

ALGORITMOS PARA OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE GERADORES A RELUTÂNCIA VARIÁVEL APLICADOS EM GERAÇÃO EÓLICA

Tárcio A. S. Barros, Paulo S. Nascimento Filho, Adson B. Moreira, Ernesto Ruppert
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - Universidade Estadual de Campinas, Campinas – SP, Brasil
e-mail: tarcio@dsce.fee.unicamp.br, ruppert@fee.unicamp.br

Resumo – O desempenho do gerador a relutância variável (GRV) está diretamente relacionado às variáveis de ajustes do seu acionamento. Neste trabalho são propostos algoritmos para obter, através de simulações dinâmicas, os parâmetros ótimos de acionamento do GRV quando aplicado em geração eólica. Através de funções de otimização os parâmetros de acionamento do GRV para baixas e altas velocidades de operação são obtidos para manter o balanceamento entre as oscilações de torque, perdas magnéticas e perdas elétricas. Os parâmetros ótimos de acionamento foram verificados experimentalmente e foi confirmada a eficiência da metodologia proposta neste trabalho.

Palavras-Chave – Algoritmos de Otimização, Geração Eólica, Gerador a Relutância Variável.

ALGORITHMS FOR OPTIMIZATION PERFORMANCE OF SWITCHED RELUCTANCE GENERATOR APPLIED IN WIND GENERATION

Abstract – This work presents algorithms to get the drive optimal parameters for the switched reluctance generator when applied in wind generation. Through optimization functions the drive parameters for low and high operating speeds are obtained to maintain the balance between the ripple torque, magnetic and copper losses. The optimal parameters of drive were experimentally verified and confirmed the efficiency of the methodology proposed in this paper.

Keywords – Optimization, Switched Reluctance Generator, Wind Energy.

I. INTRODUÇÃO

O gerador a relutância variável (GRV) tem sido apontado como uma boa alternativa para aplicações em geração eólica, de pequenas e médias potências, devido às suas características de funcionamento que permitem a operação em uma ampla faixa de velocidades com alto rendimento [1], [2]. Além da ampla faixa de operação o GRV possui como características atrativas a sua robustez mecânica, o alto rendimento, o baixo custo de fabricação e a ausência de elementos magnéticos permanentes [3], [4]. Os estudos sobre o GRV têm se intensificado nos últimos 10 anos [2], [5], [6].

Os principais empecilhos para a utilização industrial do GRV são as oscilações de torque, os ruídos sonoros, a necessidade de sensores de posição e de controles robustos para uma ampla faixa de velocidades e a falta de metodologias para o projeto eletromagnético.

Diversos trabalhos realizam mecanismos de otimização do acionamento do GRV em aplicações de controle de tensão de barramento e para maximizar a potência elétrica em cada velocidade de operação. Porém, na geração eólica a potência gerada pelo GRV é determinada pelas características do aerogerador e da velocidade de operação. Para cada velocidade de operação do aerogerador existe um valor ótimo de potência que deve ser extraída pelo gerador elétrico.

Simulações iterativas em toda faixa das variáveis de controle da potência no GRV foram realizadas em [7] para encontrar o perfil de potência. Observou-se a existência de pontos ótimos de operação em que, selecionados os ângulos de acionamento e a tensão do barramento, implicam em maior rendimento do GRV.

Foi realizado, em [8], um sistema de otimização para o GRV operando em altas velocidades. Variaram-se os ângulos de acionamentos (θ_{on} e θ_{off}) e mediram-se as potências elétricas geradas. O sistema de otimização foi testado para o GRV operando no controle de tensão do elo de corrente contínua. Determinaram-se os ângulos ótimos em função da velocidade.

Uma configuração para maximizar a porcentagem de potência gerada pelo GRV em baixas e médias velocidades, visando aplicações em geração eólica, foi apresentada em [9]. Este estudo indicou que para cada velocidade de operação existem parâmetros de acionamentos ótimos de operação (tensão de acionamento, ângulos de acionamentos e a referência de corrente) que maximizam a potência gerada. Um sistema de controle foi proposto para variar a tensão de acionamento do GRV dependendo da velocidade de operação. Entretanto, não se realizou o controle de potência, que seria necessário para melhorar o aproveitamento da geração eólica e apenas resultados de simulações foram apresentados.

Foram realizados sistemas de otimização para operação em baixas e altas velocidades em que os ângulos de acionamento são calculados em operação [10], [11]. Esse sistema requer um alto poder de processamento para executar as equações de determinação dos ângulos de acionamentos. Também não foi realizada uma otimização voltada especificamente para aplicação em geração eólica, em que a potência gerada e a velocidade estão diretamente relacionadas entre si.

Em [12], [13] foram apresentados controles de tensão elétrica para o GRV em altas velocidades com estratégias para melhorar a eficiência. Em [14] foi descrito um sistema de controle de potência para melhorar a eficiência

Artigo submetido em 22/09/2015. Primeira revisão em 16/12/2015. Aceito para publicação em 23/02/2016, por recomendação do Editor Cassiano Rech.

do GRV em baixas velocidades pela variação dos ângulos de acionamentos. Em [15], [16] adicionou-se a etapa de roda livre melhorando a eficiência do sistema de controle de corrente para baixas velocidades. Em [17] foi realizado um sistema de otimização da eficiência do GRV para baixas velocidades baseado em corrente elétrica. Entretanto, não foi feita qualquer análise do impacto dessa etapa nas oscilações de torque.

Neste trabalho são propostos algoritmos para obter, através de simulações dinâmicas, os parâmetros ótimos de acionamento do GRV para geração eólica. Através de funções de otimização os parâmetros de acionamento do GRV para baixas e altas velocidades de operação são obtidos para manter o balanceamento entre as oscilações de torque, perdas magnéticas e perdas elétricas.

II. POTÊNCIA NA GERAÇÃO EÓLICA

Para velocidades do vento abaixo da velocidade nominal a operação com velocidade variável do rotor aumenta a eficiência na geração de energia elétrica a partir da energia eólica. O perfil de otimização da eficiência da potência gerada para velocidades variáveis é expresso por:

$$P_{opt} = k_{opt} w_r^3 \quad (1)$$

onde P_{opt} é a potência ótima, w_r é a velocidade mecânica do rotor e k_{opt} depende da aerodinâmica da hélice, da caixa de engrenagens e dos parâmetros da turbina eólica.

O protótipo de geração eólica estudado utiliza um GRV de 2 kW, disponível no laboratório, que apresenta velocidade nominal de operação de 157 rad/s (1500 rpm). Considerando o GRV disponível foi adotado um valor de k_{opt} de modo que na velocidade nominal a turbina eólica disponibilize a potência nominal do GRV. Deste modo, pôde-se calcular o perfil de geração ótimo para o sistema a ser estudado, mostrado na Figura 1.

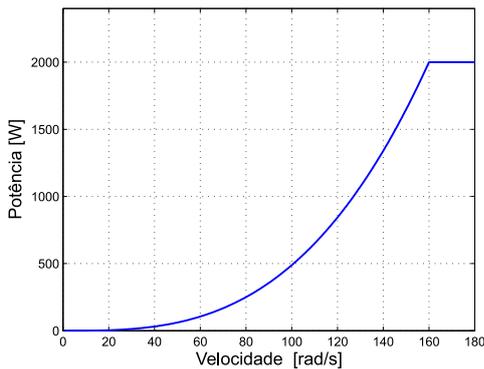


Fig. 1. Curva de potência ótima para o sistema eólico a ser estudado.

III. POTÊNCIA GERADA PELO GRV

Devido à natureza chaveada e não linear da corrente elétrica produzida pelo GRV, obter uma expressão analítica do comportamento da potência gerada não é uma tarefa de fácil realização [7]. Para isso é necessário conhecer a forma de onda das correntes no gerador. Além disso, algumas simplificações devem ser realizadas para facilitar

o entendimento do comportamento das variáveis sobre a potência gerada pelo GRV.

A potência elétrica média de saída do GRV, desprezando as perdas como realizado em [18], pode ser calculada por:

$$P_{out} = \frac{N_s N_r V_{dc}^2}{w} \left\{ \int_{\theta_{on}}^{\theta} \frac{(\theta - \theta_{on})}{L(\theta)} d\theta + \int_{\theta_{on}}^{\theta} \frac{(\theta_{off} - \theta - \theta_{on})}{L(\theta)} d\theta \right\} \quad (2)$$

em que N_s é o número de polos do estator, N_r é o número de polos do rotor, V_{dc} é a tensão do elo CC, θ é a posição angular do rotor, $L(\theta)$ é a indutância em função da posição do rotor e w é velocidade do eixo mecânico.

Em (2) verifica-se que a potência de saída sofre influência direta dos ângulos de chaveamento, da tensão do elo CC e da velocidade de operação. Uma mesma potência pode ser gerada com diferentes combinações dessas variáveis de acionamento. Entretanto, estas variáveis afetam diretamente as perdas elétricas e magnéticas, bem como também as oscilações de torque. Assim, é de fundamental importância definir os valores ótimos das variáveis de ajuste do acionamento para o GRV operar de modo satisfatório em toda faixa de velocidade.

IV. VELOCIDADE DE OPERAÇÃO DO GRV

Com intuito de definir a forma de operação do GRV, inicialmente estimou-se a velocidade base de operação. Considerando a corrente máxima permitida no acionamento do GRV pode-se estimar a força contra eletromotriz e por:

$$e = i * w \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \quad (3)$$

A tensão elétrica v no sistema é definida como sendo 400 V. A velocidade base w_b é definida como a velocidade em que $e = v$. O valor estimado de w_b foi de 100 rad/s.

Para melhoria do desempenho do GRV propõe-se que o acionamento seja realizado em dois modos. Para baixas velocidades de operação ($w < w_b$) o acionamento do GRV deve operar por histerese de corrente e , para altas velocidades ($w > w_b$) o acionamento deve ser realizado a pulso único.

V. ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ACIONAMENTO DO GRV

Na geração eólica, para cada velocidade de operação do aerogerador existe um valor ótimo de potência que deve ser extraída pelo gerador elétrico. Desse modo, conhecendo os pontos de operação (velocidade e potência) foram desenvolvidos algoritmos que realizam simulações dinâmicas para a operação em baixas e em altas velocidades.

A. Otimização em Baixas Velocidades

Para a operação em baixas velocidades a corrente de referência do acionamento por histerese é a variável de controle da potência. Assim, os ângulos de acionamento θ_{on} e θ_{off} ótimos são determinados conforme procedimento descrito a seguir.

Utilizando o modelo do GRV baseado em curvas experimentais [19], criou-se uma simulação no MATLAB–Simulink[®] do sistema apresentado na Figura 2. O controle de disparos é responsável por acionar as chaves

do conversor AHB (*Asymmetric Half Bridge*) nos instantes desejados e realizar o controle de corrente por histerese. A corrente de referência é obtida como a saída do controlador proporcional-integral (PI) que processa o erro entre a potência elétrica de referência P_{ref} e o valor médio medido da potência gerada. O GRV opera auto-excitado. A magnetização inicial é realizada por um circuito de pré-carga da tensão no capacitor do elo CC através de uma bateria de 24V. A tensão do elo de corrente contínua (V_{dc}) é mantida praticamente constante por meio do controle por histerese que atua chaveando a carga resistiva de modo a dissipar a potência gerada pelo GRV e não permitir que a tensão no banco capacitivo de $2250 \mu F$ aumente. A largura da banda de histerese utilizada no controle de (V_{dc}) foi de 5 V. É importante que este valor seja menor que 5% de V_{dc} , assim evita-se que o *ripple* em V_{dc} influencie na determinação das variáveis ótimas de acionamento.

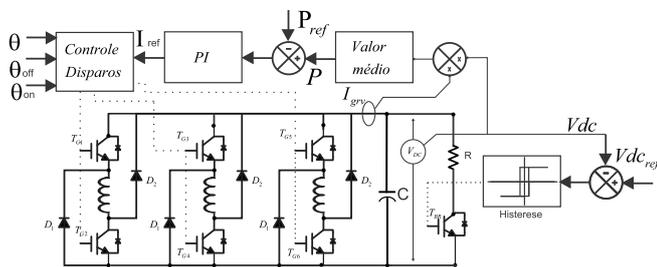


Fig. 2. Estrutura de controle de corrente por histerese.

Desenvolveu-se um algoritmo no MATLAB[®] (fluxograma apresentado na Figura 3) para realizar a otimização em baixas velocidades. Inicialmente, devem-se configurar os dados iniciais para realizar as simulações, conforme Tabela I.

A velocidade de operação e os ângulos de acionamentos são carregados com os valores iniciais e a potência de referência é calculada para a velocidade a ser otimizada. Em seguida, calcula-se a resistência para dissipar a energia. Os dados são enviados para o Simulink e automaticamente é realizada a simulação do sistema de controle de potência. Ao final da simulação é verificado se a potência gerada é igual à P_{ref} (adotou-se uma margem de 3% de erro), de modo que as combinações de ângulos de acionamentos em que a potência de referência não é atingida, não são levadas em conta na otimização.

Para os casos em que a potência de referência é obtida, calculam-se as variáveis que são utilizadas na determinação dos pontos ótimos de operação. Estas variáveis são: oscilações de torque (4), valor médio da corrente da fase I_{med} e o fluxo magnético máximo Φ_{max} . Estes valores são medidos quando o controle já está em regime permanente. Os dados obtidos nas simulações são armazenados e em seguida incrementa-se o ângulo θ_{on} , caso $\theta_{on} \leq \theta_{on-max}$.

$$T_{rip} = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{med}} \quad (4)$$

Se $\theta_{on} = \theta_{on-final}$, ponto {1} do fluxograma, todas as situações para um dado θ_{off} foram realizadas. Na Figura 4 apresentam-se, por exemplo, os resultados do torque, fluxo magnético e corrente elétrica na fase do GRV para $w = 80$ rad/s e $\theta_{off} = 18^\circ$.

Na sequência do fluxograma, θ_{on} é reiniciado e θ_{off} é

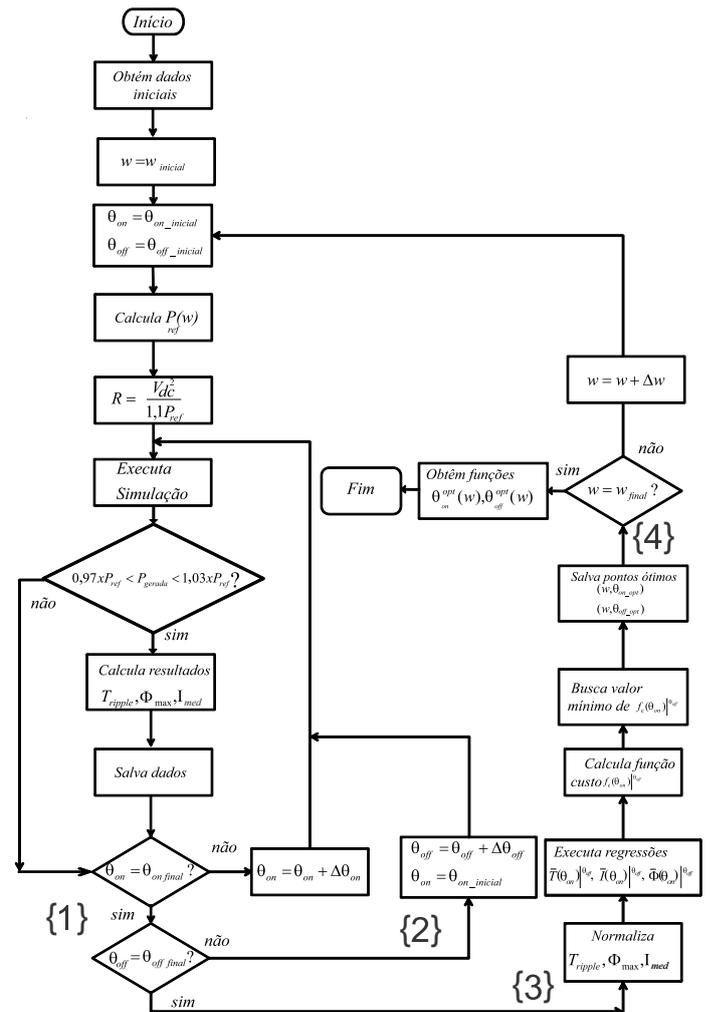


Fig. 3. Fluxograma para otimização em baixas velocidades.

TABELA I

Variáveis de Inicialização para Otimização em Baixas Velocidades

Sigla	Descrição	Valor configurado
$w_{inicial}$	velocidade inicial	60 rad/s
w_{final}	velocidade final	100 rad/s
Δw	passo velocidade	10 rad/s
$\theta_{off-initial}$	ângulo de desligamento inicial	34°
$\theta_{off-final}$	ângulo de desligamento final	50°
$\Delta\theta_{off}$	passo ângulo de desligamento	2°
$\theta_{on-initial}$	ângulo de acionamento inicial	8°
θ_{on-max}	ângulo de acionamento final	20°
$\Delta\theta_{on}$	passo ângulo de acionamento	2°

incrementado. Isso ocorre até serem realizadas todas as simulações para a velocidade em teste.

No ponto {3} do fluxograma todas as simulações para uma dada velocidade já foram realizadas e então as variáveis T_{rip} , Φ_{max} e I_{med} são normalizadas dividindo-as pelos valores máximos obtidos durante as simulações da velocidade em teste.

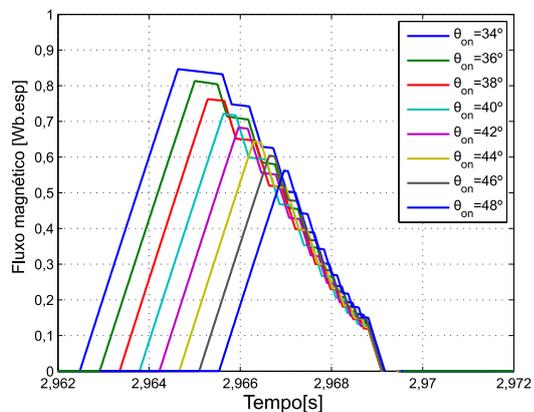
Com os pontos normalizados $(\theta_{on}, \bar{T}_{rip})$, $(\theta_{on}, \bar{I}_{med})$ e $(\theta_{on}, \bar{\Phi}_{max})$ são obtidas as funções das variáveis normalizadas em função do ângulo θ_{on} .

Nas Figuras 5(c)-5(a) observam-se, por exemplo, as funções obtidas pelas regressões utilizando os pontos obtidos

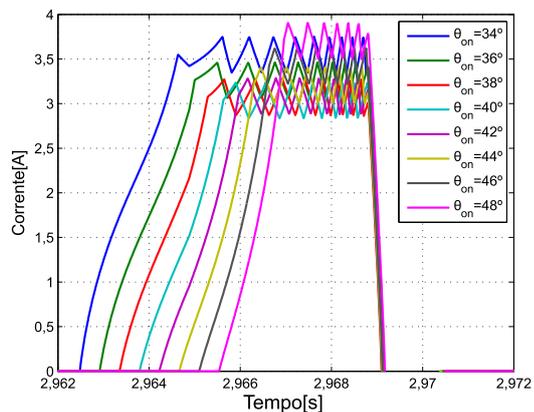
nas simulações para a velocidade de 80 rad/s.

A função custo $f_c(\theta_{on})|\theta_{off}$, que é utilizada para o algoritmo de otimização procurar os pontos ótimos, foi definida como a soma das três variáveis em função do ângulo θ_{on} , dada por:

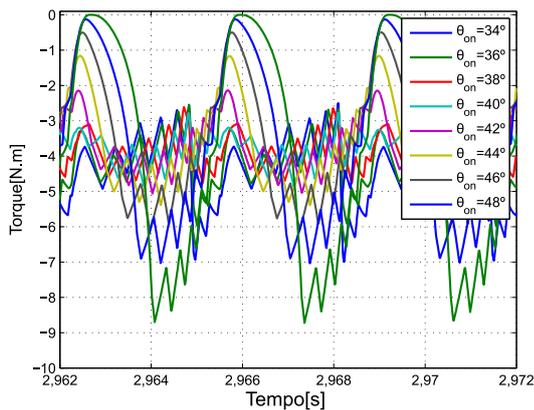
$$f_c(\theta_{on})|\theta_{off} = \bar{T}_{rip}(\theta_{on})|\theta_{off} + \bar{I}_{med}(\theta_{on})|\theta_{off} + \bar{\Phi}_{max}(\theta_{on})|\theta_{off}. \quad (5)$$



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. Resultados de simulações para $w = 80$ rad/s e $\theta_{off} = 18^\circ$. a) Fluxo magnético. b) Corrente na fase a do GRV. c) Torque eletromagnético.

Calculando $f_c(\theta_{on})|\theta_{off}$, para θ_{on} ao passo de $0,1^\circ$, obtêm-se as curvas das funções custo apresentadas na Figura 5(d). O ponto de mínimo para a função custo é determinado fazendo uma varredura nas funções custos para todos os ângulos θ_{off} .

Neste caso, para a velocidade $w = 80$ rad/s, o ponto mínimo ocorre em $\theta_{on} = 41,5^\circ$ e $\theta_{off} = 18^\circ$ como se observa na Figura 5(d).

A título de comparação na Figura 6 apresentam-se as situações em que a função custo foi definida para minimizar as oscilações de torque, maximizar o rendimento e para a condição obtida com o algoritmo de otimização. Para o caso em que o rendimento é maximizado tem-se um alto valor de oscilação de torque que pode causar vibrações mecânicas no sistema.

Utilizando $f_c(\theta_{on})|\theta_{off}$ para minimizar apenas o *ripple* de torque, observa-se o aumento da corrente média e do fluxo magnético de modo que o rendimento do GRV diminui.

Diversos trabalhos realizam apenas a otimização para obter o melhor rendimento [10], [11], [17]. Entretanto, optou-se também por incorporar o T_{rip} na função custo que está associado às vibrações que podem causar danos ao aerogerador. Conforme observado na Figura 6(c), para a função custo dada por (5) tem-se oscilações de torque menores sem comprometer o rendimento do GRV que está ligado a Φ_{max} e I_{med} .

Para cada velocidade no ponto {4} do fluxograma obtêm-se os pontos (w, θ_{on-opt}) e $(w, \theta_{off-opt})$. Com um método de ajuste matemático, neste caso uma regressão linear, obtêm-se a função dos ângulos θ_{on} ótimos para toda a faixa de baixa velocidade que é dada por:

$$\theta_{on-opt}(w)[deg] = -0.1177w[rad/s] + 51.03. \quad (6)$$

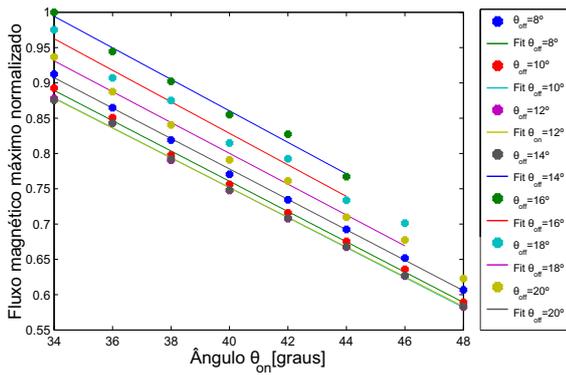
O ângulo $\theta_{off-opt}$ ótimo obtido foi sempre igual a 18° .

Foram executadas 270 simulações para otimização em baixas velocidades totalizando um tempo de 05h:09m:05.93s. Foi utilizado nas simulações um computador com processador i7(3.7 Ghz) e 32 GB de memória RAM.

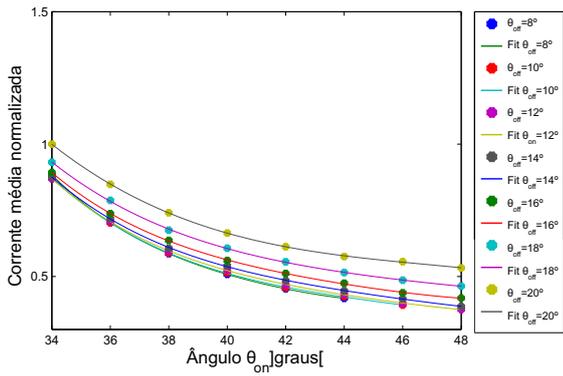
B. Otimização em Altas Velocidades

Para velocidades de operação do GRV em que se devem realizar controle a pulso único apenas os ângulos de disparo são as variáveis de controle de potência. O ângulo θ_{off} é a variável de controle que deve ser ajustada pelo controlador a fim de gerar a potência desejada. Porém, existem diferentes combinações de $(\theta_{on}, \theta_{off})$ que permitem gerar uma mesma potência. De modo semelhante ao realizado na otimização para baixas velocidades criou-se um algoritmo para obter o ângulo de θ_{on} ótimo em função da velocidade de operação. Uma estrutura de controle semelhante ao da Figura 2 foi desenvolvida para controlar a potência do GRV operando a pulso único.

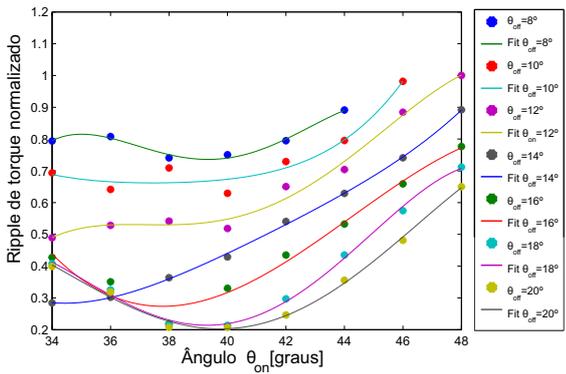
O controle de disparos obtém o ângulo θ_{on} como parâmetro da simulação e θ_{off} é obtido pelo controle PI que processa o erro de potência gerada. O algoritmo da Figura 7 varia o ângulo θ_{on} para diferentes velocidades de operação na faixa de altas velocidades. Para cada velocidade obtêm-se os ângulos θ_{on} que permitem gerar a potência desejada. A Tabela II contém os dados utilizados para a otimização em altas velocidades.



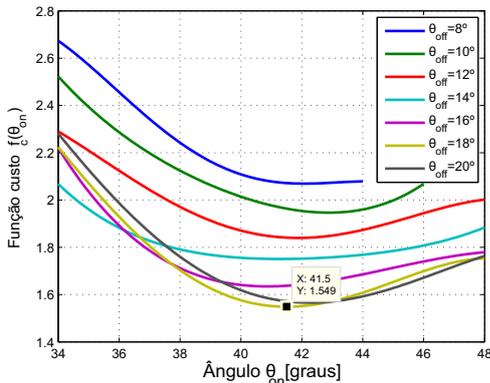
(a)



(b)

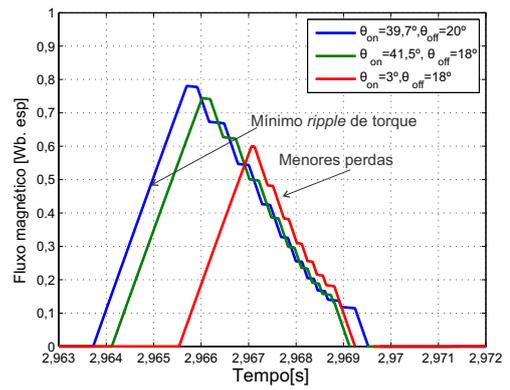


(c)

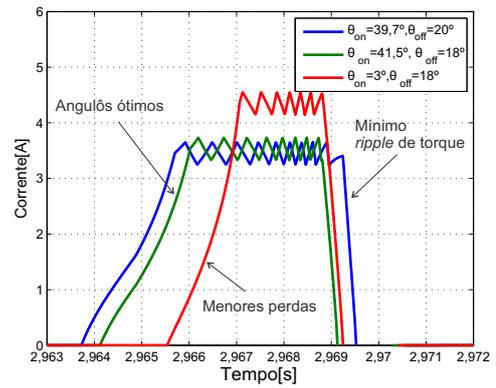


(d)

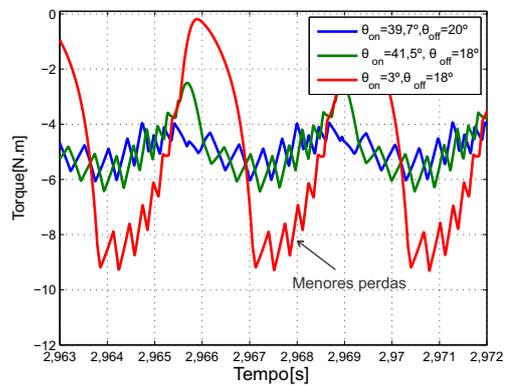
Fig. 5. Resultados normalizados das simulações para $w = 80$ rad/s. a) Fluxo magnético máximo normalizado. b) Corrente média normalizada. c) Ripple de torque. d) Função custo $f_c(\theta_{on})$ para diferentes θ_{off} .



(a)



(b)



(c)

Fig. 6. Diferentes situações de otimização ($w = 80$ rad/s). a) Fluxo magnético. b) Corrente na fase do GRV. c) Torque eletromagnético.

Ao final da execução das simulações para todas as velocidades em teste é possível observar o comportamento de Φ_{MAX} , I_{med} , T_{rip} e com os dados apresentados na Figura 8. Para uma mesma velocidade o fluxo magnético máximo diminui com o aumento do ângulo θ_{on} já o ripple de torque aumenta. A corrente elétrica média na fase do GRV, mostrada na Figura 8(b), sofre pouca mudança em relação a variações em θ_{on} .

É possível calcular as perdas magnéticas aproximadas para o GRV, conforme discutido em [14] e [11], por:

$$P_{Fe} = c_h f_{cm} B^{a+bB} + c_e \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (7)$$

onde B é a densidade de campo magnético, f é a frequência de comutação das fases do GRV, c_h e c_e são os coeficientes das perdas por histerese e correntes de Foucault e a e b são coeficientes obtidos das curvas experimentais das perdas do material.

Dessa forma, em altas velocidades optou-se dar um maior peso para o rendimento do gerador, assim a parcela correspondente ao fluxo magnético máximo foi multiplicada por 2, uma vez que as perdas magnéticas no GRV aumentam consideravelmente com a velocidade de operação.

A função custo para altas velocidades foi definida como:

$$f_c(\theta_{on})|_{\theta_{off}} = \bar{T}_{rip}(\theta_{on}) + \bar{I}_{med}(\theta_{on}) + 2\bar{\Phi}_{max}(\theta_{on}) \quad (8)$$

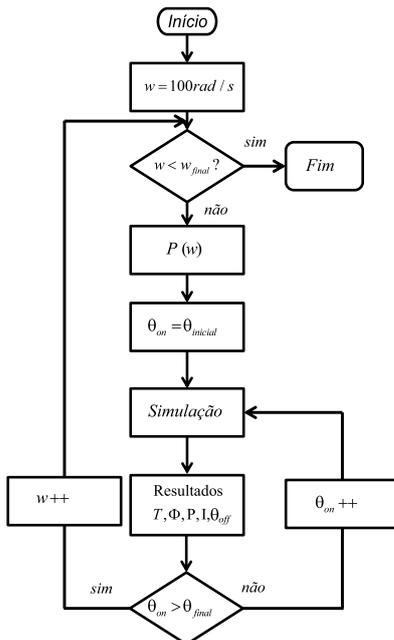


Fig. 7. Fluxograma para otimização em altas velocidades.

TABELA II
Variáveis de Inicialização para Otimização em Altas Velocidades

Sigla	Descrição	Valor configurado
$w_{inicial}$	velocidade inicial	100 rad/s
w_{final}	velocidade final	180 rad/s
Δw	passo velocidade	5 rad/s
$\theta_{on-inicial}$	ângulo de acionamento inicial	38°
$\theta_{on-final}$	ângulo de acionamento final	46°
$\Delta\theta_{on}$	passo ângulo de acionamento	0,5°

Na Figura 9(d), para $w = 120$ rad/s, verifica-se que θ_{on} ótimo é igual a $43,2^\circ$.

Na Figura 10 apresenta-se o comportamento das variáveis analisadas para as situações de menor ripple de torque, maior rendimento e a condição obtida pela otimização. Observa-se que os ângulos ótimos obtidos na otimização possibilitam reduzir as oscilações de torque sem comprometer o rendimento, uma vez que o fluxo máximo e a corrente média possuem valores intermediários em relação a situação de otimização de apenas rendimento e apenas torque.

A otimização para todas as velocidades resultou nos ângulos ótimos e regressões foram realizadas de modo que, para velocidades de 100 e 165 rad/s foi realizada um ajuste

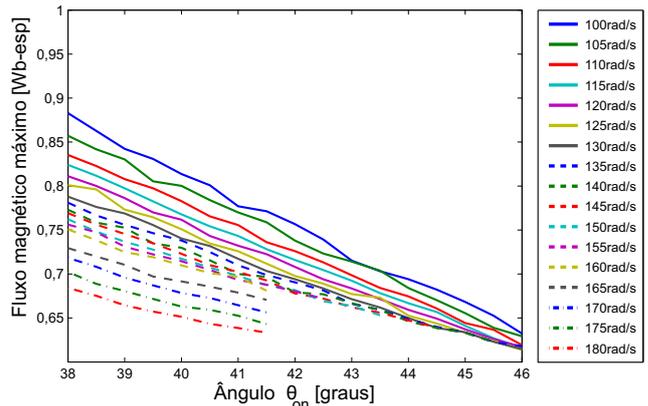
linear. Para velocidades maiores que 165 rad/s o ângulo ótimo se manteve praticamente constante em 39° .

Portanto, para operação em altas velocidades com acionamento a pulso único o ângulo de disparo θ_{on} deve ser ajustado de acordo com:

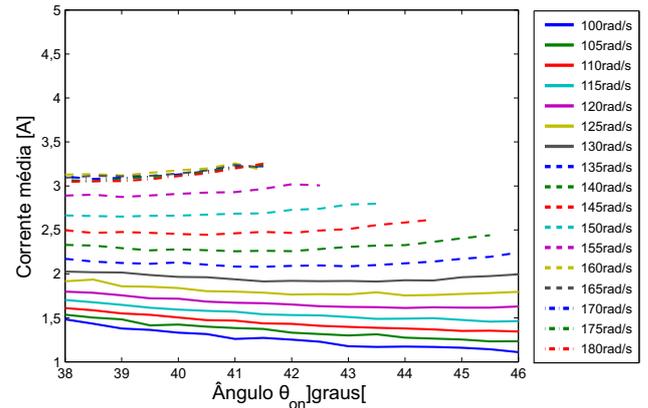
$$\begin{cases} w < 165 \text{ rad/s} \Rightarrow \theta_{on}(w) = -0.098w + 55; & (9) \\ w \geq 165 \text{ rad/s} \Rightarrow \theta_{on}(w) = 39 & (10) \end{cases}$$

em que w [rad/s] e θ_{on} [graus].

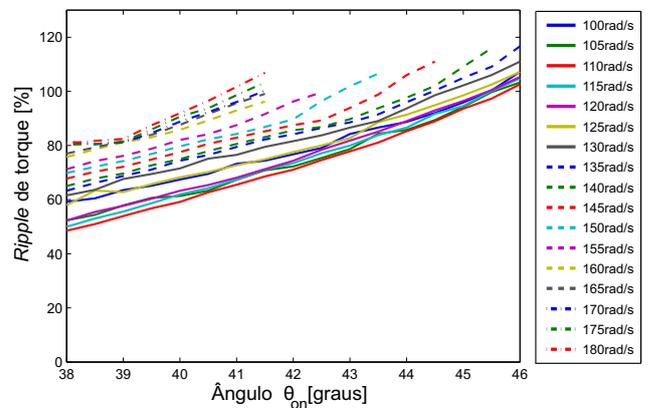
Foram executadas 153 simulações para otimização em altas velocidades, totalizando um tempo de 02h:04m:57s.



(a)

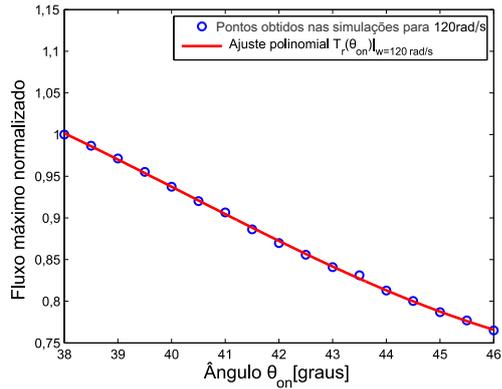


(b)

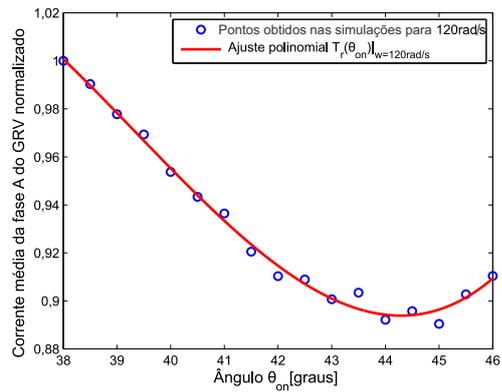


(c)

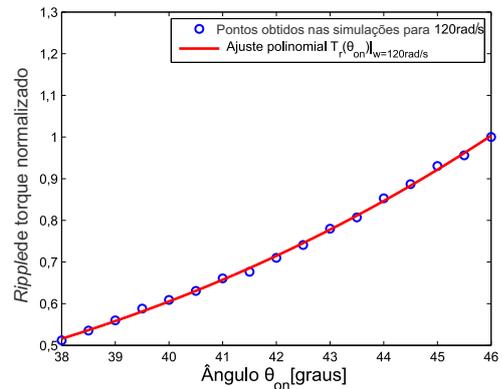
Fig. 8. Resultados de simulações ($w = 120$ rad/s). a) Fluxo magnético. b) Corrente na fase a do GRV. c) Ripple de Torque.



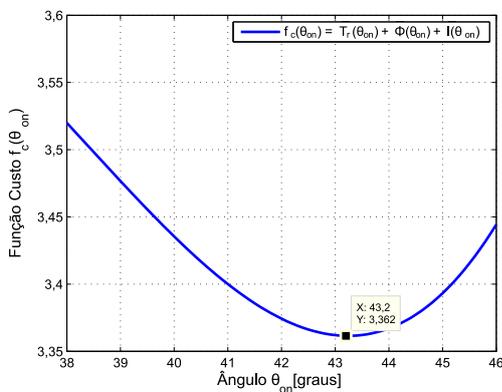
(a)



(b)

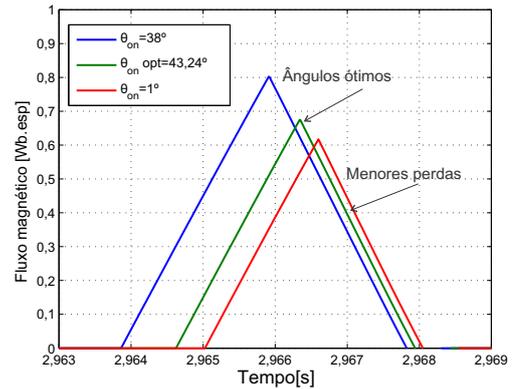


(c)

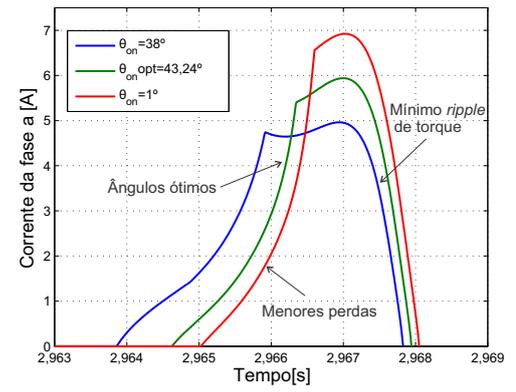


(d)

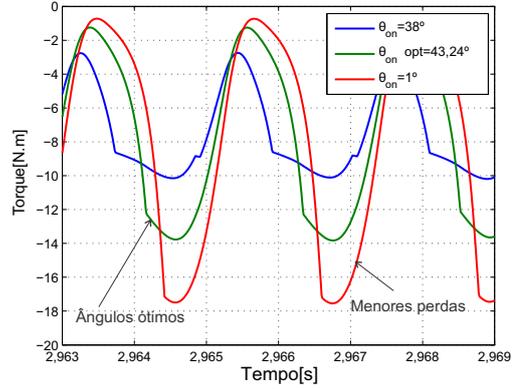
Fig. 9. Resultados de simulações normalizados ($w = 120$ rad/s). a) Fluxo magnético. b) Corrente na fase a do GRV. c) Ripple de torque eletromagnético. d) Função custo.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Resultados de simulações para otimização em $w = 120$ rad/s a) Fluxo magnético. b) Corrente na fase a do GRV. c) Torque eletromagnético.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Montou-se uma configuração experimental (Figura 11) para verificação das variáveis obtidas com os algoritmos de otimização desenvolvidos. Um transdutor de torque modelo HBM[®] T22/50NM foi acoplado entre o GRV e o motor de indução permitindo a estimação do rendimento do GRV e obter o sinal do torque eletromecânico. A fim de verificar a influência das oscilações de torque nos ruídos sonoros utilizou-se um Decibelímetro (modelo Homis 408A[®]) que foi posicionado próximo ao GRV.

O sistema utilizado nas simulações foi montado e um programa de controle de potência foi executado utilizando um DSP TMS320F28335. Os sinais de torque, velocidade,

correntes na fase do GRV, foram adquiridos com uma placa de aquisição de sinais Modelo NI-6259 National Instruments®.

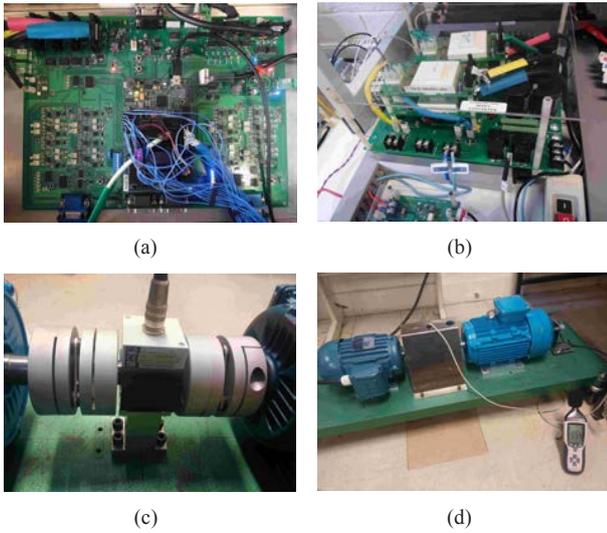


Fig. 11. Instrumentação experimental para verificação de variáveis de otimização. a) Placa de controle. b) Conversor AHB. c) Transdutor de torque. d) Máquinas elétricas.

A. Experimentos em Baixas Velocidades

Programou-se o sistema de controle para otimização em baixa velocidade. Para o GRV operando em 80 rad/s a potência gerada deve ser de 250 W. Na Figura 12 observa-se o resultado do controle implementado experimentalmente. A tensão V_{dc} foi controlada em 400 V e a potência de referência foi rastreada pelo controle.

O sistema de controle foi testado para as situações de melhor rendimento, menor oscilação de torque e com os parâmetros obtidos com a otimização. Na Figura 13 apresentam-se as correntes medidas na fase do GRV para as três situações avaliadas. Na Tabela IV apresentam-se os resultados do desempenho para as três situações avaliadas.

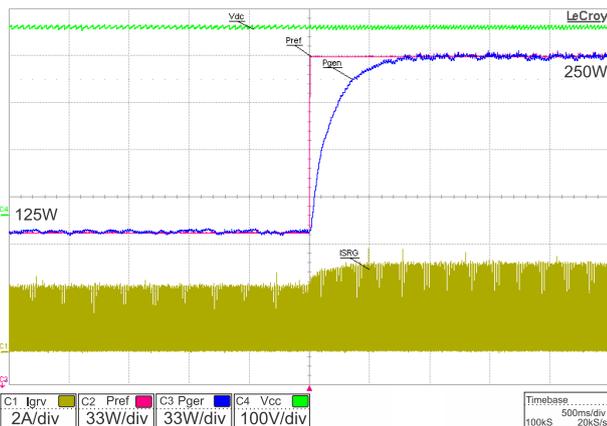


Fig. 12. Resultados experimentais para comprovação da metodologia de otimização para operação do GRV em baixa velocidade.

Os resultados das correntes experimentais são semelhantes aos obtidos nas simulações para as mesmas condições mostradas na Figura 6. Nas três condições foi possível gerar a potência desejada.

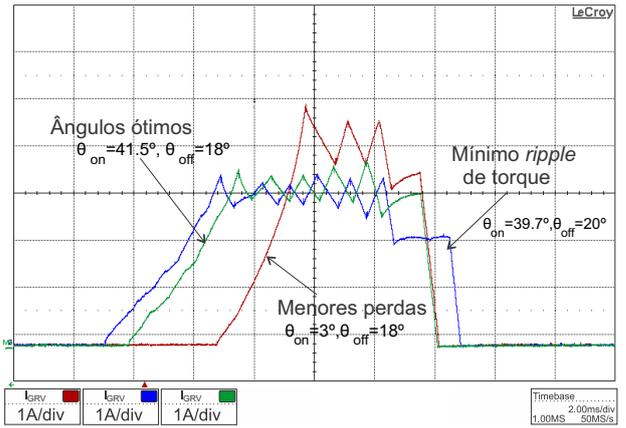


Fig. 13. Correntes experimentais com controle potência em 80 rad/s.

Para a situação de maior rendimento ($\theta_{on} = 18^\circ, \theta_{off} = 48^\circ$) observou-se uma maior oscilação de torque e consequentemente foi medido um valor maior de ruído sonoro. Nas situações de menor oscilação de torque ocorre a redução do rendimento em 7%. Para a situação de otimização as oscilações de torque são reduzidas sem comprometer o rendimento do GRV.

TABELA III
Resultados Práticos para Otimização em Baixa Velocidade

Situação ($\theta_{off} - \theta_{on}$)	($18.0^\circ - 41.5^\circ$)	($20^\circ - 39.7^\circ$)	($18^\circ - 48^\circ(3^\circ)$)
I_{GRV} experimento[A]	1,36	1,61	1,13
I_{GRV} simulação [A]	1,34	1,59	1,14
Pot_{ger} [W]	250,73	250,02	249,50
Pot_{mec} [W]	416,60	441,02	387,03
Rendimento	0,60	0,57	0,64
Torque médio[N.m]	5,21	5,51	4,84
Perdas rotacionais[W]	23,50	23,50	23,50
Perdas elétricas[W]	8,54	12,01	5,90
Perdas Magnéticas[W]	133,83	155,49	108,13
Ripple de torque[%]	163,93	133,73	348,75
Ruído sonoro [dB]	81,20	78,80	83,50

B. Experimentos em Altas Velocidades

O sistema de controle a pulso único foi implementado e verificou-se a operação do GRV em 120 rad/s. A potência gerada deve ser de 843 W.

Na Figura 14 observa-se o resultado do controle implementado experimentalmente. A tensão do V_{dc} foi controlada em 400 V e a potência de referência foi rastreada pelo controle.

O sistema de controle para altas velocidades foi testado para as situações de melhor rendimento, menor oscilação de torque e com os parâmetros obtidos com o algoritmo de otimização. Na Figura 15 apresentam-se as correntes medidas na fase do GRV para as três situações avaliadas. Na Tabela IV observam-se os resultados do desempenho para as três situações avaliadas. Os resultados das correntes experimentais são semelhantes aos obtidos nas simulações para as mesmas condições apresentadas na Figura 10(b). Nas três condições foi possível gerar a potência desejada.

Para a situação de maior rendimento ($\theta_{on} = 1^\circ$) observou-se uma maior oscilação de torque e consequentemente foi medido um valor maior de ruído sonoro. Para a situação de otimização as oscilações de torque são reduzidas sem

comprometer significativamente o rendimento do GRV.

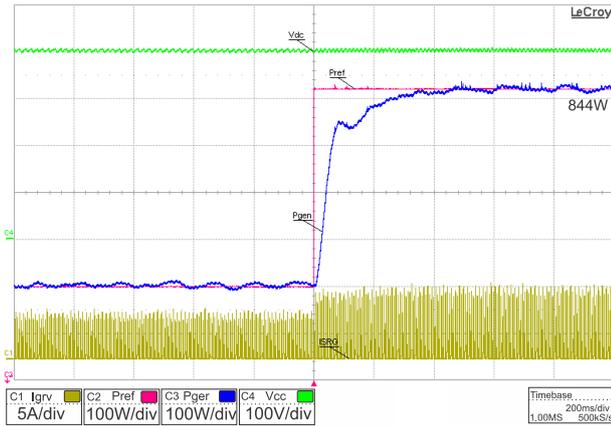


Fig. 14. Resultados experimentais para comprovação da metodologia de otimização para operação do GRV em alta velocidade.

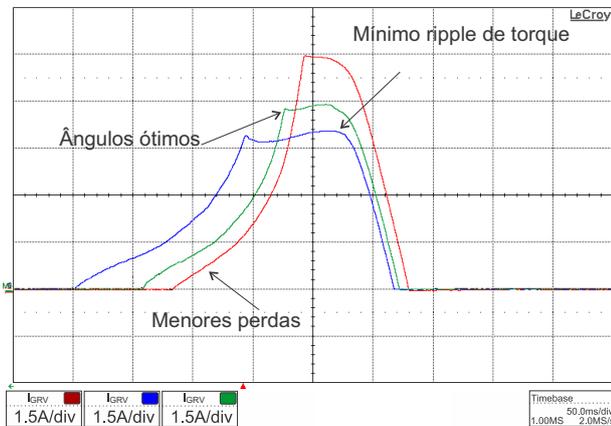


Fig. 15. Correntes experimentais com GRV operando em 120 rad/s.

TABELA IV

Resultados Práticos Otimização para Alta Velocidade

Situação (θ_{on})	43,2°	38°	1°
Corrente média GRV experimento[A]	1,72	1,791	1,704
Corrente média GRV simulação [A]	1,61	1,805	1,645
Potência elétrica gerada[W]	843,85	843,75	846,8
Potência mecânica medida[W]	1091,1	1125,2	1053,5
Rendimento	0,773	0,75	0,803
Torque médio[N.m]	9,09	9,375	8,77
Perdas rotacionais[W]	23,50	23,50	23,50
Perdas elétricas[W]	13,66	14,81	13,41
Perdas Magnéticas[W]	209,98	242,93	169,82
Ripple de torque[%]	95,12	76,47	101,5
Ruído sonoro [dB]	93,7	88,8	95,1

VII. CONCLUSÕES

Os parâmetros de acionamento influenciam nas oscilações de torque, nas perdas magnéticas e perdas elétricas. Algoritmos para obter, através de simulações dinâmicas, os parâmetros ótimos de acionamento do GRV para geração eólica foram desenvolvidos neste trabalho. Foram definidas funções de otimização que mantém o balanceamento entre estas variáveis. Os resultados das simulações são processados de modo a obter a minimização da função de otimização que permite obter os ângulos ótimos de acionamento do GRV em função da velocidade de operação. Os parâmetros

ótimos de acionamento foram verificados em simulações e experimentalmente e foi confirmada a eficiência da metodologia proposta.

APÊNDICE

Parâmetros e valores nominais da Máquina de Relutância Variável:

$$P_n = 2.0 \text{ kW} \quad V_n = 300 - 450 \text{ V}; \quad w_n = 1500 \text{ rpm}; \quad \frac{N_s}{N_r} = \frac{12}{8};$$

$$R_s = 4.52 \text{ } \Omega; \quad I_{max} = 9 \text{ A.}$$

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP pelo apoio financeiro (processos 2012/04872-0 e 2015/12861-6).

REFERÊNCIAS

- [1] E. Sunan, F. Kucuk, H. Goto, H. Guo, O. Ichinokura, "Three-Phase Full-Bridge Converter Controlled Permanent Magnet Reluctance Generator for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 29, no. 3, pp. 585–593, Sept. 2014.
- [2] X. Xue, K. Cheng, Y. Bao, P. Leung, N. Cheung, "Switched Reluctance Generators with Hybrid Magnetic Paths for Wind Power Generation", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 11, pp. 3863–3866, Nov 2012.
- [3] D. Torrey, "Switched reluctance generators and their control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 1, pp. 3–14, feb 2002.
- [4] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications*, CRC Press, 2001.
- [5] H. Chen, J. Gu, "Implementation of the Three-Phase Switched Reluctance Machine System for Motors and Generators", *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 15, no. 3, pp. 421–432, June 2010.
- [6] G. P. Viajante, *Gerador a relutância variável em conexão com a rede elétrica para injeção de potência ativa*, Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Setembro 2013.
- [7] P. Asadi, M. Ehsani, B. Fahimi, "Design and control characterization of switched reluctance generator for maximum output power", in *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 1639–1644, 2006.
- [8] Y. Sozer, D. Torrey, "Closed loop control of excitation parameters for high speed switched-reluctance generators", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 2, pp. 355–362, March 2004.
- [9] A. Arifin, I. H. Bahadly, S. C. Mukhopadhyay, "Simulation of switched reluctance generation in low and medium speed operations for wind energy application", in *IEEE ISRN Renewable Energy*, pp. 1–13, 2012.
- [10] C. Mademlis, I. Kioskeridis, "Optimizing Performance in Current-Controlled Switched Reluctance Generators", *IEEE Transactions on Energy*

- Conversion*, vol. 20, no. 3, pp. 556–565, Sept 2005.
- [11] I. Kioskeridis, C. Mademlis, “Optimal Efficiency Control of Switched Reluctance Generators”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1062–1071, April 2006.
- [12] W. Fernando, M. Barnes, O. Marjanovic, “Excitation control and voltage regulation of switched reluctance generators above base speed operation”, in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1–6, 2011.
- [13] S. Narla, Y. Sozer, I. Husain, “Switched Reluctance Generator Controls for Optimal Power Generation and Battery Charging”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 5, pp. 1452–1459, Sept 2012.
- [14] Z. Li, D. Gao, D.-H. Lee, J.-W. Ahn, “Power closed-loop control for high efficiency switched reluctance generator”, in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 590–593, 2012.
- [15] P. Kosmatin, D. Miljavec, D. Voncina, “Increasing efficiency of the switched reluctance generator at low-speed operation”, in *International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, pp. 197–202, 2013.
- [16] G. Viajante, D. A. Andrade, A. W. F. V. Silveira, V. R. Bernadelli, L. C. Gomes, J. L. Domingos, A. V. Fleury, “Estratégia para Melhoria da Eficiência da Conversão Eletromecânica de Energia do GRV”, *Eletrônica de Potência*, vol. 16, no. 4, pp. 367–375, Dez 2011.
- [17] S. Yu, F. Zhang, J.-W. Ahn, “Efficiency of switched reluctance generator according to current shape below rated speed”, in *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 577–581, 2013.
- [18] P. ASADI, *Development and application of an advanced switched reluctance generator drive*, Dissertation, Texas AM University, December 2006.
- [19] T. A. S. Barros, P. S. Nascimento, A. B. Moreira, S. Teixeira, E. Ruppert, “Sistema Automático de caracterização de máquinas de relutância variável e modelagem não linear por interpolações utilizando Smoothing Splines”, *Eletrônica de Potência*, vol. 20, no. 2, pp. 140–150, Maio 2015.

DADOS BIOGRÁFICOS

Tárcio André dos Santos Barros, nascido em 1987 em Petrolina-PE é engenheiro eletricista (2011) pela Universidade Federal do Vale do São Francisco, mestre (2012) e doutor (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. Atualmente é pos-doutorando em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas UNICAMP com bolsa da FAPESP. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em máquinas elétricas, eletrônica industrial, sistemas de controles eletrônicos, instrumentação eletrônica. É Membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP) e do IEEE.

Paulo Sérgio Nascimento Filho, nascido em 1985 em Belém-PA graduou-se em Engenharia Elétrica, em 2009, e obteve o título de mestre em engenharia elétrica em 2011

pela universidade Federal do Pará (UFPA). Atualmente é doutorando em Engenharia Elétrica do FEEC/UNICAMP, onde pesquisa estratégias avançadas de controle e eletrônica de potência aplicado ‘a Sistemas Elétricos de Potência e Geração Distribuída.

Adson Bezerra Moreira, nasceu em Fortaleza 1979, possui graduação (2003) e mestrado em engenharia elétrica (2006) pela Universidade Federal do Ceará(UFC). É professor assistente do curso de engenharia elétrica da UFC-Sobral. Atualmente é doutorando na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência nas áreas de eficiência energética, qualidade de energia, acionamentos de máquinas de elétricas.

Ernesto Ruppert Filho Graduou-se em engenharia elétrica em 1971, obteve o mestrado em 1974, e doutorado também engenharia elétrica pela FEEC/UNICAMP em 1983, realizou pós doutorado na GE Canadá na área de projeto de geradores síncronos e de sistemas de excitação estática de geradores síncronos nos anos de 1987 e 1988 . É Professor Titular da FEEC/UNICAMP desde 2000. Atua nas seguintes áreas de pesquisa: Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica, Limitadores de Corrente Elétrica Supercondutores, Máquinas Elétricas, Eletrônica de Potência, Acionamentos Elétricos com Velocidade Variável, Energias Renováveis, Qualidade de energia e Eficiência Energética. É Membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência, SOBRAEP.