



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

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO II

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

MODELAGEM E ESTUDOS DE DESEMPENHO DE GERADORES SÍNCRONOS HEXAFÁSICOS ESPECIAIS PARA APLICAÇÃO EM PARQUES EÓLICOS

**Paulo Henrique Barbosa Naves(*)
ELETRONORTE**

**José Carlos De Oliveira
UNIVERSIDADE FEDERAL
DE UBERLÂNDIA**

**Adeon Cecilio Pinto
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO VALE DO SÃO FRANCISCO**

RESUMO

Este artigo apresenta uma proposta de modelagem matemática destinada à representação de geradores síncronos hexafásicos especiais, no domínio do tempo, visando aplicações em sistemas de conversão de energia eólica de velocidade variável. A partir da representação feita e sua implementação computacional, procede-se a um conjunto de estudos de desempenho operacional da máquina especial inserida num complexo eólico simplificado comparando-a com uma trifásica convencional. Aspectos associados com formas de onda, melhoria das distorções harmônicas, melhor desempenho dos enrolamentos amortecedores, dentre outros, são focados e discutidos no âmbito do artigo e permitem ressaltar algumas propriedades vantajosas atreladas com emprego da máquina especial.

PALAVRAS-CHAVE

Energia Eólica, Gerador Síncrono Hexafásico, Modelagem, Simulação Computacional

1.0 - INTRODUÇÃO

Geradores síncronos hexafásicos são estudados desde épocas remotas. Por volta do ano de 1920 já se tem notícias do emprego destas máquinas em aplicações especiais que exigiam sistemas trifásicos de tensões com ângulos de defasagem de 60° [1], [2], [3]. Tendo por meta as aplicações em sistemas contendo retificadores e suas atrativas características associadas com o aumento do número de pulsos também motivaram o desenvolvimento de máquinas com as características especiais mencionadas [4], [5], [6]. Estas referências, todavia, não estão relacionadas diretamente com os sistemas eólicos.

Focando especificamente o uso de geradores síncronos hexafásicos especiais, com defasagem de 30° entre dois sistemas trifásicos produzidos pelo mesmo equipamento, como se faz necessário em sistemas eólicos, pode-se afirmar a existência de uma grande lacuna no meio científico. Neste particular, apenas em [7] há uma correlação direta entre a máquina sob foco e sua utilização em parques eólicos. O documento, entretanto, trata de um gerador constituído por ímã permanente e a rede eólica é extremamente simplificada em sua representação.

Dentre algumas propriedades que têm tornado o arranjo hexafásico especial atrativo para as aplicações em sistemas eólicos, em substituição às máquinas trifásicas convencionais, destacam-se as seguintes:

- Eliminação dos efeitos das componentes harmônicas de ordem 5, 7, etc no âmbito da operação da máquina, reduzindo, assim, a distorção harmônica total resultante em seu interior;
- Obtenção de uma tensão retificada de valor duplicado para uma mesma tensão gerada pela máquina;
- Melhorias associadas com a operação da bobina de campo do gerador;
- Compartilhamento da corrente de linha em duas parcelas, cada qual correspondente a 50% da corrente total

(*) SCN Quadra 06 Conj. A, Asa Norte – sala 901 B – Bloco B – CEP 70.716-901 Brasília, DF, – Brasil
Tel: (+55 61) 3429-8584 – Fax: (+55 61) 3328-6101 – Email: paulo.naves@eletronorte.gov.br

- suprida pela máquina ao retificador;
- Redução substancial da corrente nos enrolamentos amortecedores das máquinas síncronas;
- Atenuação dos torques oscilatórios presentes no eixo da máquina.

2.0 - ARRANJO FÍSICO E MODELAGEM DO GERADOR

O gerador síncrono hexafásico possui dois conjuntos de enrolamentos trifásicos (com bobinas defasadas de 120° entre si) defasados entre si de 30° . Sua estrutura apresenta-se constituída por dois conjuntos de enrolamentos trifásicos, identificados por abc e xyz , respectivamente. A Figura 1 evidencia o princípio construtivo da máquina sob análise. A figura ainda identifica os eixos de referência abc , xyz e aqueles classicamente conhecidos por dq .

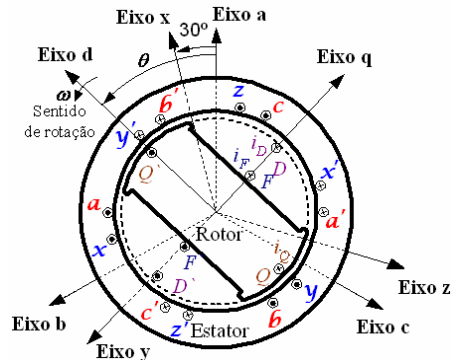


FIGURA 1 – Arranjo físico do gerador hexafásico.

Para se atingir as expressões representativas da máquina sob consideração, o primeiro passo consiste na determinação das expressões para as diversas indutâncias da máquina, levando em consideração que o acoplamento magnético entre cada par de enrolamentos é função da posição do rotor, principalmente quando do tratamento de máquinas de pólos salientes. Esta estratégia é fundamentada em [8].

Desta forma, a expressão (1) genericamente define o comportamento da indutância própria de uma fase do estator:

$$L_{ii} = (L_{s1} + L_{s2}) + L_m \cdot \cos(\theta + \alpha_i) \quad (1)$$

Sendo:

L_{ii} – indutância própria de cada fase do estator, onde o sub-índice ii deve assumir os valores de a, b, c, x, y e z , para $i = i$;

L_{s1} – parcela constante da indutância própria;

L_{s2} – indutância de dispersão do enrolamento i ;

L_m – amplitude do termo variável da indutância própria;

θ – ângulo que define a posição do rotor;

α_i – ângulo entre o eixo da fase sob análise e a referência.

A indutância mútua entre duas fases quaisquer do estator pode ser representada pela expressão a seguir:

$$L_{ik} = -M_s - L_m \cdot \cos[2(\theta + \alpha_{ik})] \quad (2)$$

A expressão geral que descreve a indutância mútua entre uma fase do estator e uma bobina do rotor é:

$$L_{ik} = M_k \cdot \cos(\theta + \alpha_{ik}) \quad (3)$$

No que tange à indutância própria do rotor, esta é dada pela equação (4).

$$L_{ii} = L_{r1} + L_{r2} \quad (4)$$

A expressão geral para uma indutância mútua entre as bobinas pertencentes ao rotor pode ser escrita como:

$$L_{ik} = L_{r1} \quad (5)$$

A partir do conhecimento das indutâncias que descrevem a operação da máquina torna-se factível a obtenção de expressões que correlacionam os fluxos magnéticos e as respectivas correntes presentes nos diversos enrolamentos que formam o gerador. Disto desprende a expressão (6).

$$[\lambda] = [L] \cdot [i] \quad (6)$$

O conjugado eletromagnético, por sua vez, pode ser obtido a partir do princípio de conservação de energia [9]. O resultado da aplicação deste fundamento conduz à:

$$T_e = \frac{p}{2} \sum_i \sum_k i_i i_k \frac{dL_{ik}}{d\theta} \quad (7)$$

A dinâmica do movimento de uma máquina síncrona [10] pode ser dada por:

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} = T_T - T_e \quad (8)$$

3.0 - CARACTERIZAÇÃO DO AEROGERADOR AVALIADO

A Figura 2 ilustra as partes constituintes de um aerogerador conectado à rede, conforme apresentado e utilizado em [11] e [12]. A figura pressupõe a presença de um gerador hexafásico, nos termos discutidos neste trabalho. O complexo contempla: o modelo equivalente do vento incidente na turbina eólica; o gerador síncrono; uma unidade para retificação/inversão; um transformador de acoplamento e o ponto de acoplamento do parque eólico com a rede CA de conexão.

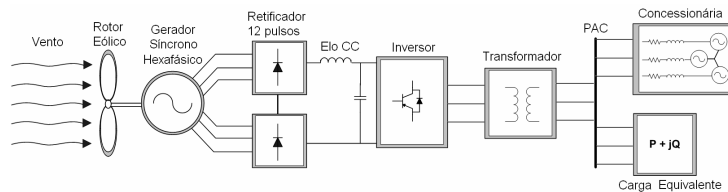


FIGURA 2 – Aerogerador conectado à rede.

Não obstante o reconhecimento que o sistema completo possui a topologia indicada, para maior simplicidade da análise dos resultados, o foco dos estudos subseqüentes foi direcionado a um arranjo mais simplificado, como indicado nas Figuras 3 e 4. Como se constata, para ambas as figuras foram omitidas as partes à jusante do retificador. Esta medida visou, acima de tudo, oferecer uma estratégia para uma melhor caracterização das formas de onda a serem avaliadas, evitando, assim, influências dos chaveamentos associados com o funcionamento dos inversores. Muito embora a análise dos resultados a jusante do aerogerador sejam relevantes, sobretudo quanto a aspectos relacionados à qualidade de energia, estes foram suprimidos do presente trabalho visto que ficou comprovado, através de estudos comparativos, que a interação do aerogerador com a rede apresentou resultados similares para os sistemas focados, não infringindo nenhum limite. Também, fica reconhecido que o primeiro complexo utiliza uma configuração retificadora de 12 pulsos, enquanto que o segundo, uma unidade de 6 pulsos.

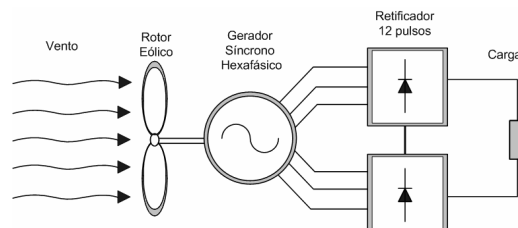


FIGURA 3 – Sistema simplificado com gerador hexafásico e retificador de 12 pulsos.

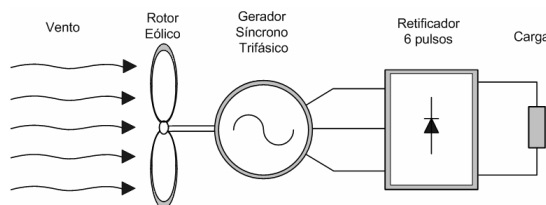


FIGURA 4 – Sistema simplificado com gerador convencional e retificador de 6 pulsos.

4.0 - ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DOS SISTEMAS

Os estudos computacionais foram realizados com o objetivo principal de estabelecer termos comparativos entre as grandezas de desempenho, em especial quanto às formas de onda e valores de distorção harmônica. Para tanto foram focadas as seguintes variáveis de operação:

- Tensões trifásicas nos terminais do gerador;
- Correntes trifásicas de suprimento do retificador;
- Fluxos magnéticos no interior da máquina;
- Conjugados eletromagnéticos;
- Correntes de campo;
- Correntes nos enrolamentos amortecedores;
- Tensão retificada e;
- Corrente retificada.

No que diz respeito à fonte primária de energia, ou seja, o vento admitiu-se ambos os sistemas operando sob condições idênticas, sem qualquer turbulência. A Tabela 1 indica os parâmetros utilizados para os geradores em estudo.

Tabela 1 – Parâmetros dos geradores.

Descrição	Simbologia	Valor
Potência nominal - (MVA)	S_{nom}	1
Tensão nominal - (kV)	V_{nom}	0.6
Reatância síncrona de eixo direto - (pu)	X_d	1,225
Reatância síncrona de eixo em quadratura - (pu)	X_q	1,133
Reatância de dispersão de uma fase do estator - (pu)	X_l	0,15
Reatância transitória de eixo direto - (pu)	X'_d	0,248
Reatância subtransitória de eixo direto - (pu)	X''_d	0,184
Reatância subtransitória de eixo em quadratura - (pu)	X''_q	0,212
Resistência por fase do estator - (pu)	R_s	0,013
Constante de tempo transitória de eixo direto de circuito aberto - (s)	T'_{d0}	0.108
Constante de tempo subtransitória de eixo direto de circuito aberto - (s)	T''_{d0}	0,044
Constante de tempo subtransitória de eixo em quadratura de circuito aberto - (s)	T''_{q0}	0,0017
Momento de inércia das partes girantes - (s)	Inercia	50000
Corrente do campo a vazio - (A)	I_{rotor}	200
Velocidade - (rad/s)	ω	3,65
Frequência - (Hz)	f	17
Número de pólos	p	60

Para a avaliação comparativa dos valores de tensão e correntes nas saídas dos geradores, o procedimento adotado consiste em estabelecer uma correlação entre as grandezas das fases *abc* do gerador trifásico e as correspondentes grandezas das fases *abc* do gerador hexafásico. O motivo disto está no fato que os desempenhos dos conjuntos de enrolamentos *abc* e *xyz*, são bastante semelhantes, diferindo apenas pela defasagem de 30°. Nas figuras são utilizados os índices (6Φ) e (3Φ) para diferenciar as formas de onda dos geradores hexafásico e convencional (trifásico), respectivamente.

A Figura 5 mostra, em detalhes, as tensões nos terminais de cada um dos geradores estudados. Observa-se que apenas as tensões entre as fases *a* e *b*, para ambas as máquinas, são inseridas no gráfico. O valor da distorção harmônica total de tensão de linha do gerador hexafásico foi menor do que para a máquina convencional. O valor de 8,43% (convencional) foi reduzido para 5,6% (hexafásica).

A Figura 6 ilustra as correntes de linha fornecidas por cada uma das máquinas focadas no estudo. Um dos pontos a ser destacado está na amplitude das correntes, pois para o caso do gerador hexafásico observa-se que a corrente se apresenta com 50% do valor do outro gerador. Isto é uma consequência direta do fato que a máquina especial possui dois enrolamentos supridores por fase, portanto, a correspondente total deverá ser multiplicada por 2. Os respectivos conteúdos harmônicos são praticamente os mesmos para ambas, o que seria esperado pois ambas encontram-se suprindo retificadores de 6 pulsos.

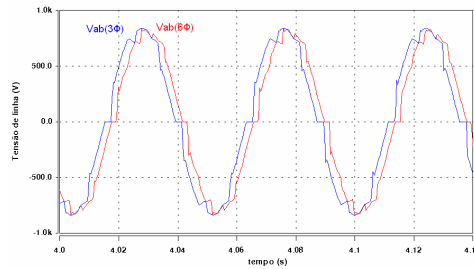


FIGURA 5 – Tensões de linha nos terminais dos dois geradores.

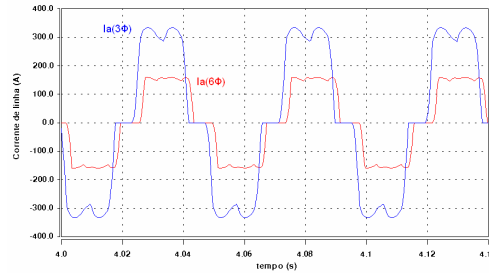


FIGURA 6 – Correntes de linha para os dois geradores.

Os fluxos magnéticos associados com cada fase, indicados na Figura 7, são também bastante semelhantes para ambos geradores e não apresentam distorções apreciáveis.

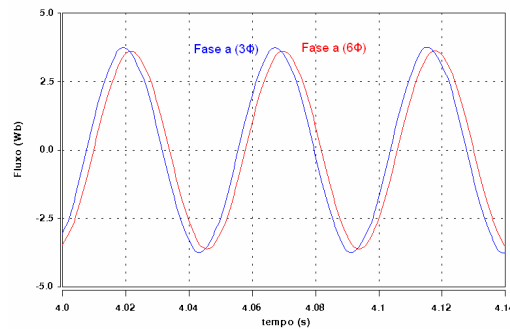


FIGURA 7 – Fluxos magnéticos na fase a para os dois geradores.

A Figura 8 é indicativa do conjugado eletromagnético produzido por cada um dos geradores. É evidente a redução obtida na amplitude da oscilação pela utilização da configuração hexafásica. O valor da distorção harmônica total também foi significativamente diminuído. Consta-se que a distorção total para a máquina hexafásica é de cerca de 40% do valor encontrado para a convencional. A componente harmônica decisiva que impactou nesta redução está na eliminação daquela de ordem 6.

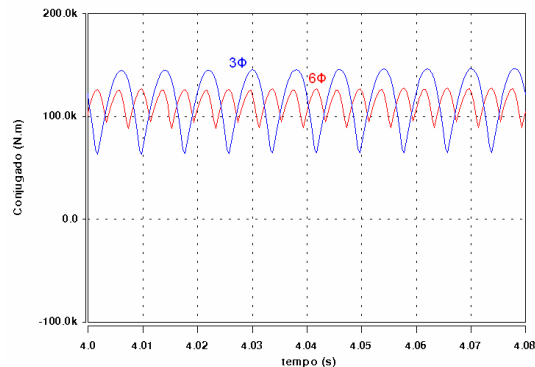


FIGURA 8 – Conjugados produzidos pelos geradores: trifásico e hexafásico.

Comparando as formas de onda obtidas para as correntes de campo de cada máquina, nota-se, também, grandes reduções das oscilações presentes quando do emprego da geração hexafásica. A Figura 9 destaca este fato e

permite concluir que a distorção harmônica total foi reduzida para cerca de 40% do valor encontrado para a máquina trifásica convencional.

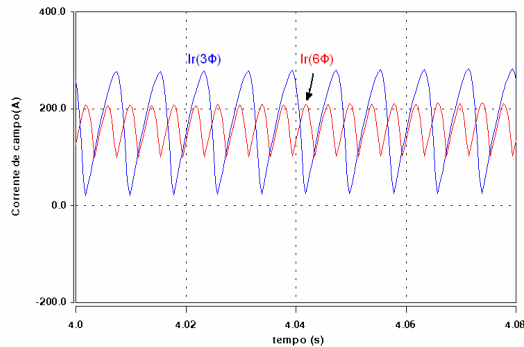


FIGURA 9 – Correntes de campo para os dois geradores.

Somado às propriedades positivas anteriormente observadas, vale ainda ressaltar que o emprego da geração hexafásica traz expressivos ganhos quanto a redução das correntes que se manifestam nos enrolamentos amortecedores. Neste particular, a Figura 10 permite uma pronta comparação entre as situações encontradas com um e outro gerador. Conforme já mencionado, sob condições ideais de funcionamento esta corrente deveria ser nula, entretanto, devido a características não senoidais envolvidas no processo, tal situação não se manifesta. Contudo, o arranjo hexafásico possibilitou a redução de cerca de 60% no valor eficaz dessa corrente, amenizando os problemas associados à circulação indevida da mesma, para este tipo de aplicação.

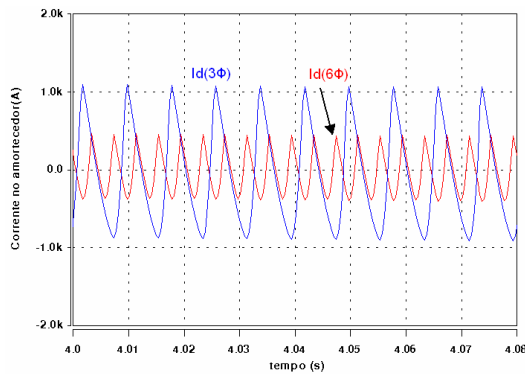


FIGURA 10 – Correntes nos enrolamentos amortecedores de eixo direto para os dois geradores.

Uma outra importante característica associada com o emprego do arranjo hexafásico e utilização de uma unidade retificadora de 12 pulsos está na possibilidade de se dobrar o valor da tensão retificada, sem a necessidade do uso de uma máquina de classe de tensão superior. Ainda somando aos aspectos positivos, fica também reconhecido que, o emprego de retificadores de 12 pulsos conduz a uma tensão CC com menor nível de distorção. Estas propriedades podem ser facilmente vistas na Figura 11.

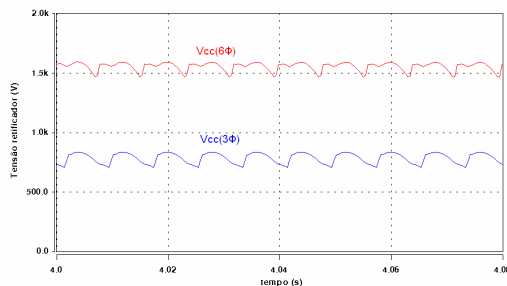


FIGURA 11 – Tensões retificadas para os dois sistemas.

A corrente contínua obtida na saída do retificador também sofre melhorias com a utilização do sistema hexafásico, como evidenciado na Figura 12. A distorção total de corrente foi reduzida em cerca de 60%. Quanto ao nível da corrente, este se apresenta com 50% do valor relacionado com o gerador convencional, porém, como já observado, a tensão CC é dobrada para a máquina hexafásica.

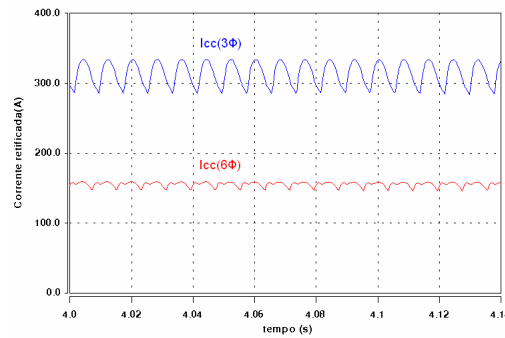


FIGURA 12 – Corrente retificada para os dois sistemas.

A Tabela 2 sintetiza os principais valores numéricos obtidos para as duas configurações investigadas e, novamente, fica clara a superioridade do desempenho do aerogerador que faz uso da geração síncrona hexafásica especial.

Tabela 2 – Síntese comparativa entre os resultados obtidos.

Grandeza	Gerador Hexafásico		Gerador Trifásico	
	Valor Eficaz	Distorção Harmônica a Total [%]	Valor Eficaz	Distorção Harmônica a Total [%]
Tensão de linha (V)	582	5,6	586	8,43
Corrente de linha (A)	125	25	256	25
Fluxo (Wb)	2.58	0,62	2.65	1,13
Conjugado (N.m)	91502	13,5	91651	33
Corrente de campo ou excitação(A)	183	28	186	68
Corrente no enrolamento amortecedor de eixo direto (A)	275	28	643	35
Tensão retificada (V)	1564	3,06	784	7,7
Corrente retificada(A)	155	2,85	313	7,26

Ainda visando oferecer uma base comparativa mais clara entre os resultados associados com as distorções harmônicas, a Figura 13 correlaciona as distorções harmônicas para as diversas grandezas avaliadas.

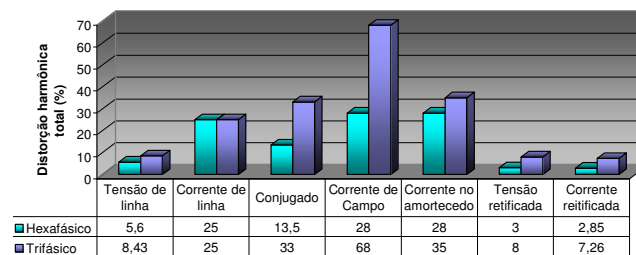


Fig. 13. Gráfico comparativo das distorções totais para as diversas grandezas.

5.0 - CONCLUSÕES

O artigo apresentou uma base matemática para a modelagem de geradores síncronos hexafásicos especiais, conforme determinado pela atual tendência dos parques eólicos. As representações culminaram por um conjunto de expressões que utilizam técnicas do domínio do tempo, fato este de grande relevância para os estudos das formas de onda associadas com o processo em pauta.

Após a respectiva implementação computacional do modelo, procedeu-se a um conjunto de estudos avaliativos do desempenho de um aerogerador simplificado, através do qual foi possível correlacionar a operação dos dois sistemas investigados, um constituído pelo gerador especial e outro por uma máquina trifásica convencional. Os resultados ressaltaram as vantagens operacionais atreladas com a unidade hexafásica e destacaram os motivos que justificam o avanço da tecnologia em pauta.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SCHIFERL, R.F., ONG, C.M. Six Phase Synchronous Machine with AC and DC Stator Connections, Part I: Equivalent Circuit Representation and Steady-State Analysis; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Agosto 1983, páginas 2685 – 2693.
- (2) FUCHS, E. F., and ROSENBERG, L. T., Analysis of an Alternator with Two Displaced Stator Windings; IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 93, No. 6, 1974, páginas. 1776-1786.
- (3) HEGNER, H. J., KRAUSE, P. C., WASYNCZUK, O., E. Water, PEKAREK, S., Parameter measurement of a six-phase synchronous machine for simulation of machine/converter systems; Energy Conversion Engineering Conference, 1996.IECEC96. Proceedings of the 31st Intersociety, Agosto 1996, páginas 1792 – 1797 vol.3.
- (4) JATSKEVICH, J., PEKAREK, S. D., Six-phase synchronous generator-rectifier parametric average value modeling considering operational modes; HAIT Journal of Science and Engineering B, Volume 2, Issues 3-4.
- (5) ZHANG K., KOJABADI, H. M., WANG, P. Z., CHANG, L., Modeling of a Converter-Connected Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Generator; Power Electronics and Drives Systems, 2005. PEDS 2005. International Conference on Volume 2, 28-01 Novembro, 2005 páginas:1096 – 1100.
- (6) SUDHOFF, S.D., Analysis and average-value modeling of a dual line-commutated converter – 6-phase synchronous machine systems; IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 8, No. 3, Setembro 1993.
- (7) KATO, S., INUI, Y., MICHHIRA, M., TSUYOSHI, A., Low-Cost Wind Generator System with a Permanent Magnet Synchronous Generator and Diode Rectifiers; ICREPQ'06 International Conference on Renewable Energy and Power Quality, 2006.
- (8) MARTINS NETO, L., MENDONÇA, R. G., SILVA, R. V. R., PAULA, S. C. M., Three-Phase Induction Generator Feeding a Single- Phase Electrical Distribution System - Time Domain Mathematical Model; Proceedings of the IEEE - ACEMP 2001 - International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, 2001, Kusadasi.
- (9) SLEMON, G. R., STRAUGHEN, A., Electric Machines; Addison Wesley Publishing Co. Inc. Philippines, 1980.
- (10) KUNDUR, P., Power System Stability and Control; McGraw-Hill, Inc, 1994 – ISBN 0-07-035958-X
- (11) CARVALHO, B. C., Desenvolvimento de Modelo computacional de Sistemas Eólicos Utilizando Geradores Síncronos para Estudos de Desempenho no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica; Novembro de 2006, tese Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.
- (12) PINTO, A. C., Modelagem e Análise de Desempenho Dinâmico de Complexos Elétricos Contendo Centrais Eólicas Dotadas de Geradores Síncronos; Março de 2007, tese Universidade Federal de Uberlândia, Brasil.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Paulo Henrique Barbosa Naves nasceu em Araguari–MG em 1981, Brasil, obteve o grau de engenheiro eletricista e o de mestrado pela Universidade Federal de Uberlândia em 2005 e 2007, respectivamente. Atualmente atua como Engenheiro de Projetos e Construção na ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil, S.A.

José Carlos de Oliveira nasceu em Itajubá–MG, Brasil, tendo obtido o grau de engenheiro eletricista e o de mestrado pela Universidade Federal de Itajubá em 1970 e 1974, respectivamente. Em 1978 recebeu o título de PhD pela University of Manchester - Institute of Science Technology – Manchester-UK. Atualmente atua como professor titular e pesquisador da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia-Brasil, tendo por área de atuação principal a Qualidade da Energia Elétrica.

Adeon Cecilio Pinto nasceu em Abadia dos Dourados–MG, Brasil. Tendo obtido o grau de engenheiro eletricista, de mestrado e de doutorado pela Universidade Federal de Uberlândia, em 1999, 2002 e 2007 respectivamente. Atualmente atua como professor adjunto na Universidade Federal do Vale do São Francisco.

Bismarck Castillo Carvalho nasceu em Roboré– Santa Cruz, Bolívia. Tendo obtido o grau de engenheiro eletricista pela Universidade Federal do Mato Grosso em 1981. Em 2002 e 2007, recebeu os títulos de mestre e doutor, respectivamente, pela Universidade Federal de Uberlândia. Atualmente atua como professor adjunto na Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Mato Grosso.