

## EMULADOR ESTÁTICO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO RENOVÁVEL APLICADO A ESTUDOS DE CONVERSORES CONECTADOS AO SISTEMA ELÉTRICO

LEONARDO FRANCISCO DA SILVA\*, ANDRÉ RAMOS DE CASTRO†, BRUNO WANDERLEY FRANÇA†,  
GUSTAVO FIGUEIREDO GONTIJO†, MAURÍCIO AREDES†, PAULO EDUARDO DARSKI ROCHA\*

\**Rua São Francisco Xavier, 524 - 5º andar  
DEE/FEN/UERJ  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

†*Centro de Tecnologia, bloco I, sala I - 156  
LEMT/COPPE/UFRJ  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

Emails: leonardo@lemt.ufrj.br, andrerc@lemt.ufrj.br, bruno@lemt.ufrj.br,  
gustavo@lemt.ufrj.br, aredes@lemt.ufrj.br, paulo.rocha@uerj.br

**Abstract**— The large increase in renewable generation insertion in the electrical grid has been the subject of many studies. This is due to the fact that renewable energy replaces fossil fuel based generation, which is finite and harmful to the environment. From a technical perspective, renewable generation drives research to guarantee its large scale insertion, given particular aspects such as: intermittent generation characteristic, connection to the grid and control, energy quality, etc. A challenge for research in this field is the testing of prototypes due to difficulties in obtaining such generation equipment in a laboratory environment. Therefore, this paper proposes the construction of a converter that emulates the output power of a real renewable generation system. A 9,5 kVA converter which emulates a wind turbine's electrical power output for a given wind pattern was built and tested.

**Keywords**— Power Electronic Converter, Renewable energy, Wind emulator, Wind generation.

**Resumo**— O aumento da inserção de fontes de geração renováveis nos sistemas elétricos tem sido tema de muitos estudos. Isto se deve ao fato de que as energias renováveis podem substituir a geração baseada em combustíveis fósseis, que é finita e danosa ao meio ambiente. Do ponto de vista técnico, a geração renovável fomenta pesquisas para a garantia de sua inserção em grande escala, dados fatores particulares tais como: intermitência de geração, forma de conexão e controle no sistema elétrico, qualidade da energia etc. A pesquisa neste campo encontra um desafio no que tange o ensaio de protótipos dessa natureza pelo fato da impossibilidade ou dificuldade de obter tal geração em ambiente laboratorial. Dessa forma, este trabalho propõe a construção de um conversor que emule o perfil real de geração de fontes renováveis. Uma bancada de 9,5 kVA com um conversor emulador de um sistema eólico, que reproduz o perfil real dessa geração para um dado perfil de vento, foi montado e testado.

**Palavras-chave**— Conversor Eletrônico de Potência, Energias Renováveis, Emulador Eólico, Geração Eólica.

### 1 Introdução

Nos últimos tempos, o uso das fontes de energias renováveis vem crescendo rapidamente devido à diminuição dos custos de fabricação, bem como a necessidade de mitigar os impactos ambientais provocados pelas fontes tradicionais (inundação de regiões para criação de reserva de geração hídrica, queima de recursos fósseis, etc.). Isso tornou-se possível principalmente devido a avanços tecnológicos, a redução de custos e a incentivos governamentais. Entre as fontes renováveis, a energia eólica é uma das fontes com maior crescimento, seguida pela energia solar de geração fotovoltaica (Wu et al., 2011).

O sistema elétrico vem sofrendo mudanças, evoluindo de um modelo de geração centralizada para um modelo de geração distribuída. A maioria dos geradores distribuídos de energia renovável são fontes de corrente alternada de frequência variada ou fontes de corrente contínua. Dessa forma, esses geradores necessitam de conversores CC-CA (inversores) para se conectarem à rede elétrica. Sistemas eólicos, por exemplo, são mais eficazes

quando estão livres para operar com velocidade variável. Para tanto, necessitam que, dependendo da configuração do sistema, ou o estator ou o rotor da máquina seja alimentado por uma tensão CA de frequência variável, que é convertida para uma tensão CC e depois para uma tensão CA à frequência da rede (Pavinatto, 2005).

Os sistemas eólicos atuais, por exemplo, são controlados de maneira a se extrair o máximo de potência dos ventos e injetá-la na rede, por completo. O mesmo ocorre com a geração fotovoltaica, com relação à energia incidente do Sol. O modelo de se injetar toda a potência disponível na rede é garantidamente a mais interessante somente se as fontes de energia renováveis constituírem uma pequena parcela da capacidade instalada do sistema. Nesse caso, eventuais oscilações de injeção de potência, dos geradores de fontes renováveis, serão compensadas pelos controladores dos grandes geradores convencionais. Parte desses grandes geradores se encarrega do balanço carga/geração e da estabilidade da rede (Fleury et al., 2012).

Quando as fontes renováveis estiverem fornecendo grande parte da potência, medidas deverão

ser tomadas com relação à configuração do sistema e à garantia da sua robustez e confiabilidade (Liu et al., 2010). Exemplos disso já existem em países como a Alemanha, que já chegou a ter, momentaneamente, metade de sua geração fornecida por fontes renováveis. Estudos são realizados para determinar a viabilidade de realizar retrofit nas unidades de geração distribuída que resulte numa melhor condição operativa do sistema. Esses estudos devem ser contínuos, dado o perfil de expansão contínua da parcela renovável na matriz energética. Isto é, ou ele deverá ser totalmente modificado e se alterar seu modo de operação, ou algum controle dos inversores deverá ser aplicado de maneira que as fontes de energia renováveis operem de um jeito a não prejudicar o sistema atual. A segunda opção parece ser mais viável (Richardot et al., 2006).

Dentre os métodos de controle estudados atualmente para conversores eletrônicos de potência que conectam fontes renováveis ao sistema elétrico, o conceito de máquina síncrona virtual (Synchronverter) (França et al., 2015) merece atenção especial. Esse conceito sugere que os inversores sejam controlados de maneira a se comportarem como uma máquina síncrona. Dessa forma, o efeito de um sistema renovável sobre a rede elétrica seria o mesmo que o de um gerador síncrono convencional. Assim, os algoritmos de controle de estatismo, amplamente utilizados, que relacionam injeção de potência ativa com regulação de frequência, e injeção de potência reativa com regulação de tensão, podem ser aplicados ao controle da máquina síncrona virtual. Portanto, o Synchronverter desponta como uma solução para a inserção em larga escala das fontes renováveis.

Dentro desse contexto, o laboratório dos autores possui como uma de suas linhas de pesquisa o estudo de sistemas de geração renovável e suas formas de conexão com a rede. Encontra-se em construção uma microrrede, onde se conectam diferentes formas de geração e diferentes equipamentos de qualidade de energia, tais como: solar fotovoltaica, eólica (através do emulador), UPS (*Uninterruptible Power Supply*), UPQC (*Unified Power Quality Conditioner*), Synchronverter.

Esse trabalho propõe a construção de um equipamento, denominado emulador estático (Ma et al., 2014), ou STATemulator, que atue como um emulador estático de sistemas de geração renováveis. Através desse equipamento, um conversor pode emular as características reais de um determinado sistema de geração renovável, assim como seu comportamento (perfil) de injeção de potência. Como exemplo de aplicação, neste artigo será apresentado o caso de emulação da geração eólica.

O STATemulator visa proporcionar estudos precisos e realistas das gerações renováveis em bancadas laboratoriais, de forma a contribuir para as pesquisas de geração renovável, geração dis-

tribuída, microrredes, paralelismo de conversores eletrônicos de potência, dentre outros. Para tanto, um perfil de potência emulado é obtido a partir de um modelo de sistema eólico simulado, operando sob MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Essa estratégia apresenta baixo custo de implementação em relação aos emuladores tradicionais (Rocha, 2008).

Esse artigo é organizado da seguinte forma: na seção 2, apresentaremos as topologias dos emuladores eólicos, na seção 3, as malhas de controle primário e principal seguidos dos resultados na seção 4 e conclusão na seção 5.

## 2 Topologia

### 2.1 Topologia do emulador eólico tradicional

A Figura 1 ilustra a topologia de um emulador eólico tradicional composto por cinco unidades: 1 – conversor conectado à rede para controle de torque do motor, emulando a turbina; 2 – motor de indução emulando turbina eólica; 3 – gerador de indução operando como o gerador acoplado à turbina; 4 – conversor CA-CC responsável pelo controle de velocidade do gerador; 5 – conversor CC-CA (*front end*) responsável pelo controle da tensão do elo CC e potência entregue à rede elétrica.

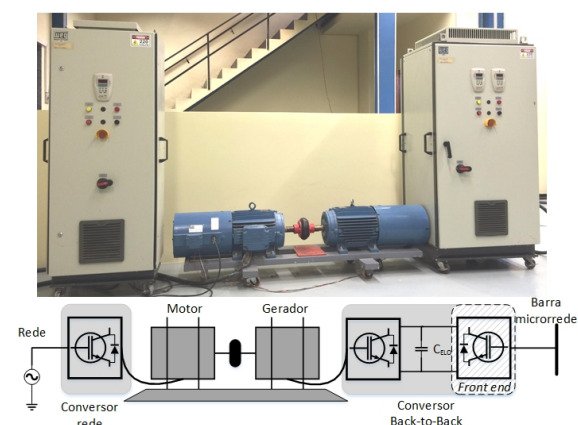


Figura 1: Fotografia de um emulador eólico tradicional e um diagrama de sua topologia.

### 2.2 Topologia do emulador estático

Este equipamento, mostrado na Figura 2, visa a substituição das unidades 1, 2, 3 e 4 da topologia do emulador eólico tradicional, passando a prover potência para o conversor *front end* conectado à microrrede, de acordo com um perfil de vento.

## 3 Malha de controle

Apresentadas as topologias, esta seção apresenta a modelagem dos controles aplicados ao equipamento. A malha de controle é dividida em duas

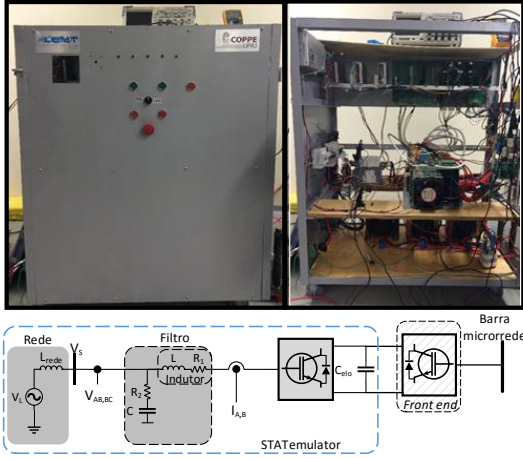


Figura 2: Fotografia do equipamento montado e diagrama da topologia do STATemulator.

partes: a primeira modela uma turbina eólica operando com MPPT, a segunda consiste de um controle de corrente.

### 3.1 Controle da emulação eólica

O controle que emula um sistema de geração eólica tem como objetivo reproduzir um perfil de potência elétrica para um determinado perfil de vento, dada as características de uma turbina. Para isto, uma simulação é feita na *software Simulink/Matlab* levando em consideração as equações que descrevem a potência produzida por uma turbina eólica e um modelo simples de um gerador operando sob MPPT. Com o auxílio da placa PCI-6229 da *National Instruments*, é possível exportar em tempo real o sinal de potência elétrica calculada pelo controle eólico e fornecê-lo ao controle de corrente via Conversor Analógico-Digital (ADC) do microcontrolador. A malha de controle está apresentada na Figura 3.

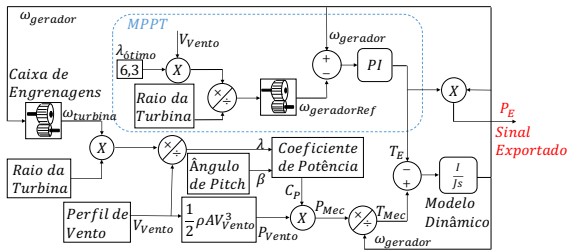


Figura 3: Malha de controle de emulação de geração eólica.

Através da Figura 3, pode-se notar o modelo em diagrama de blocos da equação (1), que explicita a potência disponível em uma seção de área  $A$  com incidência transversal de vento de velocidade  $V_{vento}$  para uma determinada densidade do ar  $\rho$ . A densidade do ar é função da pressão e tem-

peratura do ar. No nível do mar à temperatura de  $15^\circ\text{C}$ , o ar tem uma densidade de aproximadamente  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Na malha de emulação de geração eólica, foram utilizadas apenas unidades *SI*. Os parâmetros utilizados se encontram na Tabela 1.

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \rho A V_{vento}^3 \quad (1)$$

A energia cinética dos ventos, absorvida pelas pás da turbina, é convertida em energia mecânica no eixo da máquina. A potência mecânica entregue à turbina é dada por (2).

$$P_{mec} = \frac{1}{2} \rho A V_{vento}^3 C_P \quad (2)$$

A constante  $C_P$  é o coeficiente de potência referente à tecnologia das pás, ou seja, material, formato aerodinâmico das mesmas. O coeficiente de potência indica a parcela da energia cinética do vento que atinge as pás transformada em energia mecânica rotacional no eixo da turbina, isto é, quanto da energia dos ventos pode ser aproveitada. A equação (3) exprime um determinado coeficiente de potência de acordo com (Garcia-Hernandez and Garduno Ramirez, 2011; Silva et al., 2015).

$$C_P(\lambda, \beta) = 0,22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) \exp \frac{-12,5}{\lambda_i} \quad (3)$$

Sendo  $\lambda_i$ , obtido por:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

O ângulo de inclinação das pás é o ângulo de *pitch* ( $\beta$ ), enquanto o *tip speed ratio* ( $\lambda$ ) relaciona a velocidade do vento na ponta das pás com a velocidade angular da turbina, como na equação (5).

$$\lambda = \frac{\omega R_T}{V_{vento}} \quad (5)$$

Onde  $\omega$  é a velocidade angular do eixo do gerador da turbina,  $R_T$  representa o raio da área varrida pelas pás da turbina e  $V_{vento}$  é a velocidade do vento.

Pode-se verificar que, para um valor nulo de ângulo de inclinação das pás (operação dentro das condições nominais), o valor de  $\lambda$  ótimo, que fornece o valor máximo do coeficiente de potência, é 6,3 ( $\lambda_{otimo}$ ). Dessa forma, o método de se otimizar a geração de potência, através do MPPT, consiste em se controlar a velocidade angular do gerador, para cada velocidade de vento, de modo a se manter  $\lambda = \lambda_{otimo}$ . Portanto, deseja-se calcular um valor de  $\omega_{geradorRef}$  para cada velocidade de vento ( $V_{vento}$ ), conforme a equação (6).

$$\omega_{geradorRef} = \frac{\lambda_{otimo} V_{vento}}{R_T} \quad (6)$$

Tabela 1: Parâmetros utilizados na emulação de turbina eólica.

| Parâmetro                       | Valor                  |
|---------------------------------|------------------------|
| Momento de inércia              | 1,73 kg.m <sup>2</sup> |
| Relação da caixa de engrenagens | 1                      |
| Raio da turbina                 | 1,5 m                  |
| Ângulo de <i>pitch</i>          | 0°                     |
| Ganhos do PI $K_p = K_i$        | 95                     |
| Velocidade nominal do vento     | 17 m/s                 |

### 3.2 Controle de corrente

Um controle de corrente é implementado para assegurar o rastreamento da referência de potência elétrica fornecida pelo controle de emulação eólica. As referências de corrente são calculadas através das equações da teoria das potências ativa e reativa instantâneas (Akagi et al., 2007).

Esse controle foi implementado em linguagem C embarcado num processador digital de sinais (DSP-Digital Signal Processor), que recebe por uma porta A/D (analogico/digital) o sinal de potência elétrica calculada pelo controle de emulação eólica.

A Figura 4 apresenta o modelo simplificado da planta considerando a tensão medida da rede como uma perturbação. Já nas equações (7) e (8) temos o modelo dinâmico da planta no domínio do tempo, com as variáveis representadas no eixo síncrono dq e desconsiderando a perturbação citada.

$$v_d(t) = - \left[ i_d(t)R + \frac{di_d(t)}{dt}L - \omega Li_q(t) \right] \quad (7)$$

$$v_q(t) = - \left[ i_q(t)R + \frac{di_q(t)}{dt}L - \omega Li_d(t) \right] \quad (8)$$

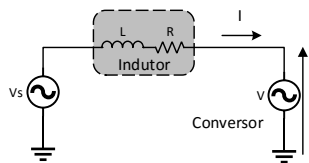


Figura 4: Modelo simplificado da planta.

A Figura 5 ilustra a malha de controle de corrente com um controlador PI atuando sobre a planta representada pela função de transferência  $H(s)$ . O conversor é representado por um ganho dado pela metade da tensão no elo CC, referente à teoria de acionamento das chaves semicondutoras através de PWM (Mohan et al., 2003). A realimentação das correntes passa por um bloco que as converte para valores por unidade. As equações (9) e (10) representam as funções de transferência entre a entrada (tensão gerada) e saída (corrente

do conversor) da planta, com as variáveis elétricas definidas no eixo síncrono dq.

$$I_d(s) = -\frac{1}{sL + R} [V_d(s) - \omega LI_q(s)] \quad (9)$$

$$I_q(s) = -\frac{1}{sL + R} [V_q(s) - \omega LI_d(s)] \quad (10)$$

Os termos  $\omega LI_q(s)$  e  $\omega LI_d(s)$  evidenciam um acoplamento entre as correntes  $I_d(s)$  e  $I_q(s)$ . Deseja-se eliminar esse acoplamento de modo que os controles de cada um dos termos da corrente possam funcionar independentemente um do outro. Sendo assim, adiciona-se um termo de *feed-forward*, como está ilustrado na Figura 5, de modo a se obter o desacoplamento das componentes de corrente, como será demonstrado, e, consequentemente, a melhoria do desempenho do controle apresentado.

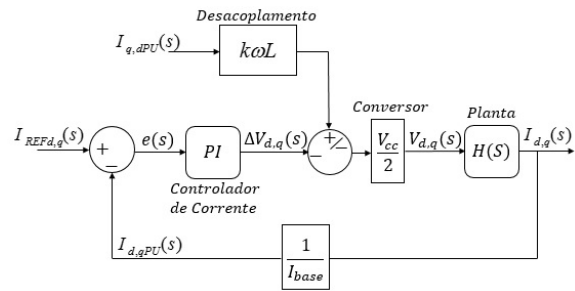


Figura 5: Malha do controle de corrente.

As equações (11) e (12) são, respectivamente, as tensões  $V_d(s)$  e  $V_q(s)$ , que são entradas da planta. As componentes  $I_{d,PU}(s)$  e  $I_{q,PU}(s)$  são as transformadas de Laplace das correntes medidas em valores por unidade.

$$V_d(s) = (-\Delta V_d(s) + I_{q,PU}(s)k\omega L) \frac{V_{cc}}{2} \quad (11)$$

$$V_q(s) = (-\Delta V_q(s) + I_{d,PU}(s)k\omega L) \frac{V_{cc}}{2} \quad (12)$$

Substituindo-se (11) e (12) em (9) e (10), observa-se que, para a eliminação do acoplamento entre os eixos dq, deve-se satisfazer a equação (13).

$$\omega LI_{d,q}(s) = I_{d,q,PU}(s)k\omega L \frac{V_{cc}}{2} \quad (13)$$

Como  $I_{d,q,PU}(s) = \frac{I_{d,q}(s)}{I_{base}}$ , obtemos  $k = \frac{2I_{base}}{V_{cc}}$ . Na implementação prática, entretanto, optou-se por manter um valor constante para  $k$ , resultando em (14).

$$k = \frac{2I_{base}}{V_{ccbase}} \quad (14)$$

As equações (15) e (16), que desconsideram efeitos de variação de  $V_{cc}$  sobre o desacoplamento, tornam claro o efeito do desacoplamento efetuado, já que agora as correntes de conversor de eixo direto e de eixo em quadratura, são funções apenas das tensões geradas pelos controladores PI,

decompostas em seus respectivos eixos do sistema de coordenadas síncrono dq.

$$I_d(s) = \frac{1}{sL + R} \left[ \Delta V_d(s) \frac{V_{cc}}{2} \right] \quad (15)$$

$$I_q(s) = \frac{1}{sL + R} \left[ \Delta V_q(s) \frac{V_{cc}}{2} \right] \quad (16)$$

Com esse modelo matemático, dado em (15) e (16), podemos projetar o controlador PI de corrente utilizando a ferramenta *pidTuner* do programa *Matlab*, em que se fornece a função de transferência de malha aberta e os parâmetros de projeto e se obtém os ganhos do controlador. Para este caso o objetivo principal do controlador é rastrear a referência de corrente dada pelo controle de emulação de geração eólica, tendo como parâmetro de projeto um tempo de subida igual a 300  $\mu$ s escolhendo um ajuste robusto. Os ganhos obtidos para as parcelas proporcional e integral foram de 1,267 e 147,9, respectivamente.

A Figura 6 apresenta a resposta no domínio do tempo da saída da função de transferência ( $i_{d,q}$ ), em malha fechada, e o esforço de controle da saída do PI ( $\Delta v_{d,q}$ ), para um degrau unitário de entrada.

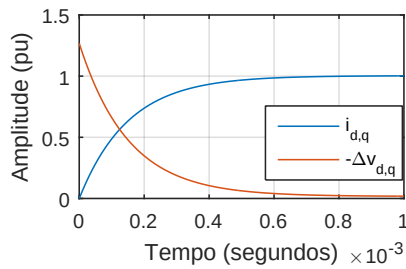


Figura 6: Resposta da malha fechada de controle de corrente ao degrau.

## 4 Experimento

Os conceitos e a metodologia apresentados foram testados experimentalmente. A configuração do aparato experimental e os resultados obtidos serão descritos nas sessões seguintes.

### 4.1 Configuração

Uma bancada experimental foi construída conforme ilustrado na Figura 7. Um transformador de relação de transformação unitária faz a interface do conversor do STATemulator com a rede elétrica com o objetivo de impedir a circulação de correntes de sequência zero entre o STATemulator e o conversor *front end*, que é controlado como um Synchronverter. O Synchronverter faz a regulação da tensão do elo CC. Os parâmetros da bancada se encontram na Tabela 2.

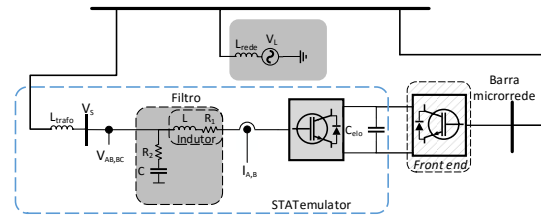


Figura 7: Configuração utilizada para testar protótipo experimental.

Tabela 2: Parâmetros utilizados no protótipo experimental.

| Parâmetro                          | Valor      |
|------------------------------------|------------|
| Resistência do transformador       | 83 mΩ      |
| Indutância do transformador        | 0,21 mH    |
| Resistência do indutor do filtro   | 26 mΩ      |
| Indutância do indutor do filtro    | 1,0 mH     |
| Capacitância do filtro             | 10 $\mu$ F |
| Resistência <i>shunt</i> do filtro | 1,0 Ω      |
| Capacitância do elo CC             | 9,4 mF     |
| Frequência de chaveamento          | 10260 Hz   |
| Potência nominal                   | 9,5 kVA    |
| Tensão do elo CC                   | 450 V      |
| Tensão de linha CA                 | 220 V      |

### 4.2 Resultados

A Figura 8 apresenta os sinais obtidos experimentalmente, todos em sistema por unidade tendo como bases os valores nominais. Em (a), temos o sinal de entrada de velocidade do vento dado ao modelo de emulação eólica. A saída do modelo é o sinal de potência elétrica de referência gerado pelo MPPT, que é convertido em um sinal analógico, cuja medição é apresentada em (b) (tensão base 10 V). Este sinal é recebido pelo ADC do DSP. A potência medida entrando no STATemulator é apresentada em (c). Essa potência perturba a tensão no elo CC, cuja medição é apresentada em (d). Finalmente, essa potência injetada no elo CC é entregue à rede como consequência da regulação do elo pelo Synchronverter. A potência entregue pelo *front end* pode ser observada em (e).

## 5 Conclusões

Os resultados obtidos mostram-se satisfatórios dado o objetivo principal de emular um sistema eólico e seu perfil real de geração de potência, utilizando-se apenas um conversor e fornecer esse perfil de potência a um elo de corrente contínua onde está conectado o conversor *front end*, responsável pelo despacho de potência à microrrede. Essa é uma alternativa viável à emulação de geração eólica tradicional, com conjunto motor-generador. .



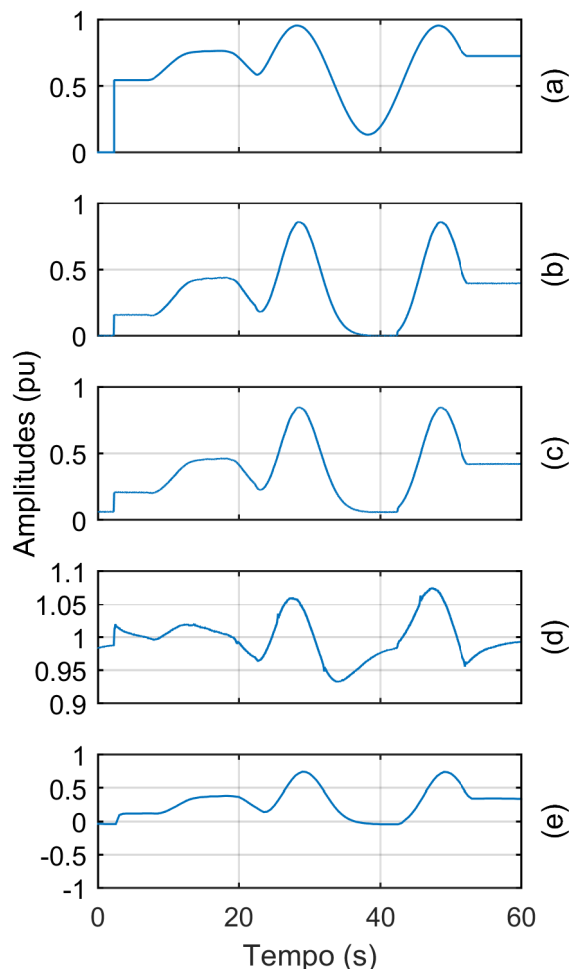


Figura 8: Sinais obtidos através da emulação de uma turbina eólica conectada à rede por um Synchronverter.

### Agradecimentos

Os autores deste trabalho gostariam de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pela contemplação sob o edital E-19/2011-PENSA RIO - Apoio ao estudo de temas relevantes e estratégicos, processo E-26/110.717/2012 intitulado "Impacto da interconexão das fontes intermitentes de energia sobre a rede elétrica através da geração distribuída".

### Referências

- Akagi, H., Watanabe, E. H. and Aredes, M. (2007). *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Wiley.
- Fleury, A., Arteiro, F., Brasil, D., Gomes, P. and Franceschi, A. (2012). Integration of wind power plants into the electric system - the brazilian experience, *Transmission and Distribution: Latin America Conference and Exposition (T&D-LA)*, 2012 Sixth IEEE/PES, IEEE, IEEE Conference Publications, pp. 1–6.
- França, B. W., de Castro, A. R. and Aredes, M. (2015). Wind and photovoltaic power generation integrated to power grid through dc link and synchronverter, *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, pp. 1–6.
- Garcia-Hernandez, R. and Garduno Ramirez, R. (2011). Modeling and control of a wind turbine synchronous generator, *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)*, 2011 IEEE, IEEE Conference Publications, pp. 222–227.
- Liu, X., Mcswiggan, D., Littler, T. B. and Kennedy, J. (2010). Measurement-based method for wind farm power system oscillations monitoring, *IET Renewable Power Generation* 4(2): 198–209.
- Ma, Y., Yang, L., Wang, J., Wang, F. and Tolbert, L. M. (2014). Emulating full-converter wind turbine by a single converter in a multiple converter based emulation system, *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, pp. 3042–3047.
- Mohan, N., Undeland, T. M. and Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics, Converters, Applications and Design*, 3 edn, Wiley.
- Pavinatto, E. F. (2005). *Ferramenta para auxílio à análise de viabilidade técnica da conexão de parques eólicos à rede elétrica*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- Richardot, O., Viciu, A., Besanger, Y., Hadjsaid, N. and Kieny, C. (2006). Coordinated voltage control in distribution networks using distributed generation, *2005/2006 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, pp. 1196–1201.
- Rocha, R. V. (2008). *Simulação de aerogerador em uma bancada experimental*, Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.
- Silva, P. V., Pinheiro, R. F., Salazar, A. O., Junior, L. P. D. S. and Fernandes, J. D. (2015). Um novo sistema para controle de velocidade em aerogeradores utilizando o regulador eletromagnético de frequência, *Eletrônica de Potência* 20(3): 254–262.
- Wu, B., Lang, Y., Zargari, N. and Kouro, S. (2011). *Power Conversion and Control of Wind Power Systems*, Wiley.