máquina pode estar submetida durante a operação. Esta indutância depende da frequência do fenômeno e, as respostas de carga da máquina podem ser definidas a partir de modelos clássicos desta máquina. Todo o comportamento transitório da máquina pode ser simulado num curto circuito instantâneo [10].

Esse método é considerado o mais adequado para determinar indutâncias de máquina síncrona, tanto que é nele que são baseadas as normas nacionais e internacionais para a definição destes importantes parâmetros. O método consiste em girar a máquina à velocidade nominal e um curto circuito é provocado. Para evitar correntes e esforços mecânicos muito elevados, controla-se o fluxo por meio do enrolamento de campo.

O ensaio de curto-circuito instantâneo é padronizado para máquina síncrona convencional, no entanto é comum determinar indutâncias não saturadas com a utilização de 30% da tensão nominal, limitada por causa das estruturas mecânicas dos laboratórios.

Numa máquina síncrona de ímãs este método pode provocar correntes com algumas ordens de grandeza maiores que a corrente nominal, inviabilizando o método. A baixa relação entre a indutância e a resistência deste tipo de máquina torna as hipóteses do método incorretas, pois não é possível desprezar o efeito desta última nos resultados.

Os transientes da resposta do curto-circuito da máquina síncrona convencional são divididos em três momentos, subtransitório, transitório e regime permanente, devido aos enrolamentos de campo e amortecedores, e da relação do fluxo entre eles. No caso do PMSG, a resposta ao curto-circuito instantâneo é praticamente a de regime, pois grandes geradores com ímãs não costumam apresentar enrolamentos amortecedores. Um pequeno efeito, chamado “componente CC” [7] e [8], permanece. Como a relação indutância e resistência neste tipo de máquina é muito menor do que o típico de máquina tradicionais, este efeito é muito rápido, como mostrado nos resultados experimentais.

A partir da tensão antes do curto (V_{Orms}), da corrente após o curto (I_{scrms}) define-se a impedância Z_d (eq.1). Medindo-se corretamente a resistência (R) é possível determinar a reatância X_d (eq. 2). Sabendo-se a frequência do ensaio a indutância é determinada.

$$Zd = \frac{V0rms}{Iscrms} \quad (1)$$

$$Xd = \sqrt{Zd^2 - R^2} \quad (2)$$

Como o protótipo a ímãs permanentes foi construído sem enrolamento de amortecimento, o curto-circuito instantâneo determina apenas a indutância do eixo direto. Essa indutância é composta pela indutância de dispersão do estator ($L\sigma$) e pelo componente que flui através do entreferro (fluxo mútuo ou magnetização - Lmd)
 $Ld = L\sigma + Lmd$.

2.3 Método da aplicação de tensão monofásica com o rotor posicionado

O método da aplicação de tensão monofásica com o rotor posicionado é baseado nas normas IEC e o IEEE [7, 8] para determinar as indutâncias subtransitórias $L'd$ e $L'q$. Como a máquina está bloqueada, a corrente precisa ser limitada.

O teste consiste em aplicar progressivamente tensão monofásica até corrente nominal, se possível, em ambos os eixos, fluxo máximo Ld e fluxo mínimo Lq . Normalmente, em geradores convencionais a corrente é limitada a 50%, devido ao sobreaquecimento do enrolamento de amortecimento. Esta dificuldade do ensaio é devida ao fato que o método é baseado na determinação de um parâmetro transitório utilizando um método de regime permanente. Para obter os parâmetros nas condições reais de operação, os resultados são extrapolados para a corrente nominal.

Aplicando os resultados experimentais nas equações 4, 5 e 6, os padrões IEC ou IEEE determinam as indutâncias diretas e em quadratura. O mesmo método pode ser aplicado em diversas frequências e as indutâncias relativas a relação entre o fluxo e a corrente nestas frequências podem ser obtidas. Como na máquina com ímãs não há enrolamentos rotóricos, o efeito da frequência não é significativo. Nestas condições, é possível utilizar frequências industriais para se encontrar a indutância Ld e Lq , o que simplifica o método.

$$X_{d,q} = \sqrt{Z_{d,q}^2 - R_{d,q}^2} \quad (3)$$

$$Z_{d,q} = \frac{U}{2I} \quad (4)$$

$$R_{d,q} = \frac{P}{2I^2} \quad (5)$$

O rotor foi posicionado nos eixos adequados, por meio do mesmo procedimento usado para o método do degrau de degrau de tensão CC, item 2.1.

Como o protótipo é uma máquina de potência reduzida foi possível aplicar a corrente nominal. Para analisar as variações de saturação de indutâncias, também foi aplicado 200% de corrente nominal, sem efeito significativo. Este fato ocorre pois, o fluxo resultante é fundamentalmente definido pelo ímã permanente.

3.0 - ANÁLISES E RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados de cada método aplicado ao protótipo.

3.1 Resultados do degrau de tensão CC

Com o rotor bloqueado numa das posições de teste, direto ou em quadratura, e utilizando as mesmas fases que foram utilizadas para determinar a posição, aplicou-se o degrau de tensão CC proveniente de uma bateria, conforme o circuito da Figura 1. A resposta foi registrada por um osciloscópio, registrando simultaneamente a tensão CC aplicada e a variação de corrente, conforme Figura 3.



FIGURA 3 – Resposta gráfica do degrau de tensão CC.

Observa-se que ao aplicar a tensão, a corrente tende a crescer numa exponencial, o que provoca uma queda na tensão aplicada pela bateria. Desta forma, torna-se necessário identificar quais os parâmetros do modelo da figura 2 que mais bem se adaptam aos resultados de tensão e corrente ao longo tempo.

Os parâmetros do modelo foram identificados por uma rotina desenvolvida no matlab®, buscando o menor erro entre resposta do modelo e as respostas experimentais. O parâmetro de resistência do estator (R_1) foi medido inicialmente utilizando uma ponte de Kelvin, para melhor precisão. O processo iterativo desta rotina, se inicia a partir dos parâmetros de projeto. Após algumas iterações, o resultado converge.

A iterações se iniciaram com os valores da resistência fria do estator medida pela ponte kelvin ($R_1 = 0,028 \Omega$) e as indutâncias estimadas no projeto ($L_d = 0,212 \text{ mH}$) e ($L_q = 0,135 \text{ mH}$). No método proposto, foi considerada que a indutância de dispersão era independente do posicionamento rotório. A resistência também ficou livre para variar durante as iterações, pois acredita-se que um eventual aquecimento dos enrolamentos pode ter ocorrido. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros determinados pelo degrau de tensão CC

Parâmetros	Eixo direto (L_d)	Eixo em quadratura (L_q)
Resistência do estator	0,0261 Ω	0,0254 Ω
Indutâncias	0,1365 mH	0,1877 mH

A relação entre L_d e L_q é a característica de rotores com ímãs enterrados [1].

É importante salientar que as correntes nas máquinas de ímãs permanentes não provocam grandes modificações no fluxo resultante do eixo direto, devido à alta relutância dos ímãs. Assim, esta indutância é praticamente independente da corrente. Por outro lado, no eixo em quadratura, devido ao efeito não linear do material, o efeito das correntes é mais significativo, apesar de ser fortemente dependente do nível do fluxo produzido pelo ímã (e a chamada indutância incremental), [9].

3.2 Resultados do curto-circuito instantâneo

Como salientado no método, o teste de curto-circuito instantâneo pôde ser realizado devido a baixa potência deste protótipo. O curto-circuito instantâneo determinou a reatância do eixo direto, porque o protótipo não tem gaiola de amortecimento e o transitório, verificado no primeiro semi-ciclo da figura 4, pode ser considerado insignificante.

O ensaio de curto-circuito instantâneo no gerador a ímãs permanentes foi realizado à velocidade nominal e, conseqüentemente, na tensão de saída nominal. As respostas foram registradas por meio de um osciloscópio, conforme Figura 4. Observa-se que inicialmente a tensão era elevada e a corrente, zero. Quando o curto foi aplicado, a tensão foi praticamente a zero. Este pequeno valor ocorreu devido ao elevado valor relativo de corrente que produziu uma queda de tensão na chave utilizada no experimento.

Para o cálculo da indutância de eixo direto a partir da resposta do curto-circuito instantâneo, foi necessário incluir a resistência do enrolamento do estator, desprezada normalmente no método tradicional.

Com base nos resultados do ensaio e aplicando-os nas equações 1, 2 e 3, a indutância do eixo direto a partir do curto-circuito instantâneo é 0,1335mH.

Tabela 2 – Medições para a determinação da indutância de eixo direto (L_d)

Parâmetros	Medições
Tensão antes do curto	29,67 V
Corrente permanente	515 A
Resistência ôhmica	0,028 m Ω
Indutância L_d	0,1335 mH

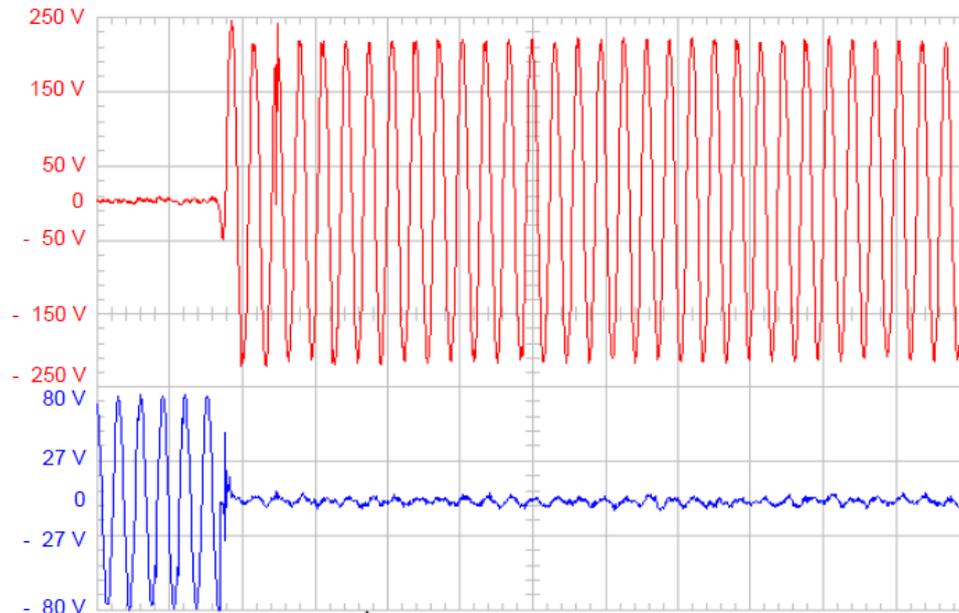


FIGURA 4 – Resposta do curto-circuito instantâneo.

3.3 Resultados do ensaio de aplicação de tensão monofásica com o rotor posicionado

A tabela 3 apresenta os resultados obtidos a partir do método do rotor posicionado, conforme normas IEC e IEEE [7] e [8].

Tabela 3 – Medições para a determinação da indutância de eixo direto (L_d) de quadratura (L_q)

Parâmetros	Indutância eixo direto	Indutância eixo quadratura
Tensão	6,64 V	10,75 V
Corrente	56,12 A	56,74 A
Potência	216 W	233,3 W
Indutância	0,1276 mH	0,2317 mH

4.0 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Como o degrau de tensão determinou indutâncias, e não as padronizadas reatâncias, todos os resultados da tabela 4 representam os valores das indutâncias medidas.

Tabela 4 – Parâmetros de indutâncias obtidas pelos três métodos de ensaios

Parâmetros	Métodos	Resultados
Eixo direto L_d	Degrau de tensão CC	0,137 mH
	Curto-circuito instantâneo	0,133 mH
	Rotor posicionado	0,128 mH
Eixo em quadratura L_q	Degrau de tensão CC	0,188 mH
	Rotor posicionado	0,234 mH

A diferença dos resultados entre a indutância de eixo direto do ensaio de degrau de tensão CC e o curto-circuito instantâneo é de cerca de 2,3 %. Com isso, é possível concluir que o resultado do ensaio de degrau de tensão CC é preciso para determinar indutâncias de eixo direto em máquinas de ímãs permanentes.

Como o gerador a ímãs permanentes produz um fluxo muito alto no eixo direto, não há diferenças significativas no valor da indutância, que poderiam ser atribuídos à diferença das correntes aplicadas nos diferentes métodos.

No entanto, para o eixo de quadratura, sua indutância é influenciada pelo nível de saturação. Isso significa que as indutâncias de eixo de quadratura devem ser definidas em função da corrente aplicada. Neste sentido, o método da resposta ao degrau é mais versátil que o método normalizado do rotor posicionado, pois neste, as reatâncias em frequência nominal exigem potências aparente relativamente altas para produzir correntes nominais na máquina. Ao aplicar o degrau de tensão, apenas o componente ativo de tensão é necessário.

5.0 - CONCLUSÃO

O método de degrau de tensão CC proposto foi capaz de determinar a indutância típica de eixo direto [Ld]. O desvio na comparação com o método tradicional de curto-circuito instantâneo é de 2,3% e do rotor posicionado é de 6,9%.

O mesmo método proposto permitiu medir a indutância de eixo em quadratura com condições de corrente mais próximas às condições nominais, o que o torna interessante para o desenvolvimento de modelos adequados para o funcionamento nominal da máquina.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) T.J.E. Miller; *Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives*. Oxford University Press, New York, USA, (1989).
- (2) KUCHENBECKER, W. E.; TEIXEIRA, J. C.; *Development of a battery step voltage to determine parameters of large PMG*. 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD2012); Bristol, UK, 27-29 de março 2012. Disponível em: <http://digital-library.theiet.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=IEECPS0020120CP59200P185000001&idtype=cvi ps&gifs=Yes>
- (3) A. Tumageaniam; A. Keyhani; *Identification of synchronous machine linear parameters from standstill step voltage input data*. IEEE transaction on Energy Conversion, Vol. 10, pp. 232-240, (1995).
- (4) K.Á., Biró; L., Szabó; V. Iancu; H.C. Hedesiu; V. Barz; *On the synchronous machine parameter identification*. Workshop on Electrical Machines Parameters, Technical University of Cluj-Napoca, pp. 87-90 (2001).
- (5) Ohm, D. Y.; *Dynamic model of PM synchronous motors*, Drivetech, Inc., Blacksburg, Virginia, 2000.
- (6) J. Kinnunen; *Direct-on-line, Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Static and Dynamic Performance*. Ph. D Dissertation, Lappeenranta University of Technology, Finland, p. 170 (2007).
- (7) Rotating electrical machines - Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests. IEC 60034-4, 2008
- (8) IEEE Guide: test procedures for synchronous machines. Part I- Acceptance and performance testing, Part II- test procedures and parameter determination for dynamic analysis, IEEE Std 115-1995
- (9) G. El-Murr; D. Giaouris; J.W. Finch; *Online cross-coupling and self incremental inductances determination of salient permanent magnet synchronous machines*. Newcastle University UK, pp. 1-4, (2010).
- (10) BIMBHRA, P. S.; *Generalized Theory of Electrical Machines*; Khanna Publishers, Fifth edition; Delhi, 2011.

DADOS BIOGRÁFICOS



Walter Evaldo Kuchenbecker é Supervisor do Laboratório de Ensaios Elétricos na empresa WEG Equipamentos Elétricos S.A. Tem experiência em máquinas elétricas e é doutorando do Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal do ABC (UFABC). Seus tópicos de pesquisa são monitoramento, diagnóstico, detecção de falhas, procedimentos de testes e padronizações de geradores a ímãs permanentes.



Julio Carlos Teixeira é membro do IEEE, professor da Universidade Federal do ABC (UFABC). Possui graduação (1983) e mestrado em Engenharia Elétrica pela USP, Brasil. Obteve seu Ph.D. na INPG, França (1994).