

# Aplicação do Método de Newton-Raphson no Controle da Resistência Externa de Geradores Eólicos Durante Afundamentos de Tensão

E. F. Cota<sup>1</sup>, A. F. Bastos<sup>1</sup>, S. R. Silva<sup>2</sup>, H. A. Pereira<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Viçosa, Av. P. H. Rolfs, s/nº, Viçosa, Minas Gerais

<sup>2</sup> Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos 6627. 31270-901. Belo Horizonte. Minas Gerais

**Abstract** – A geração de energia elétrica através de aerogeradores tem crescido mundialmente nos últimos anos, porém para que um aerogerador possa se conectar a rede elétrica, o mesmo deve atender aos critérios de suportabilidade a subtensão. Os valores de queda de tensão e o intervalo de tempo desta queda variam de acordo com a regulamentação de cada país. Neste trabalho é apresentado com o auxílio do software Matlab/Simulink®, simulações onde um gerador eólico de rotor bobinado com resistência externa ligada ao rotor é submetido a afundamentos trifásicos de tensão. Esse tipo de máquina permite controlar seu escorregamento com a inserção de resistência externa ao circuito do rotor. Para controlar a resistência externa é proposta a aplicação do Método de Newton-Raphson. Os resultados mostraram que é possível diminuir a aceleração do gerador durante a falta e consequentemente retornar as condições anteriores ao afundamento em um menor intervalo de tempo.

**Palavras-Chave** – Energia eólica, Aerogeradores de indução com rotor bobinado, Método de Newton-Raphson, Afundamentos trifásicos equilibrados.

## I. INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica através de aerogeradores tem se consolidado em diversos países, como uma solução técnica e economicamente competitiva. No final do ano de 2010, existiam 196,63 GW em potência instalada em todo o mundo, com uma previsão de que no final de 2011 este índice atinja a cifra de 240 GW [1], Fig. 1.

Para que os aerogeradores sejam conectados a uma rede elétrica, suas tecnologias devem atender a critérios técnicos exigidos pelos códigos de rede de cada país. Devido à grande inserção de geração eólica na matriz energética de muitos países, como a Alemanha, as exigências para a conexão à rede têm aumentado, obrigando as empresas a investirem no desenvolvimento de tecnologias mais robustas, o que provoca diretamente melhorias na confiabilidade e indiretamente aumento no rendimento das novas tecnologias de aerogeradores.

No caso brasileiro, as usinas eólicas devem atender aos critérios estabelecidos nos Procedimentos de Rede. No Submódulo 3.6 deste código são definidos os requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão de unidades geradoras incluindo os aerogeradores. Para a realização de estudos iniciais da conexão de uma fazenda eólica, a simulação é uma ferramenta importante, sendo consolidada como procedimento de engenharia que envolve uma série de modelos e técnicas de análise[2].

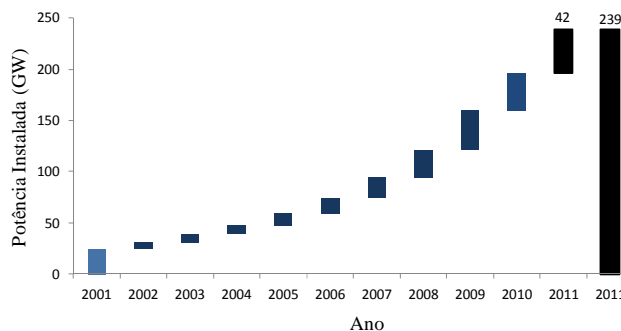


Fig. 1. Evolução da potência instalada em aerogeradores no mundo [1]

Após a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA), o Brasil tem se destacado pelo crescente aumento da inserção da energia eólica em sua matriz energética. Com a realização de leilões direcionados as fontes alternativas e a entrada de novos fabricantes no mercado brasileiro, serão instaladas nos anos de 2012 e 2013 aproximadamente 4.000 MW de potência provenientes de fontes eólicas, aumentando significativamente a capacidade atual instalada no país.

Os estudos relacionados ao impacto da integração a redes elétricas de usinas geradoras com base na energia eólica devem levar em consideração o tipo de tecnologia do aerogerador e como representá-la em cada um dos estudos necessários. Três tecnologias dominam o mercado de aerogeradores. O primeiro é o aerogerador de indução em gaiola, o segundo é o aerogerador de indução com rotor bobinado e o terceiro é o gerador síncrono. Neste trabalho foi estudado o gerador de indução com rotor bobinado com resistência externa ligada ao rotor conforme exibido na Fig. 2. Este gerador é produzido pela empresa indiana SUZLON que possui aproximadamente 40% da potência instalada brasileira[3].

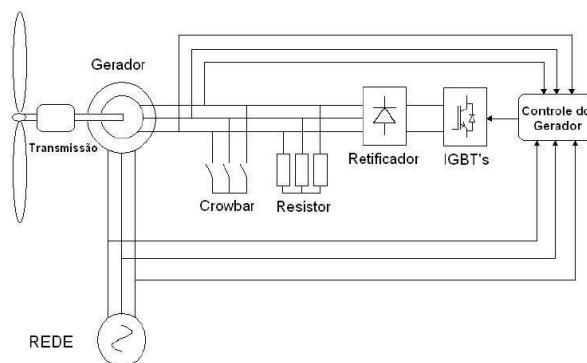


Fig. 2. Esquema de controle da resistência de rotor

## II. METODOLOGIA

### A. Modelagem de uma Máquina Assíncrona

A máquina assíncrona é uma máquina elétrica em que o rotor gira em uma velocidade distinta da velocidade da rede na qual está inserida. Isso acarreta em tensões e correntes induzidas no rotor em frequências que dependem do escorregamento da máquina[4],[5].

Considerando que a tensão trifásica nos terminais do estator da máquina assíncrona seja equilibrada, de tal forma que se crie um campo girante de amplitude constante no entreferro, pode-se considerar que o circuito equivalente de uma das três fases pode ser representado como na Fig. 3[5].

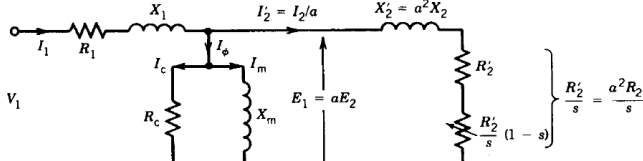


Fig. 3. Circuito equivalente a uma fase de uma máquina assíncrona [5].

Os termos na Fig. 3 são identificados por:

- \$R\_1\$ = resistência do enrolamento do estator;
- \$X\_1\$ = reatância de dispersão do estator;
- \$R\_c\$ = resistência devido as perdas no núcleo;
- \$X\_m\$ = reatância de magnetização;
- \$R\_2\$ = resistência do enrolamento do rotor;
- \$X\_2\$ = reatância de dispersão do rotor;
- \$R\_2'\$ = resistência do enrolamento do rotor referida ao estator;
- \$X\_2'\$ = reatância de dispersão do rotor referida ao estator.

$$\alpha = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

Sendo \$N\_1\$ número de espiras em série por fase do estator e \$N\_2\$ o equivalente para o rotor. Já \$E\_1\$ é a tensão induzida no enrolamento estator, enquanto \$E\_2\$ é a tensão induzida no rotor.

Aplicando o Teorema de Thévenin na parte do circuito da Fig. 3 correspondente as grandezas do estator e de magnetização (desprezando as perdas no núcleo), obtém-se um circuito mais simplificado mostrado na Fig. 4.

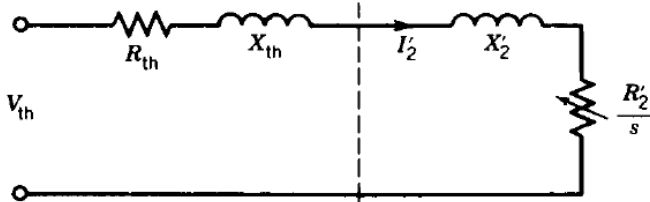


Fig. 4. Circuito equivalente da máquina assíncrona utilizando o Teorema de Thévenin[5].

No circuito da Fig. 4 a tensão, impedância, resistência e reatância de Thévenin são determinadas respectivamente por[4],[5],[6]:

$$V_{th} = \left( \frac{j \cdot X_m}{R_1 + j \cdot (X_1 + X_m)} \right) \cdot V_1 \quad (2)$$

$$Z_{th} = R_{th} + j \cdot X_{th} = \frac{j \cdot X_m \cdot (R_1 + j \cdot X_1)}{R_1 + j \cdot (X_1 + X_m)} \quad (3)$$

$$R_{th} = \frac{X_m^2 R_1}{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2} \quad (4)$$

$$X_{th} = \frac{X_m (R_1^2 + X_1^2 + R_1 \cdot X_1)}{R_1^2 + (X_1 + X_m)^2} \quad (5)$$

A equação de seu torque eletromagnético é dada por (6).

$$T_{em} = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot w_{sin}} \cdot \frac{V_{th}^2 \cdot \left( \frac{R_2'}{s} \right)}{\left( R_{th} + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_{th} + X_2')^2} \quad (6)$$

Sendo \$w\_{sin}\$ a frequência angular da rede e \$P\$ o número de pólos da máquina. O torque desenvolvido pela máquina depende da resistência ligada ao rotor. Aplicando os testes da 1° e 2° derivada em (6) e considerando o escorregamento como variável independente, é possível obter os valores dos torques máximos desenvolvidos para determinado valor de \$V\_{th}\$, e em quais escorregamentos esse torque irá ocorrer[4].

$$|T_{em}| = \frac{3 \cdot P}{4 \cdot w_{sin}} \cdot \frac{|V_{th}^2|}{R_{th}^2 \pm \sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2')^2}} \quad (7)$$

$$s = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_{th}^2 + (X_{th} + X_2')^2}} \quad (8)$$

Em (7) e (8) quando o sinal adotado é positivo corresponde a um motor e negativo a um gerador. O torque máximo desenvolvido pela máquina como motor é diferente do torque máximo desenvolvido pelo gerador. Na prática o torque eletromagnético máximo desenvolvido pelo gerador é maior em módulo do que o desenvolvido pelo motor [4].

Ainda o torque eletromagnético máximo desenvolvido independe do valor da resistência do rotor. Portanto no caso de uma máquina assíncrona de rotor bobinado, o acréscimo ou decréscimo da resistência externa do rotor apenas altera o escorregamento e, portanto a velocidade do rotor na qual ocorre o torque máximo, como mostra a Fig. 5 [4],[7].

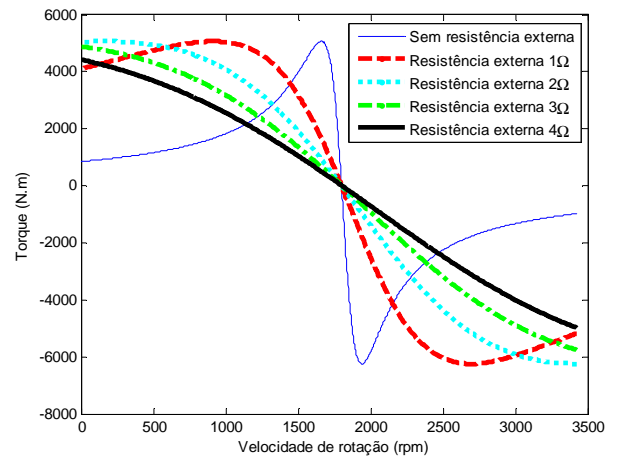


Fig. 5. Curvas de torque x velocidade para máquinas com rotor bobinado no estado permanente.

### B. Afundamentos Trifásicos Equilibrados em Aerogeradores com Rotor Bobinado

Os aerogeradores com rotor bobinado apresentam a vantagem de poderem alterar a sua curva torque x velocidade, segundo a variação da resistência externa ligada ao rotor. Assim é possível variar o escorregamento do gerador em momentos de afundamentos trifásicos equilibrados na rede.

No instante em que ocorre o afundamento trifásico equilibrado na rede, a tensão nos terminais do gerador também acompanha o afundamento. Nesse momento o torque eletromagnético desenvolvido pelo enrolamento do rotor, que se opõe ao torque mecânico no eixo do gerador, diminui.

Essa redução provoca aceleração do gerador. Caso esse afundamento leve o gerador a operar em uma curva onde o torque eletromagnético máximo seja menor que o torque mecânico, a máquina irá disparar e os sistemas de proteção deverão atuar.

Na Fig. 6 são apresentadas 5 curvas que exemplificam como o acréscimo de resistência no rotor pode auxiliar o gerador durante um afundamento trifásico equilibrado.

A curva A da Fig. 6 exibe o valor de torque nominal para um gerador de indução com rotor bobinado, enquanto a curva B apresenta relação torque x velocidade sem inserção de resistência externa no circuito do rotor e sem afundamento de tensão na rede.

Caso ocorra um afundamento trifásico de 50% da tensão nominal na rede, curva C, o gerador diminuirá seu torque eletromagnético. Isso é representado na Fig. 7 com o deslocamento do Ponto 1 para o Ponto 2 e consequentemente o gerador começará a acelerar.

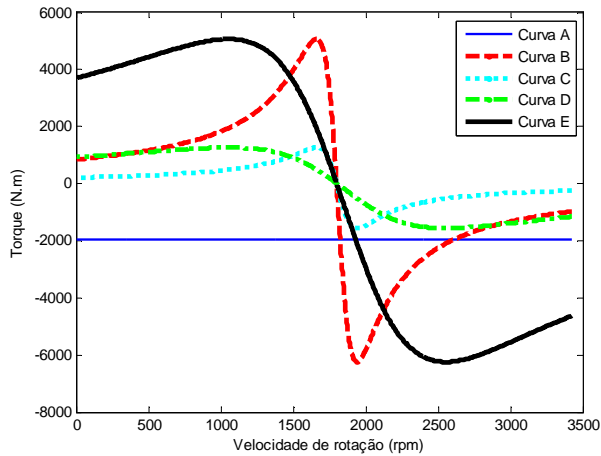


Fig. 6. Curvas de torque x velocidade para máquinas com rotor bobinado com e sem afundamento.

Para diminuir a aceleração do gerador durante o afundamento, pode-se inserir resistência externa ao circuito do rotor, a fim de deslocar a curva torque x velocidade, curva D da Fig. 6. Caso a severidade do afundamento seja de tal forma que o torque no gerador não consiga se igualar ao torque mecânico, o gerador poderá ter a cada instante o valor do torque eletromagnético máximo e o menor nível de aceleração, como mostrado entre os Pontos 3 e 4 da Fig. 7.

Com a extinção do afundamento, curva E da Fig. 6, a resistência externa pode ser retirada gradativamente, uma vez que o torque eletromagnético conseguirá se igualar ao

mecânico, fazendo com que o gerador volte a operar na mesma condição que se encontrava antes do afundamento. Considerando a Fig. 7 o torque eletromagnético do gerador desloca-se do Ponto 4 para o Ponto 5 com o fim do afundamento, e retirando a resistência gradativamente é possível fazer o gerador voltar ao Ponto 1.

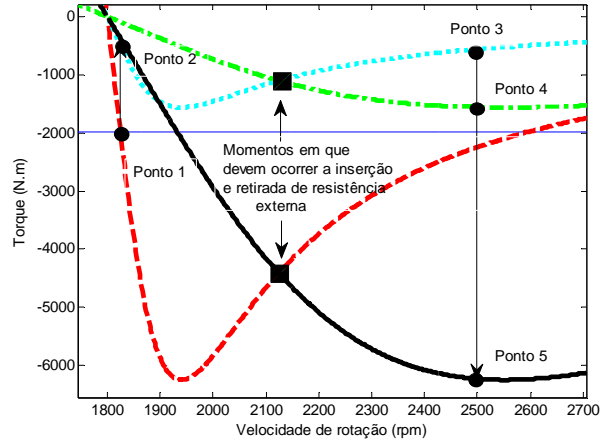


Fig. 7. Ação da inserção de resistência externa no circuito do rotor durante afundamentos.

### C. Método de Newton-Raphson

Em geral para controle de velocidade em máquinas elétricas são utilizados controladores PID's [8],[9]. Nesse trabalho o controle da resistência externa inserida no rotor será realizado por um método numérico, conhecido como Método de Newton-Raphson. Ele é um caso particular de um método de interação linear, com o objetivo de estimar a raiz de uma função  $f(x)$  usando um processo iterativo. A Fig. 8 exemplifica a aplicação desse método para uma função aleatória.

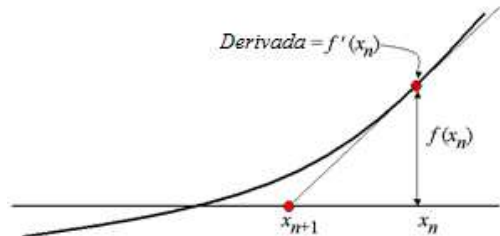


Fig. 8- Método de Newton-Raphson

Pela Fig. 8 observa-se que a reta que tangencia a função  $f(x)$  no ponto  $x_n$  é dada por:

$$f'(x_n) = \frac{f(x_n) - 0}{x_n - x_{n+1}} \rightarrow x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (9)$$

Determinado o valor de  $x_{n+1}$ , aplica-se novamente (9) para continuar a aproximação da raiz da função. Portanto após cada iteração realizada, há uma aproximação para o valor onde a função assume o valor zero. Ainda observando a Fig. 8 é perceptível que quanto mais perto da raiz da função estiver o valor de  $x_n$ , mais rápida será a aproximação da raiz.

Para garantir a conversão do método de Newton-Raphson é necessário determinar um intervalo  $[a,b]$  onde  $f(a) < 0$  e  $f(b) > 0$ , ou,  $f(b) < 0$  e  $f(a) > 0$ , que contenha a raiz de

$f(x)$ , onde  $f(x)$  e  $f'(x_n)$  sejam contínuas, além de que  $f'(x_n) \neq 0$  se  $x_n$  não é o valor da raiz.

O método de Newton-Raphson não determina exatamente o valor da raiz, porém pode aproximar-se da mesma até uma precisão desejada.

#### D. Descrição do Problema

O problema a ser abordado neste trabalho é implementar através de simulações com o *software* Matlab/Simulink® o comportamento de geradores com rotor bobinado durante afundamentos trifásicos equilibrados de tensão, inserindo resistência externa ao circuito do rotor e utilizando o Método de Newton-Raphson para determinar o valor dessa resistência externa. Para isso foi tomado como base os parâmetros de um aerogerador descrito em [10] e representados na TABELA I:

TABELA I  
ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR UTILIZADO

Dados do Gerador Elétrico	
Potência Nominal	500 hp
Tensão Nominal (V)	2300 V
Torque Nominal (T)	1980 N.m
Número de Polos (P)	4
Resistência do Estator ( $R_1$ )	0.262 $\Omega$
Reatância do Estator ( $X_1$ )	1.206 $\Omega$
Reatância do Rotor ( $X_2$ )	1.206 $\Omega$
Reatância de Magnetização ( $X_m$ )	54.02 $\Omega$
Resistência do Rotor ( $R_2$ )	0.187 $\Omega$

Uma observação quanto a TABELA I é que todos os dados de resistência e reatância estão referidos ao estator.

Modelado o gerador, foi-se feito o controle da inserção de resistência no rotor utilizando o Método de Newton-Raphson. O mesmo foi aplicado por meio de (9) com as seguintes substituições:

- $f \rightarrow (T_{em} - \text{torque desejado})$ , ou seja, a função assume o torque eletromagnético do gerador determinado por (6) menos o torque que se deseja que o gerador tenha;
- $x_n \rightarrow R_{ext}$ , portanto a variável independente considerada foi a resistência externa do rotor referida ao estator, uma vez que é essa que se deseja determinar;
- $f' \rightarrow \frac{dT_{em}}{dR_{ext}}$ , sabendo que o torque desejado é uma constante e que, portanto sua derivada em relação a  $R_{ext}$  é nula.

A expressão em (10) determina a derivada do torque pela resistência externa do rotor:

$$\frac{dT_{em}}{dR_{ext}} = \frac{3PV_{th}^2\{[A]s - 2(R_{th} + B)B\}}{2w_{sin}\{[A]S\}^2} \quad (10)$$

Sendo  $A = (R_{th} + B)^2 + (X_{th} + X_2')^2$  e  $B = \frac{R_{ext} + R_2}{s}$ .

Ainda foi determinado que no caso de afundamentos para os quais o gerador não conseguir gerar o torque nominal, que o mesmo deveria ter como torque desejado o seu torque máximo, para que assim o gerador acelere mais lentamente. Outra observação é que no final dos afundamentos o gerador deve ainda manter o torque máximo, até que toda resistência externa seja posta fora do circuito do rotor. Dessa maneira o gerador voltará mais rápido ao seu estado inicial.

Para as simulações apresentadas neste trabalho, as mesmas foram feitas com dois valores absolutos de resistência externa, 0,2 $\Omega$  e 1 $\Omega$ , no intuito de identificar como o gerador iria responder a cada valor.

No intervalo de tempo entre 1s e 1,5s ocorre um afundamento de tensão para 0,2 p.u. na rede elétrica e no intervalo de 1,5s a 2s o afundamento passava a ser de 0,8 p.u.. Todas as simulações foram feitas para um tempo final de 4s.

### III. RESULTADOS

Observando a Fig. 9 que retrata a velocidade do gerador, percebe-se que sem a inserção de resistência, o gerador obteve um processo contínuo de aceleração, e se fosse um caso real algum dispositivo de proteção deveria atuar. Porém quando houve a inserção de resistência, o gerador conseguiu voltar a sua velocidade nominal.

Para a resistência de 1 $\Omega$  antes mesmo do término do afundamento de 0,8 p.u., o gerador já se encontrava novamente em sua velocidade nominal, já para a resistência de 0,2 $\Omega$  a velocidade nominal é obtida em um tempo posterior, um pouco depois do término do afundamento de 0,8 p.u., sendo que esse fato ocorreu devido a saturação da resistência apresentada na Fig. 10.

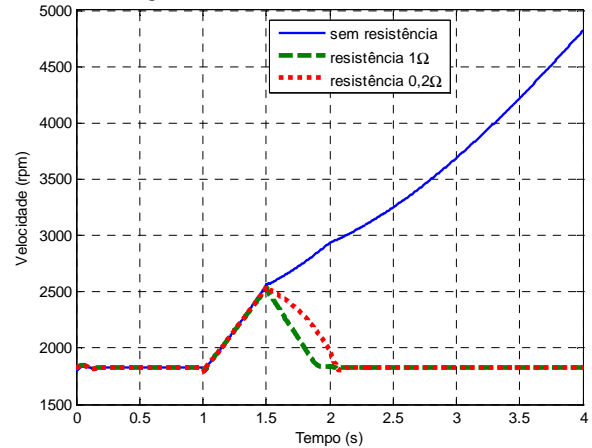


Fig. 9. Comportamento da velocidade do gerador para diferentes valores de resistência externa.

Ainda analisando a Fig. 10, o que se observa durante o afundamento de 0,2 p.u. é que os valores da resistência externa calculado pelo método de Newton-Raphson são crescentes, no intuito de tentar manter o gerador com seu torque máximo. Durante o afundamento de 0,8 p.u. os valores calculados da resistência externa já são decrescentes, mostrando que o gerador se encontra no processo de desaceleração.

Deve-se notar que o método numérico calculou uma resistência externa de até aproximadamente 0,7 $\Omega$  no final do afundamento de 0,2 p.u.. Para o circuito com resistência externa de 1 $\Omega$  esse valor pode ser obtido, enquanto que para o valor de 0,2 $\Omega$  houve uma saturação, devido ao fato da resistência ser menor que 0,7 $\Omega$ .

Assim, para esse valor de resistência externa o gerador não conseguiu manter o torque máximo durante todo tempo do afundamento de 0,2 p.u.. Além disso, para a resistência de 1 $\Omega$ , a mesma foi retirada mais rapidamente, encontrando-se em zero antes do término do afundamento de 0,8 p.u.. Já para a resistência de 0,2 $\Omega$  houve uma maior demora para a retirada de resistência do circuito do rotor, devido à saturação ocorrida.

Na Fig. 11 é visto o comportamento do torque do gerador. Sem resistência inserida o torque do gerador não consegue voltar ao valor nominal, diminuindo em módulo, o que implica em uma aceleração do gerador como visto na Fig. 9. Todavia a inserção de resistência no circuito do rotor do gerador foi capaz de fazer o torque voltar a ser o nominal, sendo que para a resistência  $1\Omega$  o torque se torna nominal antes do que para a resistência de  $0,2\Omega$ .

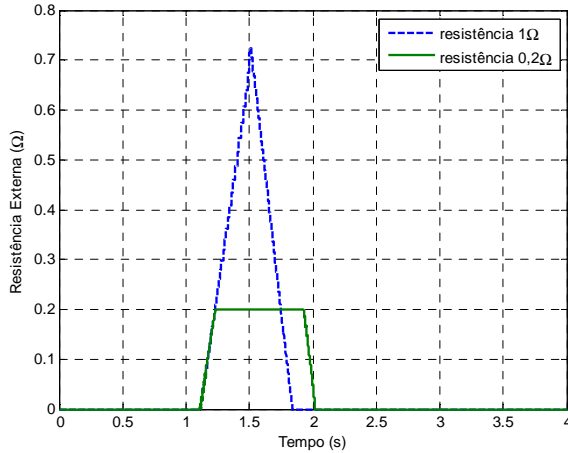


Fig. 10. Resistências adicionadas ao circuito do rotor.

É interessante notar ainda que no intervalo de tempo entre 1s e 1,5s, no qual ocorre o afundamento de 0,2, o torque é mantido praticamente constante quando inserido resistência no circuito do rotor, enquanto que no circuito sem inserção de resistência o torque diminui em módulo. Outra observação é que durante o afundamento de 0,8, para resistência de  $1\Omega$  nota-se que o torque eletromagnético já tende a estabilizar no valor nominal, enquanto o torque para resistência de  $0,2\Omega$  aumenta gradativamente em módulo para desacelerar o gerador.

Um fato interessante é mostrado na Fig. 12, pois no final do afundamento de 0,2 p.u. a velocidade do gerador é menor para a resistência externa de  $1\Omega$  do que para a resistência externa de  $0,2\Omega$ . Logo a saturação mostrada na Fig. 10 para resistência externa de  $0,2\Omega$  implicou em um aumento da aceleração do gerador em relação a resistência externa de  $1\Omega$ , sendo que a causa desse fato se deve principalmente a diminuição do valor do torque do gerador em módulo para a resistência externa de  $0,2\Omega$ , como mostrado na Fig. 13.

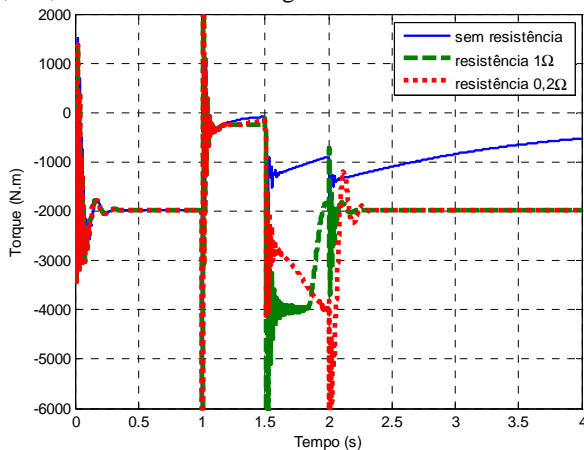


Fig. 11. Comportamento do torque eletromagnético do gerador para diferentes valores de resistência externa.

Deve-se ainda atentar que as discrepâncias entre as velocidades para com e sem inserção de resistência externa no rotor só não foram maiores, devido ao fato de que o máximo valor de torque atingido pelo gerador para um afundamento de 0,2 p.u. da tensão da rede é em módulo de apenas 249,86N.m, valor bem abaixo do torque nominal de aproximadamente 1980N.m. Outra observação é que na passagem do afundamento de 0,2 p.u. para o afundamento de 0,8 p.u. ainda ocorre um aumento de velocidade para os casos de inserção de resistência devido a inércia do movimento rotativo do rotor do gerador.

Na Fig. 14 é mostrada a potência ativa no gerador. Nessa figura é visto que novamente com a inserção de resistência no circuito do rotor a potência fornecida para a rede volta ao seu valor anterior aos afundamentos, fato que não ocorre sem a inclusão de resistência externa no rotor. Além disso, novamente observa-se que para resistência de  $1\Omega$  a condição anterior ao afundamento é obtida antes do que para a resistência de  $0,2\Omega$ .

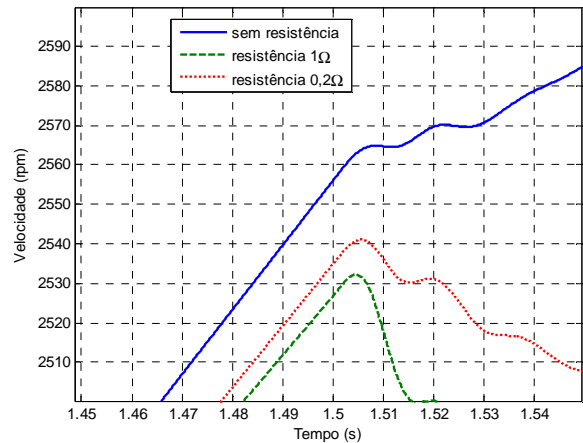


Fig. 12. Comportamento da velocidade do gerador para diferentes valores de resistência externa no final do afundamento de 0,2.

Ainda nota-se na Fig. 14 que durante o afundamento de 0,2 p.u. a potência ativa fornecida pelo gerador diminui bastante, enquanto que no afundamento de 0,8 p.u., para a resistência externa de  $1\Omega$ , o gerador já se aproxima da potência ativa gerada antes dos afundamentos, enquanto que para a resistência externa de  $0,2\Omega$  a potência ativa gerada aumenta gradativamente, devido principalmente ao aumento do torque gerado que ocorre nesse intervalo de tempo, como é mostrado na Fig. 11.

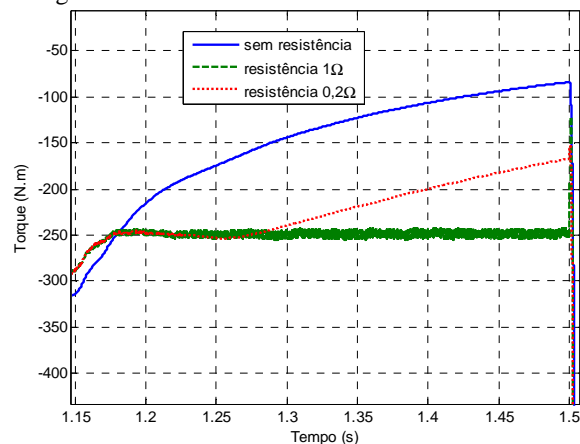


Fig. 13. Comportamento do torque do gerador para diferentes valores de resistência externa no final do afundamento de 0,2.



Outra curva a ser notada é a apresentada na Fig. 15, a qual mostra a potência reativa do gerador. Nota-se que na presença de resistência externa que a potência reativa se aproximou de zero ao final dos afundamentos, enquanto que no caso sem resistência externa ficou existindo um consumo de aproximadamente 2MVAR após os afundamentos.

Outros observados é que durante o afundamento de 0,2 p.u. a potência reativa possui um aumento menos significativo do que quando ocorre o afundamento de 0,8 p.u.. Nesse afundamento o circuito do rotor com resistência externa de  $1\Omega$  conseguiu diminuir mais o consumo de potência reativa do que o circuito com resistência externa de  $0,2\Omega$ .

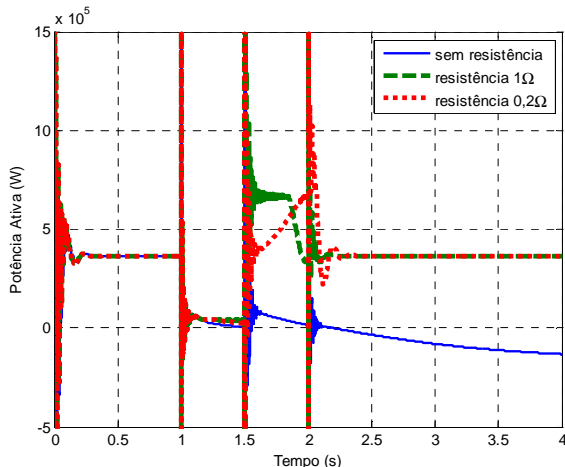


Fig. 14. Comportamento da potência ativa do gerador para diferentes valores de resistência externa.

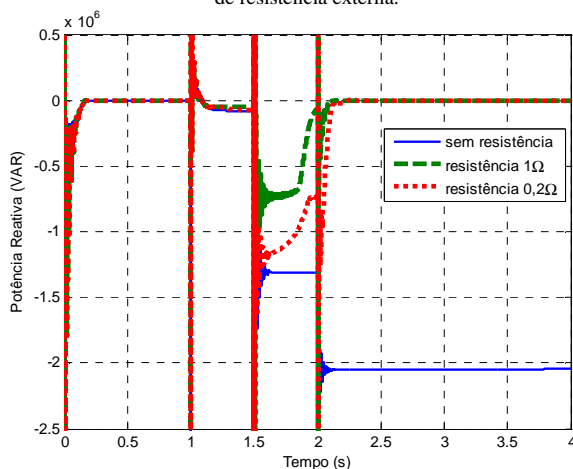


Fig. 15. Comportamento da potência reativa do gerador para diferentes valores de resistência externa.

#### IV. CONCLUSÕES

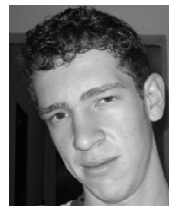
A aplicação do Método de Newton-Raphson para determinar a resistência externa a ser inserida no circuito do rotor do gerador, durante afundamentos trifásicos equilibrados, conseguiu melhorar o regime de operação do gerador.

Os parâmetros do gerador conseguiram voltar as condições normais de operação após o término dos afundamentos evitando desligamentos devido a atuação da proteção de velocidade, e consequentemente melhorando a qualidade da energia produzida por essa tecnologia de aerogerador.

#### V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WORLD WIND ENERGY ASSOCIATION. World Wind Energy Report. [S.l.]. 2012.
2. PROCEDIMENTO DE REDE. Submódulo 3.6 - Requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão. Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S.l.]. 2010.
3. [HTTP://WWW.SUZLON.COM/](http://www.suzlon.com/). Disponível em: <[http://www.suzlon.com/about\\_suzlon/13.aspx?I1=1&I2=3&I3=90](http://www.suzlon.com/about_suzlon/13.aspx?I1=1&I2=3&I3=90)>. Acesso em: 20 Janeiro 2012.
4. BIM, E. Máquinas Elétricas e Acionamento. Rio de Janeiro: Campus/Elsevier, 2009.
5. SEN, P. C. Principles of Electric Machines and Power Electronics. 2. ed. Kingston: John Wiley & Sons, 1997.
6. ONG, C.-M. Dynaminc Simulation of Electric Machinery. [S.l.]: Prentice Hall.
7. BURNHAM, D. J.; SANTOSO, S.; MULJADI, E. Variable Rotor-Resistance Control of Wind Turbine Generators. [S.l.].
8. MOHAMED RIDHA KHADRAOUI, M. E. Comparison between OptiSlip and Fixed Speed Wind Energy Conversion Systems. 5<sup>th</sup> International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, 2008.
9. BOLLEN, M. H. J. Characterization of Voltage Sags Experienced by Three-Phase Adjustable-Speed Drivers. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 12, n. 4, Outubro 1997.
10. KRAUSE, P. C.; WASYNCHUK, O.; SUDHOFF, S. D. Analysis of Electric Machinery and Drive Systems. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Wiley-Interscience.
11. ANEEL. "Procedimentos de Distribuição (PRODIST)", Module 8: Power Quality. [S.l.].

#### VI. BIOGRAFIAS



**Edmar Ferreira Cota** Nasceu em João Monlevade - MG, em 1989. Possui diploma de aprendiz e de técnico em Eletroeletrônica pelo Centro de Formação Profissional Nansen Araújo - SENAI-JM. Atualmente é graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Viçosa - UFV desde 2009, além de ser membro do GESEP, onde desenvolve trabalhos e pesquisas na área de geração de energia eólica e tecnologia em aerogeradores.



**Álvaro Furlani Bastos** Nascido na cidade de Barão do Monte Alto - MG, onde cursou o ensino médio, conquistando as medalhas de ouro, prata e bronze na Olimpíada Brasileira de Matemática das Escolas Públicas. Ingressou no curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Viçosa no ano de 2009. Atualmente, trabalha na área de Sistemas Elétricos de Potência com ênfase em Energia Eólica.



**Selênio Rocha Silva** Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais em 1980, tendo concluído seu Mestrado em Engenharia Elétrica pela própria UFMG em 1984 e Doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Campina Grande. Tem como foco de concentração de suas pesquisas as Máquinas Elétricas, Qualidade de Energia, Usinas Eólicas e os Dispositivos de Potência.



**Heverton Augusto Pereira** Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Viçosa, e mestrado em Engenharia Elétrica pela UNICAMP. Trabalhou na área de Riscos de Crédito do Itaú-Unibanco e atualmente é professor Assistente II do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Viçosa. Suas pesquisas estão relacionadas a fontes alternativas de energia eólica e solar, e também a qualidade da energia elétrica.