

# DESENVOLVIMENTO DE UMA NOVA ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE POTÊNCIA REATIVA EM GERADOR DE INDUÇÃO DE DUPLA ALIMENTAÇÃO PARA TURBINAS EÓLICAS

Rodrigo Gaiba de Oliveira, João Lucas da Silva, Selênio Rocha Silva  
Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
Avenida Antônio Carlos, 6627 – Pampulha – CEP 31270-010, Belo Horizonte - MG  
Brasil  
e-mail: rgaiba@cpdee.ufmg.br, joaolucas@cpdee.ufmg.br, selenios@cpdee.ufmg.br

Balduino Rabelo Junior, Wilfried Hofmann  
Universidade Tecnológica de Chemnitz – Laboratório de Máquinas Elétricas  
Reichenhainer Str. 70 – 09127, Chemnitz - SA  
Alemanha  
e-mail: barab@hrz.tu-chemnitz.de, wilfried.hofmann@e-technik.tu-chemnitz.de

**Resumo** – Devido ao alto nível de inserção de usinas eólicas, na rede elétrica, estão sendo requeridos pelos códigos de conexão na rede, que as modernas turbinas eólicas contribuam para a estabilidade da rede elétrica, ajustando-se a frequência através do controle da potência ativa e a tensão através da regulação da potência reativa. Baseado neste contexto, este trabalho apresenta uma nova estratégia de controle de potência reativa utilizando uma máquina de indução de dupla alimentação, um dos tipos de geradores mais utilizados atualmente em usinas eólicas no mundo. A estrutura e o projeto da estratégia de controle desenvolvida são apresentados, assim como, os resultados experimentais obtidos em uma bancada de testes de 4kW.

**Palavras-Chave** – controle de potência reativa, energia eólica, fontes renováveis, gerador de indução de dupla alimentação.

## DEVELOPMENT OF A NEW REACTIVE POWER CONTROL STRATEGY IN DOUBLY-FED INDUCTION GENERATORS FOR WIND TURBINES

**Abstract** – Due to the high penetration level of wind power generation in the connected network, modern wind turbines are required by the grid connection codes to contribute to network stability, by influencing the frequency through active power control and the voltage by means of reactive power regulation. Based in this context, this work presents a new control strategy for the reactive power using the doubly-fed induction machine, one of the most used generator types in wind power plants. The control structure and design for the single machine is presented as well as experimental results of the implementation in a 4 kW test bench.

**Keywords** – doubly-fed induction generator, reactive power control, renewable sources, wind energy.

Artigo submetido em 28/04/2008. Revisão em 05/08/2008. Aceito por recomendação do editor Fernando L. M. Antunes.

## NOMENCLATURA

DFIG	Doubly-Fed Induction Generator
MSC	Mains Side Converter
RSC	Rotor Side Converter

## I. INTRODUÇÃO

Desde 1980 a indústria de energia eólica está crescendo a passos largos. Os últimos fatos relacionados com elevação do preço do petróleo e as mudanças climáticas vêm acelerando ainda mais a utilização sustentada de fontes alternativas de energia, principalmente, eólica [1]. Em sintonia com a grande inserção de usinas eólicas na rede elétrica foram criados os códigos de conexão na rede, que requer destas usinas uma contribuição na regulação da frequência e tensão da rede, através do controle das potências ativa e reativa [2].

O controle da potência reativa da rede elétrica e, conseqüentemente, do fator de potência, em uma usina eólica, é determinado de acordo com o tipo de gerador utilizado. A estrutura mais simples é feita com um gerador de indução de rotor em gaiola, diretamente conectado na rede elétrica, utilizando-se um banco de capacitores, projetado tipicamente para fornecer a potência reativa consumida pelo estator do gerador, quando este opera a vazio. Assim, a parcela adicional de potência reativa, quando a máquina está carregada, é fornecida pela rede elétrica, deixando bem claro que esta maneira é uma forma de controle pouco eficiente.

Sistemas de geração equipados com conversores estáticos de potência permitem o controle da potência ativa gerada e, principalmente, da potência reativa, de uma forma muito mais eficiente [3]-[4]. Vale a pena mencionar o quanto é importante ter a opção de se controlar a potência reativa, pois com esta alternativa de controle é possível operar o sistema de geração com um alto fator de potência e, inclusive, fornecer potência reativa para a rede, desde que se tenham incentivos fiscais compensatórios para isto. O controle da potência reativa pode, também, ser usado para o controle do nível de tensão na rede (regulador de tensão), incluindo-se uma malha externa de controle de tensão da rede elétrica, e desta forma, as flutuações de tensão, causadas devido à produção de potência ativa, podem ser neutralizadas [5].

Um dos sistemas de geração mais empregados em usinas eólicas, no mundo, utiliza uma máquina de indução de rotor bobinado, com o estator conectado diretamente na rede e o rotor conectado via conversor estático [6]. Neste sistema de geração, denominado de dupla alimentação (DFIG), o conversor estático é formado por dois conversores trifásicos, sendo um conectado aos terminais de rotor da máquina de indução (RSC) e outro conectado à rede elétrica (MSC). Estes conversores são interligados por um barramento em corrente contínua, formando um conversor reversível em potência, permitindo com isso, um controle desacoplado das variáveis do sistema [7]-[8]. Assim, com o controle individual de cada uma das partes do conversor de potência, diversas formas de controle da potência reativa, para sistemas eólicos, são apresentadas em uma grande parte dos trabalhos encontrados na literatura técnica atual [8]-[9]. Entretanto, não há informações sobre uma estratégia de controle de potência reativa, que é feita através do controle simultâneo dos conversores estáticos (da rede e do rotor) do sistema de geração. Baseado neste contexto, este trabalho descreve uma estratégia de controle da potência reativa total da rede elétrica (via RSC e MSC), garantindo a operação com alto fator de potência, levando em consideração o ponto de operação do gerador de indução, priorizando sempre o fornecimento de potência ativa para a rede elétrica, através de um esquema de saturação dinâmica. É importante ressaltar que, o diferencial desta estratégia de controle está no fato de se permitir balancear a distribuição do controle de potência reativa, de forma a se obter um maior aproveitamento da potência aparente disponível dos conversores.

## II. ESTRATÉGIA DE CONTROLE CLÁSSICA

A estratégia de controle do gerador de indução de dupla alimentação, cuja topologia é apresentada na Figura 1, é baseada em uma estrutura de controle em cascata, com as malhas internas de corrente orientada em referencial síncrono, através da posição do vetor tensão da rede ou do fluxo de estator [10]-[11]. As saídas dos controladores de corrente são as tensões de referências para o modulador vetorial (SV-PWM), que gera os pulsos para as chaves estáticas dos conversores. Neste trabalho, a escolha da orientação pelo vetor tensão da rede foi feita baseada nas vantagens inerentes deste referencial, como melhor intervalo de estabilidade para operação, quando comparado com a orientação pelo vetor fluxo de estator, assim como a decomposição direta das componentes ativas e reativas das correntes [11]-[12]. As referências das malhas de controle de corrente são obtidas a partir das malhas externas de controle de tensão do barramento CC ( $U_{DC}$ ), controle de velocidade do gerador de indução ( $\omega_r$ ) e controle de potência reativa [3].

De acordo com o referencial adotado para orientação das correntes nesta estratégia, a componente de corrente de eixo direto é responsável pelo controle da potência ativa e, similarmente, a componente de eixo em quadratura é utilizada para controle da potência reativa. Assim, as componentes de eixo direto dos conversores MSC e RSC são responsáveis pelo controle da tensão do barramento CC e velocidade do gerador, respectivamente. Por outro lado, as correntes de eixo em quadratura são utilizadas para controlar a produção de potência reativa em ambos conversores [7].

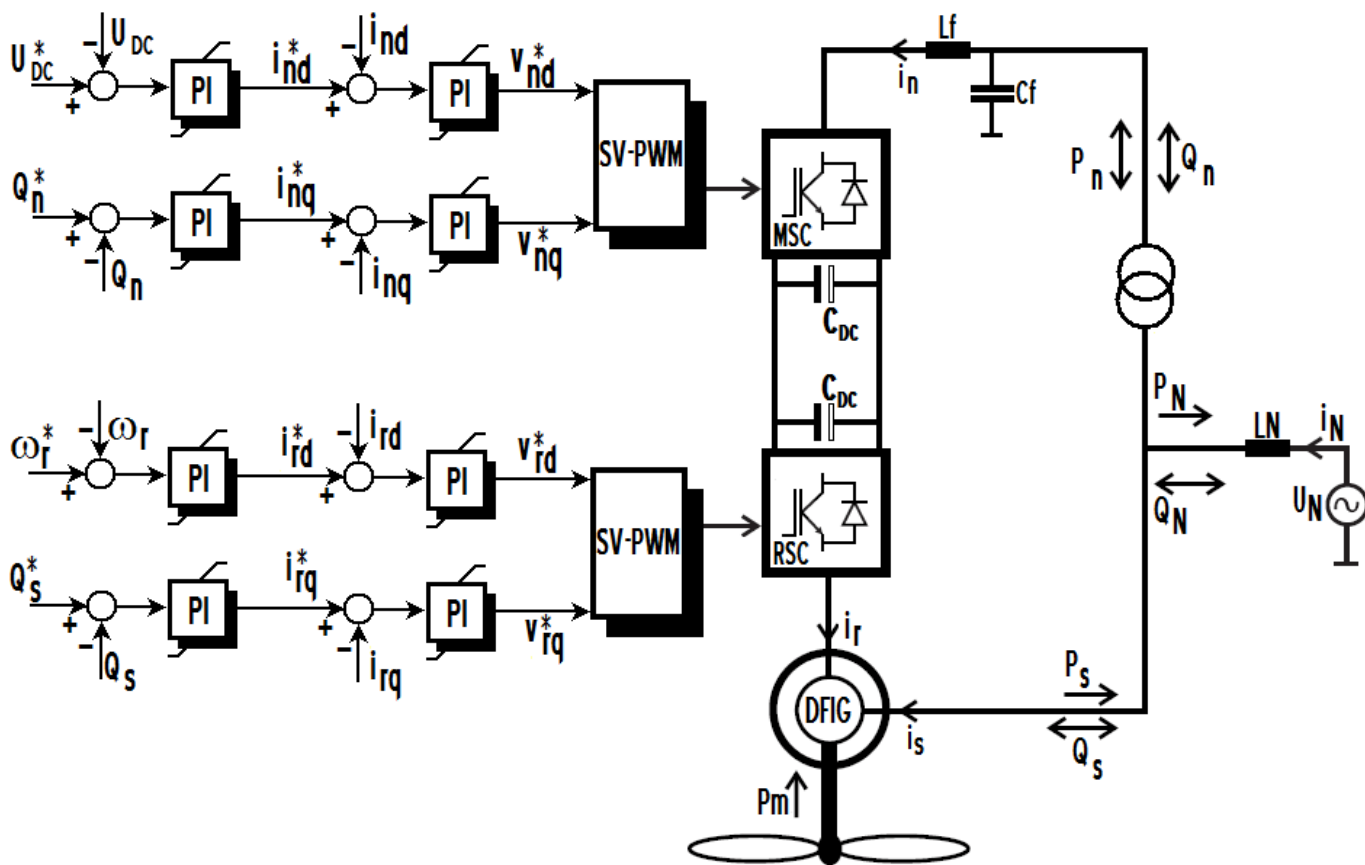


Fig. 1. Topologia do sistema eólico equipado com gerador de indução de dupla alimentação e estrutura de controle típica.

### III. CONTROLE DA POTÊNCIA REATIVA

Com a orientação adotada para a estratégia de controle, a tensão da rede ( $U_N$ ) e o fluxo de estator ( $\lambda_s$ ) podem ser simplificados como apresenta (1) e (2), respectivamente.

$$\vec{U}_N = U_{Nd} + j0 \quad (1)$$

$$\vec{\lambda}_s = 0 - j\lambda_{sq} \quad (2)$$

Assim, o controle da potência reativa com os conversores, da rede e de rotor, podem ser obtido de forma independente.

#### A. Controle da potência reativa via MSC

Através do controle da fase entre a tensão e a corrente, de entrada do conversor da rede, é possível controlar o consumo ou fornecimento de potência reativa para a rede elétrica ( $Q_n$ ), através do conversor MSC, sendo que, com a consideração feita em (1), a potência reativa pode ser expressa como apresenta (3).

$$Q_n = -\frac{3}{2}(U_{Nd}i_{nq}) \quad (3)$$

Assim, a potência reativa pode ser controlada em função apenas da componente reativa da corrente de entrada do conversor do lado da rede, utilizando-se um controlador proporcional e integral (PI), como apresenta a Figura 2.

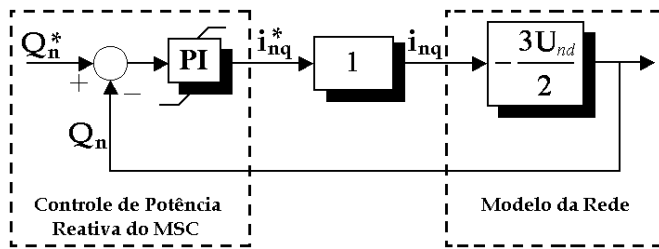


Fig. 2. Malha de controle de potência reativa do conversor da rede.

A malha interna de corrente é projetada para ser mais rápida, e com isso, pode ser representada por um ganho unitário. O projeto do controlador de potência reativa é feito através da alocação dos pólos de malha fechada, de forma a garantir um controle sem sobre-sinal e sem oscilações, como desejado pelas companhias de geração de energia.

#### B. Controle da potência reativa de estator via RSC

Uma análise similar é feita para o conversor RSC e, conseqüentemente, para a potência reativa de estator do gerador de indução ( $Q_s$ ), que de acordo com a consideração feita em (2), pode ser expressa por (4).

$$Q_s = -\frac{3}{2}\lambda_{sq}\omega_s \left( \frac{\lambda_{sq}}{L_{ss}} - \frac{M}{L_s} i_{rq} \right) \quad (4)$$

Desconsiderando-se o termo constante em (4), a potência reativa de estator pode ser controlada em função apenas da componente reativa da corrente de rotor ( $i_{rq}$ ), utilizando-se um controlador proporcional e integral (PI), como apresenta a Figura 3. Desta forma, com a obtenção da malha fechada, o critério de alocação de pólos também pode ser aplicado, para obtenção dos valores dos ganhos dos controladores de potência reativa de estator, obedecendo aos mesmos requerimentos de operação suave e sem oscilações.

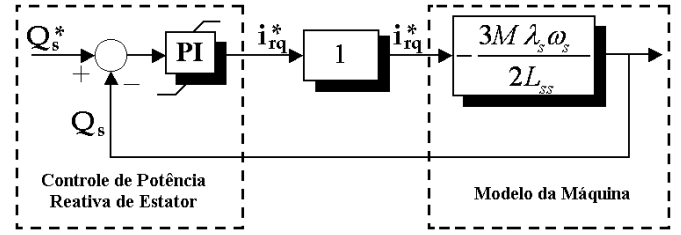


Fig. 3. Malha de controle de potência reativa do estator de gerador.

### IV. ESTRATÉGIA CONTROLE PROPOSTA

Uma das grandes vantagens dos sistemas equipados com gerador de indução de dupla alimentação é a capacidade de se controlar a potência reativa independente da potência ativa, em cada um dos conversores. O fluxo de potência reativa, neste sistema de geração, é apresentado na Figura 4.

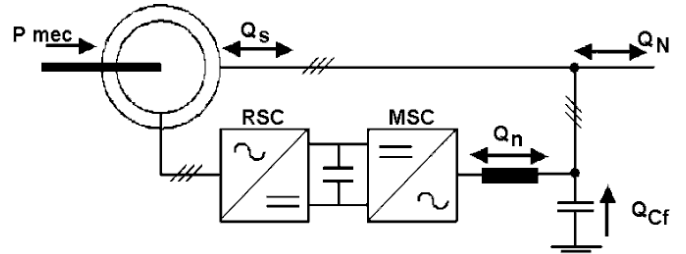


Fig. 4. Fluxo de potência reativa no sistema DFIG.

O controle da potência reativa e, principalmente, do fator de potência, faz mais sentido no ponto de conexão da turbina eólica com a rede elétrica. Assim, o controle da potência reativa total, no ponto de conexão com a rede, é possível devido à capacidade do controle das parcelas de potência reativa de estator do gerador (via conversor de rotor) e do conversor do lado da rede, uma vez que a potência reativa total no ponto de conexão é formada pela soma destas últimas parcelas e por uma parcela constante, devido ao capacitor do filtro LC, como mostra (5).

$$Q_N = \pm Q_s \pm Q_n - Q_{Cf} \quad (5)$$

Onde:

$Q_N$  - potência reativa total no ponto de conexão da rede.

$Q_{Cf}$  - potência reativa do capacitor do filtro.

A partir destas possibilidades foi desenvolvida uma estratégia de controle, onde ambos conversores (RSC e MSC) são controlados simultaneamente, de forma a se obter um controle da potência reativa total da rede. O esquema de controle é ilustrado, simplificado, na Figura 5.

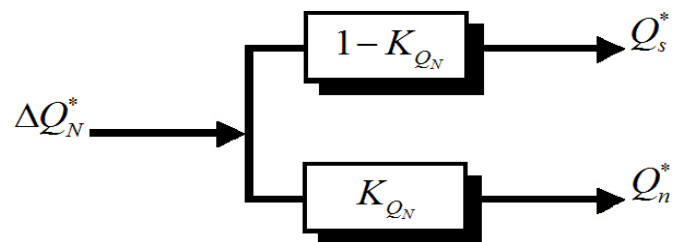


Fig. 5. Referência para as malhas controle de potência reativa, obtida pela divisão da variação desejada.

Como pode ser visto, as referências para as malhas de controle são obtidas em função da variação desejada de potência reativa ( $\Delta Q_N$ ), multiplicando-se por um ganho proporcional para divisão ( $K_{QN}$ ). Equacionando, tem-se que:

$$\Delta Q_N^* = Q_N^* - Q_{N_{BASE}} \quad (6)$$

$$Q_s^* = \Delta Q_N^* (1 - K_{QN}) \quad (7)$$

$$Q_n^* = \Delta Q_N^* (K_{QN}) \quad (8)$$

Onde:

$Q_N^*$  - potência reativa da rede elétrica desejada.

$Q_n^*$  - potência reativa de referência para controle - MSC.

$Q_s^*$  - potência reativa de referência para controle - RSC.

## V. LIMITAÇÃO DINÂMICA DO CONTROLE

Os limites dinâmicos de controle são obtidos em função da potência aparente do conversor estático reversível e do gerador de indução. Desta forma, o limite máximo ( $Lim_{MAX}$ ) para o conversor MSC é calculado em função da potência aparente disponível, dado por (9), sendo este determinado em cada ponto de operação, obtendo-se assim uma saturação dinâmica do controle. É importante salientar que, o limite mínimo de controle ( $Lim_{MIN}$ ) é igual ao valor do limite máximo, porém negativo.

$$Lim_{MAX}(Q_n^*) = \sqrt{S_n^2 - P_n^2} \quad (9)$$

Onde:

$S_n$  - potência aparente do conversor MSC.

$P_n$  - potência ativa fornecida ou absorvida pelo MSC.

A limitação para o controle da potência reativa de estator é feita de forma diferente, ao apresentando anteriormente para o controle do conversor MSC. O limite inferior de potência reativa de estator foi definido constante e igual a zero, como mostra (10), mesmo que na literatura técnica, possa ser encontrado, que a máquina de indução de dupla alimentação seja capaz de operar fornecendo potência reativa para a rede elétrica, via circuito de estator do gerador [11].

$$Lim_{MIN}(Q_s^*) = 0 \quad (10)$$

Este valor do limite mínimo foi definido, pelo fato de quanto maior a necessidade de se controlar a potência reativa de estator via conversor de rotor, maior é a necessidade de corrente no rotor da máquina, conseqüentemente, maior será a potência dissipada no rotor (parte central da máquina) e também, maiores serão as perdas nas chaves dos conversores. O limite superior de controle foi definido em função da potência aparente do gerador, conforme mostra (11), sendo esta limitação variável em função do ponto de operação, priorizando o fornecimento de potência ativa pelo sistema.

$$Lim_{MAX}(Q_s^*) = \sqrt{S_s^2 - P_s^2} \quad (11)$$

Onde:

$S_s$  - potência aparente do estator do gerador.

$P_s$  - potência ativa fornecida para a rede pelo estator.

O diagrama de blocos ilustrando a saturação dinâmica para a referência de potência reativa, do conversor MSC ( $Q_n^*$ ) e do conversor RSC ( $Q_s^*$ ), é apresentado na Figura 6.

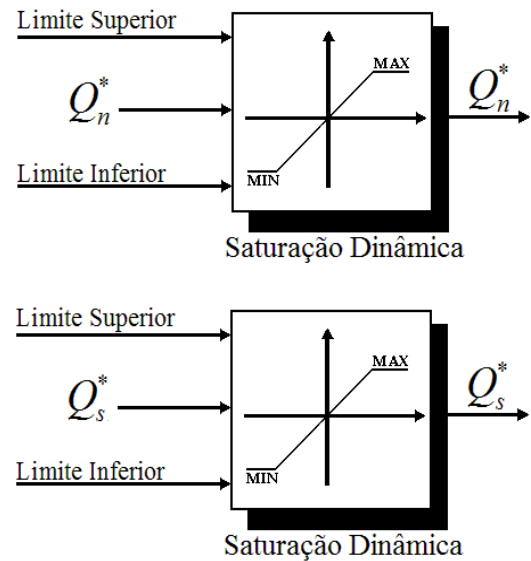


Fig. 6. Saturação dinâmica da referência para a estratégia de controle de potência reativa proposta.

## VI. BANCADA EXPERIMENTAL

Os resultados experimentais foram obtidos na bancada experimental da Universidade Tecnológica de Chemnitz (Alemanha), durante o período do intercâmbio realizado entre Maio/2007 à Novembro/2007, orientado pelo Professor Dr. Wilfried Hofmann. A bancada experimental utilizada é composta por uma máquina de indução de rotor bobinado de 4kW, um conversor estático reversível em potência, conectado ao circuito de rotor, um filtro LC na entrada do conversor e um acionamento elétrico com motor de corrente contínua, que representa o simulador de turbina eólica. Os detalhes da montagem são apresentados na Figura 7, onde podem ser visualizados os conversores (MSC e RSC), a placa de condicionamento de sinais e computador dedicado de controle, onde está implementado o supervisor do sistema.

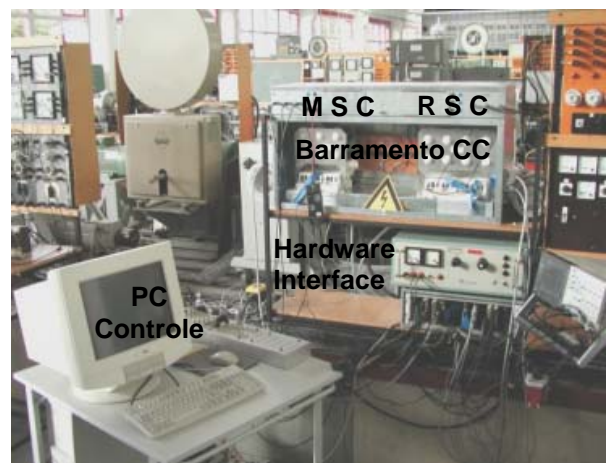


Fig. 7. Bancada experimental para controle do gerador de dupla alimentação do Laboratório de Acionamentos Elétricos.

A máquina de corrente contínua, utilizada para fornecer potência mecânica, o gerador de indução de dupla alimentação e o filtro LC, que conecta o conversor reversível à rede elétrica, podem ser visualizados na Figura 8.



Fig. 8. Gerador de indução de dupla alimentação, máquina de corrente contínua e filtro LC.

## VII. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Inicialmente, com ganho proporcional para divisão 0.2, uma variação na referência de potência reativa da rede elétrica, realizada em rampa, faz com que as referências das malhas de controle variem até a obtenção de potência reativa nula, para permitir a operação com fator de potência unitário. A variação da potência reativa do circuito de estator ( $Q_s$ ) e rotor ( $Q_n$ ), e suas respectivas referências, obtidas através da estratégia de controle proposta, são apresentadas na Figura 9.

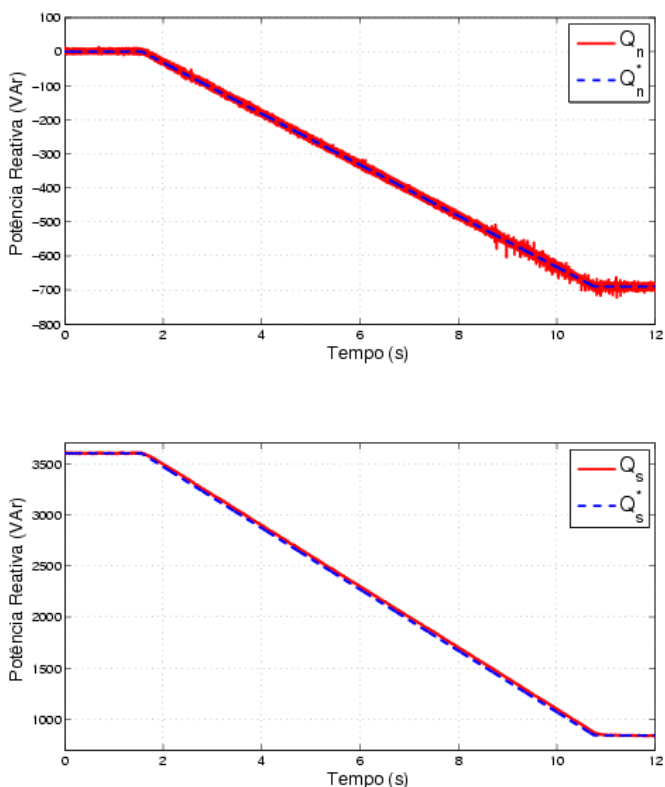


Fig. 9. Variação em rampa das potências reativas de estator e conversor MSC, obtidas durante controle dos conversores.

Com o resultado apresentado anteriormente, pode ser observado que a potência reativa consumida da rede, pelo estator do gerador, é reduzida de 3.6kVAR até 880VAR. Simultaneamente, a potência reativa do conversor da rede é aumentada de um valor zero até -700VAR (sinal negativo indica fornecimento), passando a fornecer para a rede elétrica 700VAR de potência reativa, em regime permanente. A parcela de potência reativa fornecida para a rede elétrica pelo capacitor do filtro é de, aproximadamente, -180VAR, e com isso, o consumo de potência reativa no ponto de conexão do sistema de geração eólico com a rede elétrica é igual a zero, implicando apenas na injeção de potência ativa na rede.

O fator de potência obtido no ponto de conexão com a rede elétrica, após o transiente realizado, pode ser visto na Figura 10, variando de -0.4 (indutivo) à -1, onde o sinal negativo é devido à potência ativa negativa, indicando modo de operação gerador, juntamente com a potência reativa total da rede ( $Q_N$ ), cujo valor final desejado e obtido é zero.

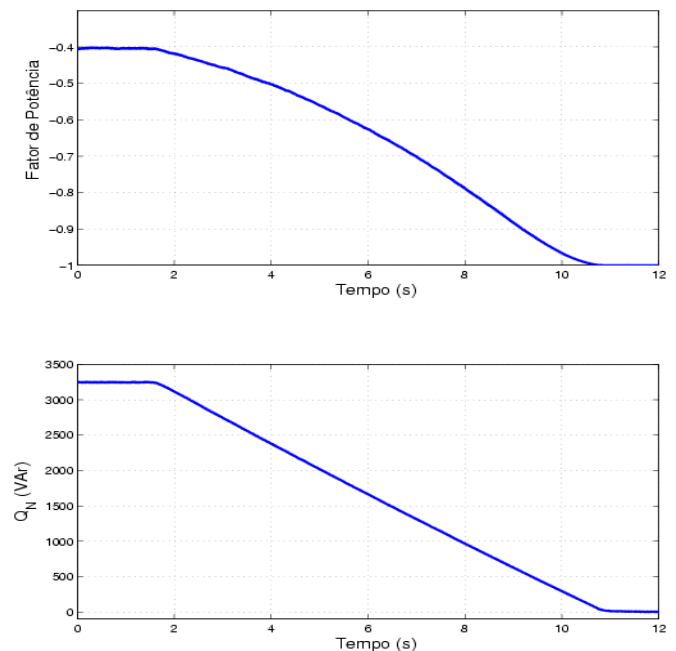


Fig. 10. Variação do fator de potência no ponto de conexão com a rede, durante transiente de controle de potência reativa.

Durante este transiente realizado, no controle de potência reativa, foi possível analisar o comportamento de todas as componentes das correntes do sistema de geração, buscando avaliar o desacoplamento entre os eixos cartesianos d-q. Assim, pode ser visualizada, na Figura 11, as componentes ativa e reativa, das correntes de estator ( $i_{sdq}$ ), correntes de rotor ( $i_{rdq}$ ) e correntes de entrada do conversor MSC ( $i_{ndq}$ ). Observa-se, claramente, que as componentes ativas das correntes do estator ( $i_{sd}$ ) e do rotor ( $i_{rd}$ ) do gerador, permanecem inalteradas durante o transiente, ou seja, estão sempre constantes, ilustrando que há um desacoplamento entre os eixos d-q. É importante ser ressaltado que uma alteração pode ser verificada na componente ativa da corrente de entrada do conversor MSC ( $i_{nd}$ ), devido ao aumento da demanda de corrente pelo circuito de rotor, para magnetizar a máquina pelos enrolamentos de rotor, e conseqüentemente, para manter a tensão do barramento CC na referência desejada.

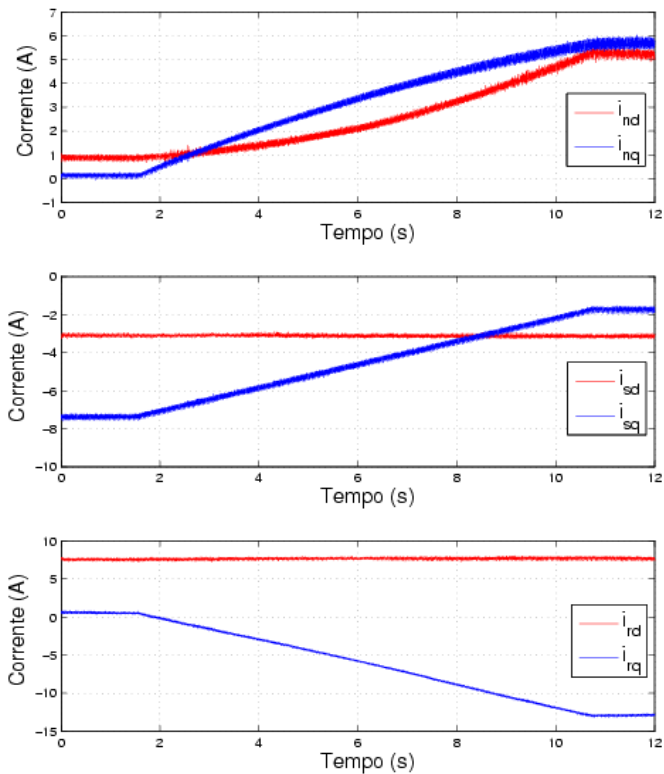


Fig. 11. Componentes ativas e reativas do sistema de geração.

A redução do consumo de potência reativa pelo estator, obtida através da magnetização do gerador pelo enrolamento de rotor, pode ser visto na Figura 12, onde observa-se claramente, que há uma redução significativa na componente reativa da corrente de estator ( $i_{sq}$ ) e, conseqüentemente, há uma redução na amplitude da corrente de fase ( $i_{sa}$ ), proporcionando correntes menores, que implicam em perdas menores nos enrolamentos de estator.

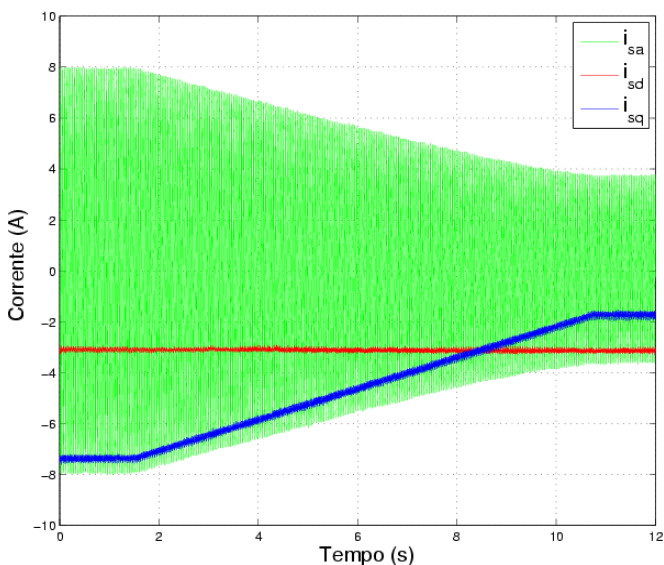


Fig. 12. Correntes de estator do gerador.

Por outro lado, como apresenta a Figura 13, há uma maior demanda de corrente no circuito de rotor, para manter constante a tensão no barramento CC e para a magnetização do gerador de indução via enrolamento de rotor, implicando em correntes maiores nos conversores MSC e RSC.

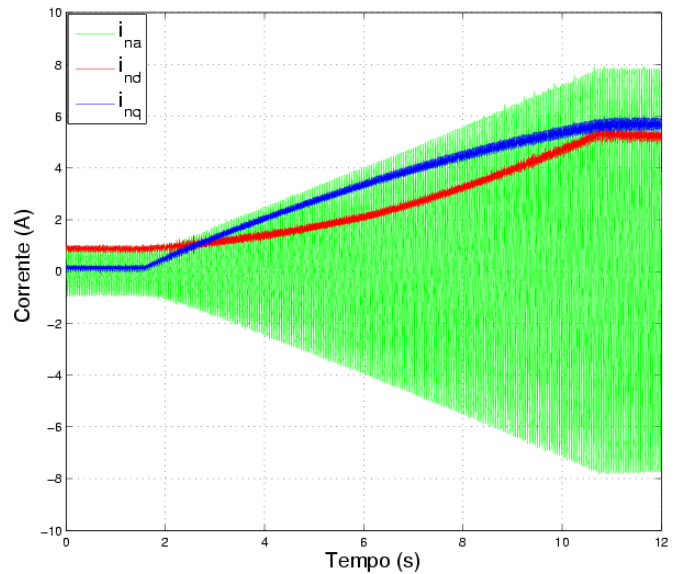


Fig. 13. Correntes do conversor da rede - MSC.

Este aumento na componente ativa da corrente de entrada do conversor MSC ( $i_{nd}$ ) e, conseqüentemente, no consumo de potência ativa da rede elétrica, pode ser visualizado claramente na Figura 14, onde é apresentada a potência ativa absorvida da rede pelo conversor MSC ( $P_n$ ), a potência ativa de estator ( $P_s$ ) e a potência total fornecida para a rede ( $P_N$ ). Observa-se que a potência ativa de estator permanece praticamente constante (1.5kW), durante todo o transitório realizado, enquanto que a potência total fornecida para a rede elétrica sofre uma pequena redução, provocada pelo aumento do consumo de potência ativa pelo conversor MSC. Assim, fica bastante nítido que, quanto maior for à necessidade de se controlar a potência reativa, menor será o fornecimento de potência ativa para a rede pelo sistema de geração eólico.

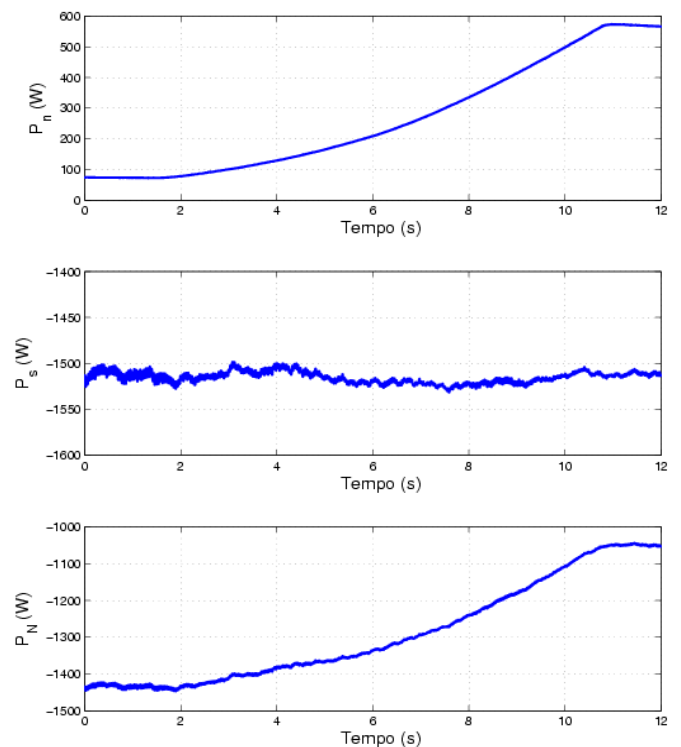


Fig. 14. Potências ativas do sistema de geração.

Com relação à potência aparente do conversor reversível, o aumento no consumo de potência ativa da rede elétrica, para o controle da potência reativa, pode provocar uma sobrecarga, principalmente, no conversor MSC. Porém, devido à saturação dinâmica implementada na estratégia de controle proposta, os limites máximos e mínimos são alterados, de forma que a potência aparente do conversor reversível nunca seja excedida. A análise da variação dos limites de saturação, apresentada na Figura 15, permite verificar o intervalo de controle de potência reativa. Inicialmente, os valores dos limites são de 1kVAR, pois a potência reativa do conversor MSC ( $Q_n$ ) é nula e a potência ativa absorvida da rede ( $P_n$ ) é muito pequena, suficiente apenas para manter a tensão no barramento CC constante. Durante o transitório realizado, pode ser observado claramente que, a medida em que se varia a referência de potência reativa e, simultaneamente, aumenta-se a necessidade de corrente ativa, isto implica em uma variação (redução) dos limites de controle, e conseqüentemente, do intervalo de controle, para que sempre seja priorizado o controle da potência ativa e, também, para que não seja excedida a potência aparente do conversor MSC.

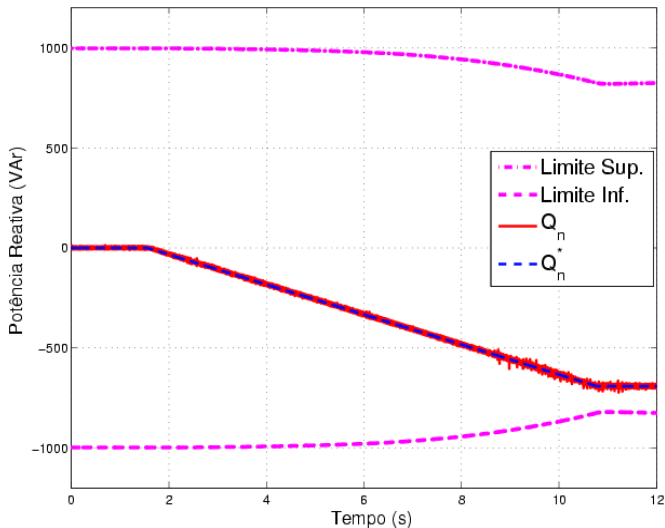


Fig. 15. Variação dinâmica dos limites de controle de potência reativa para o conversor MSC.

Este esquema de saturação dinâmica foi implementado, também, para evitar que o rotor do gerador de indução possa ser danificado, devido a correntes excessivas nos enrolamentos. Durante um incremento na velocidade de vento incidente na turbina eólica, a máquina de indução passa a aumentar a produção de potência ativa de estator, e conseqüentemente, tem-se um incremento na componente ativa de rotor ( $i_{rd}$ ). Desta maneira, o controle de potência reativa de estator, realizado através do controle da componente reativa da corrente de rotor ( $i_{rq}$ ), é saturado dinamicamente. A Figura 16 apresenta o resultado obtido durante um aumento na produção de potência ativa do estator, sendo que neste caso, a potência reativa de estator foi mantida constante e controlada em 2.5kVAR. Observa-se que, inicialmente, o limite superior é igual a 5kVAR, e o mesmo é reduzido na proporção em que se tem o aumento na produção de potência ativa pelo gerador, garantindo operação segura em toda a faixa de operação do sistema de geração.

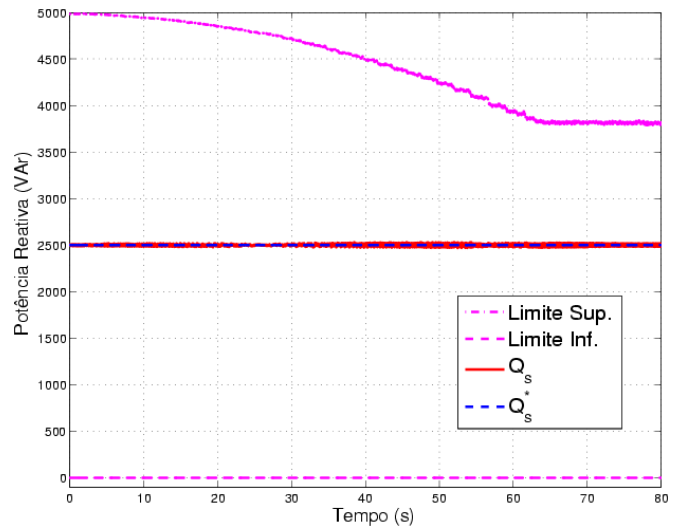


Fig. 16. Variação dinâmica dos limites de controle de potência reativa de estator.

Finalmente, o impacto causado na tensão do barramento CC, durante o transitório realizado para se obter a operação com fator de potência unitário, é ilustrado na Figura 17. A variação máxima na tensão do barramento CC foi de 2V, praticamente desprezível, pois a tolerância é de 20% ( $\pm 30V$ ).

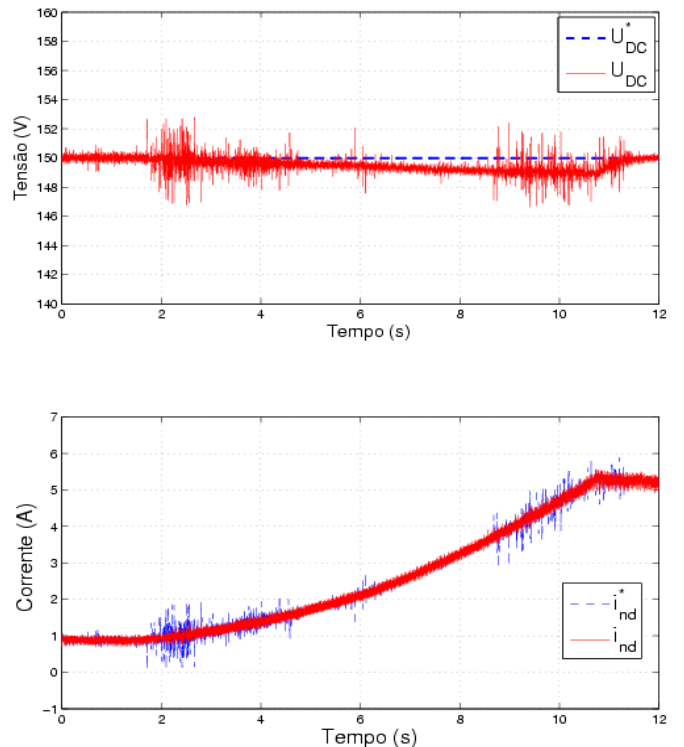


Fig. 17. Comportamento da tensão do barramento CC durante transitório em rampa da potência reativa.

## VIII. CONCLUSÕES

A estratégia de controle desenvolvida neste trabalho mostra-se uma importante ferramenta para o controle da potência reativa total da rede elétrica. Além de poder ser implementada facilmente em plantas já existentes, a grande vantagem desta estratégia está em fazer um melhor uso dos

conversores, buscando aumentar a capacidade de controle de potência reativa, pois a grande maioria das estratégias de controle disponíveis hoje no mercado, realiza apenas um controle via conversor do rotor (magnetizando o gerador via enrolamento de rotor), enquanto o conversor do lado da rede (MSC) fica completamente ocioso. Neste mesmo contexto, buscou-se melhorar o aproveitamento da potência aparente do conversor reversível, sem a necessidade de aumentar a potência aparente do conversor, e conseqüentemente, aumentar a relação custo benefício do sistema, pois, uma vez realizado o controle da potência reativa da rede elétrica, pode-se ter uma redução da quantidade de instalação de equipamentos no sistema elétrico com a mesma finalidade.

Os resultados experimentais apresentados neste trabalho ilustraram o bom desempenho, tanto dos controladores das malhas internas, quanto das malhas externas, proporcionando com isso, uma boa regulação da potência reativa da rede, através da estratégia de controle proposta. Estudos futuros irão avaliar o impacto de afundamentos de tensão no sistema DFIG, objetivando desenvolver técnicas e estratégias de controle que agreguem maior suportabilidade.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer ao CNPq pelo suporte financeiro concedido, para a realização do Doutorado Sanduíche no Exterior (processo 210087/2006-4).

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Heier, *Wind Energy Conversion Systems*, 2ª edição, Nova York, 1998.
- [2] S. Bhowmik, R. Spee, J. H. R. Enslin, "Performance optimization for doubly-fed wind power generation systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. (4), pp. 949-958, 1999.
- [3] Y. Tang and L. Xu, "A Flexible Active and Reactive Power Control Strategy for a Variable Speed Constant Frequency Generating System", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, no. (6), Novembro, 1993.
- [4] G. Tapia, A. Tapia, J. X. Ostolaza, "Two alternative modeling approaches for the evaluation of wind farm active and reactive power performances," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, no. (4), pp. 909-920, Dezembro, 2006.
- [5] P. Cartwright, L. Holdsworth, J. B. Ekanayake, N. Jenkins, "Coordinated voltage control strategy for a doubly-fed induction generator DFIG-based wind farm.", *IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, vol. 151, pp. 495-502, 2004.
- [6] R. Pena and J.C. Clare and G. Asher, "Doubly-Fed Induction Generator using back-to-back PWM Converters and its application to Variable-Speed Wind Energy Generation", *IEE Proc. on Elect. Power Applic.*, vol. 143 no. (3), pp. 231-240, 1996.
- [7] R. Datta, V. T. Ranganathan, "Decoupled control of active and reactive power for a grid-connected doubly-fed wound rotor induction machine without position sensors." *Thirty-Fourth IAS Annual Meeting - IEEE Industry Applic.* 2623-2630, 1999.
- [8] R. Spée, S. Bhowmik, and J. H. R. Enslin, "Novel control strategies for variable-speed doubly fed wind power generation systems," *Renewable Energy*, vol. 6, no. (8), pp. 907-915, 1995.
- [9] L. Xu, P. Cartwright, "Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation." *IEEE Trans. on Energy Conversion*, 750-758, 2006.
- [10] B. Rabelo, W. Hofmann, "Control of an optimized power flow in wind power plants with doubly-fed induction generators", *Power Electronics Specialist Conference*, vol. 4, pp. 1563 - 1568, 2003.
- [11] A. Peterson, L. Harnefors, T. Thiringer, "Comparison between stator flux and grid flux oriented rotor current of doubly-fed induction generator.", *IEEE Power Elect.* 482-486, 2005.
- [12] L. M. Fernandez, C. A. Garcia, F. Jurado, J. R. Saenz, "Control system of doubly fed induction generators based wind turbines with production limits.", *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives*, pp. 1936-1941, 2005.

#### BIOGRAFIAS

**Rodrigo Gaiba de Oliveira**, nascido em 1978 em Timóteo é engenheiro eletricitista (2002) pelo Centro Universitário do Leste de Minas Gerais e mestre em Engenharia Elétrica (2004) pela UFMG. Atualmente é aluno de doutorado do Programa de Pós-Graduação da UFMG. Seus interesses de pesquisa encontram-se em máquinas elétricas, eletrônica de potência e fontes alternativas de energia.

**João Lucas da Silva**, nascido em 1980 em Ouro Preto é engenheiro de controle e automação (2006) pela UFMG. Atualmente é aluno de mestrado do Programa de Pós-Graduação da UFMG. Suas áreas de interesse incluem sistemas de automação industrial, máquinas elétricas e fontes alternativas.

**Selênio Rocha Silva**, nascido em 1950 em Maceió é engenheiro eletricitista (1980), mestre em Engenharia Elétrica (1984) pela Universidade Federal de Minas Gerais e doutor em Engenharia Elétrica (1988) pela UFPb. Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG. Seus interesses de pesquisas incluem fontes alternativas de energia, máquinas elétricas e qualidade da energia. Dr. Selênio é membro do IEEE.

**Balduino Rabelo Junior**, nascido em 1968 em Guanhães é engenheiro eletricitista (1996) e mestre em Engenharia Elétrica (1998) pela UFMG. Atualmente é aluno de doutorado pela Universidade Tecnológica de Chemnitz, Alemanha. Suas áreas de pesquisa incluem eletrônica de potência e fontes alternativas de energia.

**Wilfried Hofmann**, nascido em 1954 em Dresden é doutor em Engenharia Elétrica (1984) pela Universidade Tecnológica de Dresden, Alemanha. Atualmente é professor titular da Universidade Tecnológica de Chemnitz. Seus interesses de pesquisas incluem fontes alternativas de energia, eletrônica de potência e acionamentos elétricos. Dr. Wilfried Hofmann é membro do IEEE.