

PLATAFORMA PARA ESTUDO DE SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA EMPREGADOS NA INTERCONEXÃO DE UNIDADES DE COGERAÇÃO EÓLICA COM A REDE ELÉTRICA

JULIANO C. LEAL DA SILVA* THIAGO FIGUEIREDO DO NASCIMENTO† THIAGO DE OLIVEIRA ALVES
ROCHA‡ RICARDO LÚCIO DE ARAÚJO RIBEIRO§

*Av. Senador Salgado Filho, 300 - Lagoa Nova - Centro de Tecnologia - UFRN- CEP 59078-970,
Natal/RN, Brasil

juliano.costa@ifrn.edu.br, figueiredo.21@hotmail.com, thiago.rocha@ct.ufrn.br,
rlucio@ct.ufrn.br

Abstract— The actual environment restrictions has driven alternatives to oil-based sources and the development of more sustainable technologies. Among the sources of alternative energies, the wind has been highlighted mainly in regions like the northeast of Brazil and the research development related to this technology becomes relevant. This work proposes the implementation of a platform to emulate a small scale indoor wind power distributed genetor. In this platform, two three-phase permanent magnet synchronous machines (PMSM) mechanically coupled emulate both wind turbine and power generator (PMSG). A back-to-back power converter interconnects the PMSG to the grid via LCL filter. The proposed system employs a *dSPACE* for executing the acquisition and control algorithms. This platform allows the development of future studies applied for AC microgrids integrated with wind power distributed generation. Experimental results demonstrated the feasibility of proposed laboratory setup.

Keywords— Wind energy, benchmark, PMSM, back-to-back converter.

Resumo— As restrições ambientais direcionam alternativas para fontes baseadas em petróleo e o desenvolvimento de tecnologias mais sustentáveis. Entre as fontes de energias alternativas, a eólica tem se destacado principalmente em regiões como o nordeste do Brasil e o desenvolvimento de pesquisas relacionadas a essa tecnologia torna-se relevante. Neste trabalho é proposta a implementação de uma plataforma para emular uma geração distribuída de energia eólica de pequena escala. Nesta plataforma, duas máquinas síncronas de ímã permanente trifásicas (PMSM) e acopladas mecanicamente, emulam tanto a turbina eólica quanto o gerador elétrico (PMSG). Um filtro LCL trifásico é utilizado na interconexão do conversor *back-to-back* à rede elétrica e o sistema proposto emprega um *dSPACE* para executar os algoritmos de aquisição e controle. Esta plataforma permite o desenvolvimento de estudos de futuros aplicados a microrredes CA integradas à geração distribuída de energia eólica. Resultados experimentais demonstraram a viabilidade da configuração laboratorial proposta.

Palavras-chave— Energia eólica, plataforma experimental, PMSM, conversor back-to-back.

1 Introdução

A ascensão de fontes de energias renováveis e sua crescente inserção na rede elétrica têm contribuído para a redução das emissões de carbono e possibilitado uma geração mais diversificada e descentralizada, minimizando os custos de transmissão e perdas elétricas. Dentre as fontes alternativas, a conversão em energia elétrica a partir do vento pelos aerogeradores tem se destacado pela redução dos custos devido ao desenvolvimento tecnológico e pela adoção de incentivos fiscais. No Brasil, a geração eólica atingiu um total de 33.489 GWh em 2016, representando um aumento de 54,9% em relação ao ano anterior. Atualmente, a potência instalada de unidades eólicas no país corresponde a 6,7% da capacidade instalada total da geração de energia elétrica nacional (EPE, 2017).

Por outro lado, a inserção de sistemas de geração distribuída no sistema de potência demandou novos desafios relativos a: qualidade da energia, controle do fluxo de potência, estabilidade e proteção em decorrência da não despachabilidade destas fontes.

Sistemas baseados em PMSM (do inglês, *Permanent Magnetic Synchronous Machine*) têm se

tornado cada vez mais comuns, já que não há necessidade do uso de caixas multiplicadoras de velocidade, devido ao maior número de polos. Além disso, esses sistemas apresentam maior robustez a ocorrência de distúrbios (Mendes et al., 2016), pelo fato da máquina não estar conectada diretamente a rede elétrica, e seu comportamento dinâmico pode ser regulado através do sistema de conversão e controle.

Nas etapas de conversão da energia elétrica gerada, alguns fatores são considerados no desempenho dos sistemas eólicos, tais como: o projeto da turbina, a tecnologia da máquina, as topologias dos conversores estáticos e as estratégias de controle. As plataformas laboratoriais têm a vantagem de viabilizar estudos práticos sem a necessidade do emprego de aerogeradores em escala real.

Sistemas de emulação de energia eólica já foram abordados na literatura, mas não no formato discutido nesse trabalho. No artigo (Soltoski et al., 2016) é desenvolvida uma plataforma para a emulação, em pequena escala, de uma turbina eólica emulada por um motor de indução acoplado mecanicamente a um gerador PMSG e acionado por um CLP. Em (Gontijo et al., 2017) é discutido o processo de calibração e implementação do

sistema de geração formado por um conjunto motor/gerador de indução de 15kW, sendo o motor acionado por um inversor de frequência comercial. Já (Silva et al., 2017) aborda o projeto, construção e comissionamento de um protótipo de sistema de conversão elétrica, utilizando um gerador PMSG de 10kVA acoplado a um motor de indução acionado por um inversor de frequência. O trabalho (Hussain and Mishra, 2014) descreve um sistema para teste e avaliação de desempenho de novas estratégias de controle para a operação dos sistemas de conversão elétrica em sistemas eólicos. A emulação do aerogerador foi realizada por um motor CC acoplado a um gerador PMSG de 1,2kW. Por outro lado, (Henz et al., 2013) direciona para o desenvolvimento do sistema de emulação para fins educacionais. Nele são emuladas diferentes condições de operação da turbina de acordo com os perfis de vento e inclui um sistema de controle supervisor e de aquisição de dados (SCADA). Já em (Peretti et al., 2013) é desenvolvido um emulador de pequena escala composto de dois servomotores. A plataforma possibilita do desenvolvimento de algoritmos de controle para o sistema de conversão de energia em aerogeradores e uma placa de controle baseada em FPGA foi utilizada para modelar efeitos como, por exemplo, o caso de turbulências. O artigo (Carminati et al., 2017) apresenta o desenvolvimento e análise dos resultados de uma plataforma para emulação de geração eólica de 1kW utilizando um processador digital, um inversor de frequência comercial e um filtro LC como substitutos ao conjunto motor/gerador.

Esse artigo tem o objetivo da proposição de uma plataforma experimental para desenvolvimento de futuros estudos de conversão, controle e estabilidade em sistemas de geração eólicos interconectados com a rede elétrica. Duas máquinas PMSG acopladas mecanicamente, emulam tanto a turbina eólica quanto o gerador PMSG. A interconexão entre o gerador e a rede elétrica trifásica é realizada por meio do sistema de conversão *back-to-back* e filtro LCL. O sistema proposto emprega uma plataforma digital *dSPACE* para a validação experimental das estratégias de controle aplicadas aos conversores, conforme apresentado na Fig. 1.

2 Modelagem e controle do sistema eólico

O modelo completo do sistema eólico depende do tipo de máquina, da estrutura de conversão e do filtro de interconexão. A modelagem da máquina, bem como, os dos sistemas de conversão e de controle são discutidos nesta seção.

2.1 Modelo dinâmico do PMSG

O modelo dinâmico do PMSG no referencial síncrono dq , com o eixo d em fase com o vetor fluxo

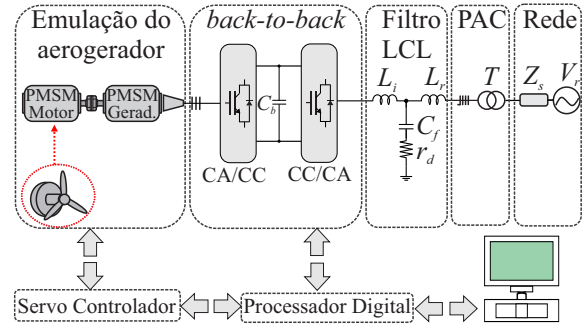


Figura 1: Esquema da plataforma experimental para emulação de uma unidade de geração eólica.

do campo magnético do rotor, pode ser descrito como:

$$v_{gd} = -r_s i_{gd} - L_{gd} \frac{d}{dt} i_{gd} + \omega_e L_{gq} i_{gq}, \quad (1)$$

$$v_{gq} = -r_s i_{gq} - L_{gq} \frac{d}{dt} i_{gq} - \omega_e (L_{gd} i_{gd} + \lambda_{fd}), \quad (2)$$

em que v_{gd} , v_{gq} , i_{gd} e i_{gq} são as tensões e correntes estatóricas, r_s a resistência dos enrolamentos do estator, L_{gd} e L_{gq} as indutâncias estatóricas, λ_{fd} o fluxo magnético do rotor e ω_e a velocidade angular das grandezas elétricas do rotor. O torque eletromagnético, T_e , do PMSG é dado por:

$$T_e = \frac{3p}{2} [\lambda_{fd} i_{gq} + (L_{gd} - L_{gq}) i_{gd} i_{gq}], \quad (3)$$

sendo p o número de polos da máquina.

2.2 Sistema de conversão estático, filtro de interconexão e barramento CC

Devido à característica intermitente do vento, o sistema de conversão estático é necessário para garantir que as tensões geradas a partir do vento com amplitudes e frequências variáveis sejam controladas em níveis constantes e compatíveis com o padrão da rede elétrica no PAC (Ponto de Acoplamento Comum). A estrutura de conversão completa tipo *back-to-back* é formada por dois estágios de conversão, conectados entre si pelo barramento CC, conforme apresentado na Fig. 2. No primeiro estágio, o retificador controla a velocidade do gerador para extrair a máxima potência do vento. No segundo estágio, o inversor, regula a tensão do barramento CC e o fluxo de potência do sistema. As tensões sintetizadas pelos conversores a partir do chaveamento em alta frequência dos IGBTs produzem distorções harmônicas e emissões eletromagnéticas, que podem interferir na operação ou até mesmo danificar equipamentos. Para que a corrente entregue à rede elétrica atenda aos critérios de TDH, algumas configurações de filtros são aplicadas para eliminar harmônicas de ordem elevada e melhorar a qualidade de energia elétrica conforme discutido em (Teodorescu et al., 2010).

Filtros LCL são comumente utilizados pela melhor atenuação de alta frequência e maior desacoplamento com a rede elétrica, segundo (Liserre et al., 2005). Para o projeto dos controladores de corrente do inversor, o modelo do filtro é obtido pela função de transferência $H_{lcl}(s)$ em (10) que relaciona as correntes de saída do filtro, no PAC, em função das tensões sintetizadas pelo inversor.

$$H_{lcl}(s) = \frac{z_1 s + 1}{h_1 s^3 + h_2 s^2 + h_3 s}, \quad (4)$$

sendo $z_1 = r_d C_f$, $h_1 = L_i L_r C_f$, $h_2 = r_d C_f (L_i + L_r)$ e $h_3 = (L_i + L_r)$, dependentes das grandezas elétricas do filtro, conforme esquema da Fig. 1.

O barramento CC permite o controle desacoplado entre os estágios de conversão. No projeto do controlador do barramento CC, C_b é modelado como um capacitor em série com a resistência r_{esr} que representa as perdas elétricas e é considerada insignificante na dinâmica do capacitor na frequência de operação. A função de transferência $H_{C_b}(s)$ relaciona a tensão sobre o capacitor com a corrente de eixo direto i_{rd} no referencial síncrono.

$$H_{C_b}(s) = \frac{1}{s C_b}, \quad (5)$$

em que C_b é a capacitância equivalente do barramento CC.

2.3 Controle do retificador controlado

A estratégia de controle do retificador é implementada no referencial síncrono dq e controladores PI são utilizados conforme a Fig. 2. A malha mais externa, realiza o controle da velocidade, cuja referência de velocidade ω_e^* é obtida pelo algoritmo de rastreamento da máxima potência MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*). O controlador de velocidade é projetado de acordo com o modelo mecânico do PMSG que relaciona a velocidade angular com a corrente do gerador de eixo em quadratura no referencial síncrono i_{gq} , proporcional ao torque eletromagnético do gerador. A estratégia MPPT e o controle de velocidade não serão discutidos neste trabalho. A posição angular mecânica, θ_m , é determinada pelo encoder e o ângulo elétrico do gerador θ_e é calculado pelo produto da posição mecânica e o número de pares de polos p da máquina. O ângulo elétrico é utilizado nas transformações de referencial da estrutura de controle.

Os controladores PI têm a função de transferência convencional dada por:

$$H_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}. \quad (6)$$

A saída do controlador de velocidade determina a corrente de referência i_{gq}^* da malha interna do controle das correntes. O retificador controla

o torque eletromagnético e a potência reativa estatórica, ajustando as correntes estatóricas i_{gq} e i_{gd} , respectivamente. Conforme (3) a corrente do eixo em quadratura do gerador i_{gq} tem relação direta com o torque eletromagnético desenvolvido e, para aumentar a eficiência na conversão eletromagnética, i_{gd}^* é ajustada em zero.

O projeto dos controladores PI, apresentados na Tabela 3, foram baseados no método de posicionamento de polos obtidos por meio da solução da equação *Diofantina* de malha fechada considerando como critérios de projeto um tempo de acomodação (t_a) igual a 0,0286 s e um fator de amortecimento (ξ) igual a 0,707, garantindo uma relação ótima entre o *overshoot* e tempo de acomodação na frequência natural do sistema.

2.4 Controle do inversor

A estratégia do controle de corrente do inversor é realizada no referencial estacionário $\alpha\beta$, conforme o diagrama do lado direito da Fig. 2. A conexão do inversor deve ser realizada de modo sincronizado com a rede elétrica, sendo necessária a informação do ângulo fase, θ_r , do vetor tensão $|v_{rdq}|$ do PAC. O ângulo θ_r é utilizado na transformação das grandezas do referencial síncrono para o referencial estacionário na estratégia de controle. Existem várias técnicas para determinar o ângulo de fase do vetor tensão do PAC. Pela simplicidade de implementação e bom desempenho em sistemas trifásicos balanceados, é utilizada a técnica SRF-PLL (do inglês, *Synchronous Reference Frame Phase-Locked-Loop*), em que a detecção do ângulo é baseada nos sinais em quadratura V_{rd} e V_{rq} das tensões da rede conforme (Teodorescu et al., 2010).

No referencial síncrono, a malha externa de controle regula a tensão do barramento CC (v_{cc}) pelo balanço de energia, e a saída do controlador de tensão impõe a corrente de referência (i_{rd}^*) para a malha interna de controle das correntes. A corrente i_{rq} é regulada em zero para que apenas potência ativa seja entregue à rede elétrica. Para o controle da tensão do barramento CC, foi utilizado um controlador PI conforme (6). O controle da malha interna de corrente é baseada no controlador de dupla sequência DSC (do inglês, *Dual Sequence Controller*), que emprega um controlador para sequência positiva e outro para sequência negativa. Além disso, esse controlador tem a vantagem do uso do princípio do modelo interno senoidal no controle das correntes no referencial estacionário, conforme (Rocha, 2015). Os controladores DSC utilizados tem a função de transferência expressa em:

$$H_{DSC}(s) = \frac{p_2 s^2 + p_1 s + p_0}{s^2 + \omega_n^2}, \quad (7)$$

em que p_2 , p_1 e p_0 são os ganhos dos controladores de corrente.

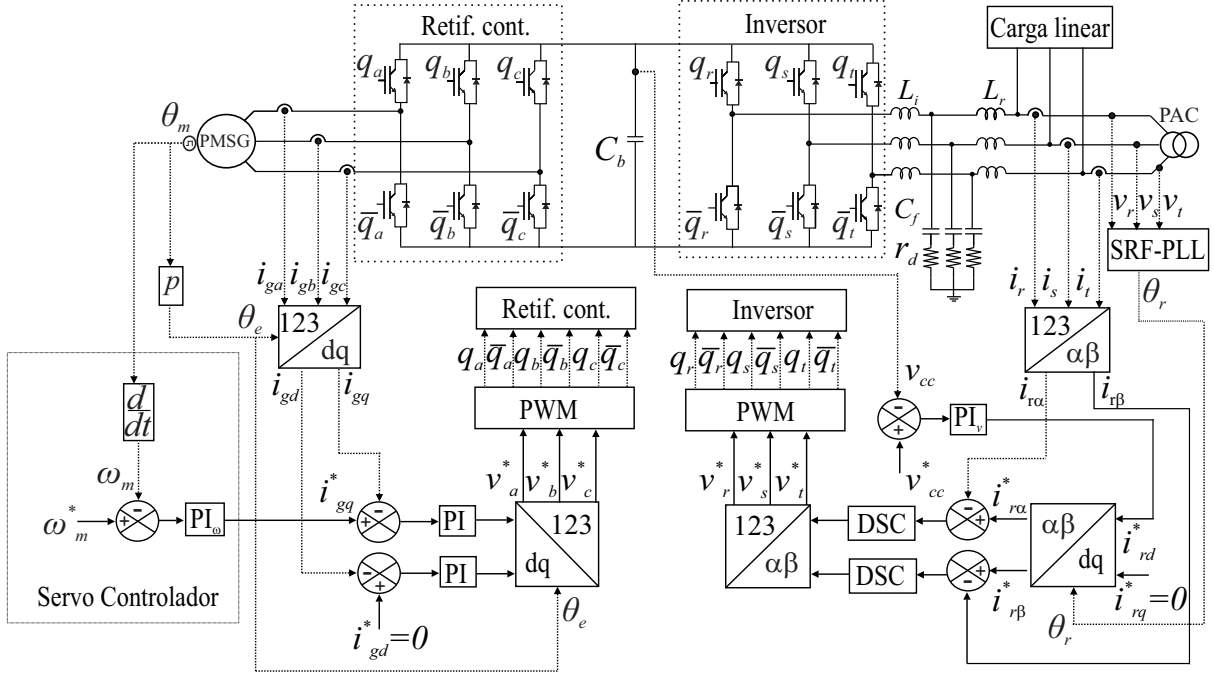


Figura 2: Diagrama geral da estrutura de controle do sistema de conversão *back-to-back*.

No projeto dos ganhos dos controladores DSC de corrente e do controlador PI de tensão foram utilizadas as funções de transferências das plantas em (4) e (5), respectivamente. O ganho dos controladores PI e dos ganhos dos controladores de corrente também utilizam o método de posicionamento de polos, por meio da solução da equação *Diofantina* da função de transferência de malha fechada, discutida anteriormente. Como a saída do controlador de tensão do barramento CC é o valor de referência para o controle interno de corrente, é necessária a escolha de critérios de projeto que impõem uma resposta mais lenta do controlador PI em relação a malha interna. Para o controle de tensão foi definido como critério de projeto um tempo de acomodação (t_a) igual a 0,286 s com um fator de amortecimento de (ξ) igual a 0,707 e, para o controle de corrente, foi definida como critério a frequência de ressonância (ω_n) igual a 377 rad/s com um fator de amortecimento de (ξ) igual a 0,707. Os ganhos dos controladores são detalhados na Tabela 4.

Em ambas as estratégias de controle foi utilizada a estratégia de modulação PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*) senoidal com injeção de componente homopolar para aumento da região linear de operação do inversor.

3 Descrição da plataforma laboratorial

Nesta seção são descritas as especificações técnicas dos componentes físicos, dos elementos de medição, potência e controle da plataforma ilustrada na Fig. 3

O arranjo eletromecânico consiste de duas má-

quinas PMSM (BSH1401P02F2A), com os mesmos parâmetros nominais e eixos acoplados mecanicamente. O motor é acionado por um servo controlador LXM32CD30M2 e emula a dinâmica de uma turbina eólica, ajustando perfis de velocidade ou torque pre-ajustados. O gerador, tem estator conectado em estrela (Y) e o conjunto possui potência nominal de 1,67 kW. Os parâmetros nominais da máquina, são especificados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros nominais do PMSM.

Elemento	Valor
Const. inércia (J_M)	8,542 $kg.cm^2$
Fluxo rotórico (λ_{fd})	0,88 Wb
Indut. de eixo em quadratura (L_{qs})	16,30 mH
Indut. de eixo direto (L_{ds})	14,84 mH
Resistência estatórica (r_s)	1,41 Ω
Nº de polos (p)	10
Velocidade nominal (n_n)	1.500 rpm
Corrente nominal (I_n)	7,6 A

As especificações dos conversores e os valores nominais dos elementos do filtro de interconexão são apresentadas na Tabela 2. O sistema de controle utiliza a plataforma dSPACE DS1103, baseado no processador PowerPC 750GX de ponto flutuante e frequência de 1 GHz. Na operação do sistema eólico são utilizadas nove saídas PWM, sendo três saídas para o acionamento do retificador controlado e as outras seis para o acionamento do inversor; quatro sensores de tensão LV25-P para medição das tensões v_{cc} e v_{rst} ; seis sensores de corrente de efeito *Hall* LA35-NP para medição das correntes i_{abc} e i_{rst} , conectados em canais



Figura 3: Plataforma experimental. a) Sensores de tensão e corrente; b) Inversor; c) Retificador controlado; d) *Dspace* DS1103; e) Servo controlador; f) Conjunto motor/gerador PMSM; g) PC/supervísório.

Tabela 2: Especificações técnicas dos conversores e do filtro LCL.

Elemento	Valor
Tensão de saída (V_o)	220V
Freq. de chaveamento (f_s)	10 kHz
Potência nominal (P_n)	20 kVA
Corrente nominal máxima (I_n)	31A
Cap. do barramento CC (C_b)	4700uF
Tensão do barramento CC (V_{cc})	450V
Indutância do lado do inversor (L_i)	3,5mH
Indutância do lado da rede elétrica (L_r)	1,5mH
Resistência de amortecimento (r_d)	2,5 Ω
Capacitor do filtro (C_f)	5 uF

analógicos A/D para realimentação das malhas de controle; uma entrada serial RS-232, para conexão do encoder e_{inc} ; e uma saída analógica D/A que transmite o sinal do perfil de vento na faixa de -10 a +10 V. Para garantir isolamento elétrico entre as saídas PWM do *dSPACE* e os drivers de acionamento dos conversores são utilizados cabos de fibra óptica. Para atenuação de ruídos e interferências eletromagnéticas, as conexões entre os sensores e as entradas A/D são feitas com cabos coaxiais.

O acionamento do motor é realizado pelo servo *driver*, que impõe determinado perfil de velocidade n_g na ponta do eixo acoplado ao gerador. A informação da posição angular rotórica θ_m é transmitida pelo encoder de 4096 incrementos por revolução, para ser utilizada no controle do retificador controlado, realizado no *dSPACE*.

A conexão entre a saída analógica D/A do *dS-*

PACE e a entrada analógica A/D do servo driver é feita com cabo coaxial. Os sinais do encoder, gerados na saída PTO (do inglês, *Pulse Train Output*), são transmitidos através de cabos tipo par trançado, blindados eletromagneticamente e enrolados em volta de um núcleo de ferrite.

A estrutura de potência permite a conexão a um banco de cargas trifásicas lineares que podem ser conectadas em estrela ou triângulo. A carga consiste de três resistores R_l de 20 Ω e três indutores L_l de 60 mH que podem ser conectadas em série ou em paralelo. Na Fig. 4 é representado o diagrama simplificado com a configuração física da plataforma.

Os parâmetros e os critérios de projeto dos controladores PI do retificador controlado são detalhados na Tabela 3 e para o controlador PI da tensão do barramento CC e dos controladores DSC, na Tabela 4.

Tabela 3: Ganhos dos controladores de corrente do retificador controlado.

Parâmetro	Valor
Ganho proporcional - eixo d (K_{pd})	2,7453
Ganho integrativo - eixo d (K_{id})	593,6
Ganho proporcional - eixo q (K_{pq})	3,154
Ganho integrativo - eixo q (K_{iq})	652

4 Resultados Experimentais

Nesta seção são discutidos os resultados experimentais das estratégias de controle discutidas nas seções 2.3 e 2.4. A primeira etapa consistiu

Tabela 4: Ganhos dos controladores do inversor.

Parâmetro	Valor
Ganho proporcional - PI (K_{pv})	0,13
Ganho integrativo - PI (K_{iv})	1,88
Ganho 0 - DSC (p_0)	594840,78
Ganho 1 - DSC (p_1)	2700
Ganho 2 - DSC (p_2)	5,13

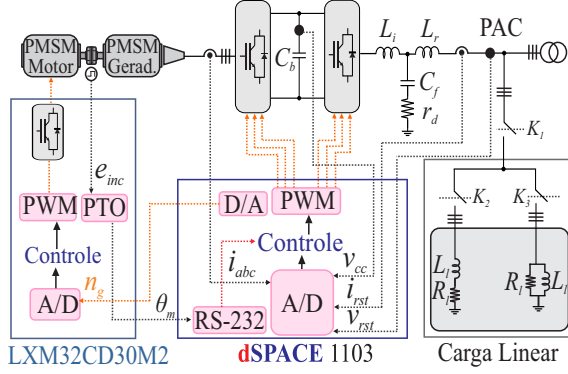


Figura 4: Diagrama esquemático da plataforma experimental.

do controle de velocidade imposta ao gerador pelo servo controlador. Na Fig. 5, uma rampa de velocidade é ajustada pelo servo até o valor de 1250 rpm.

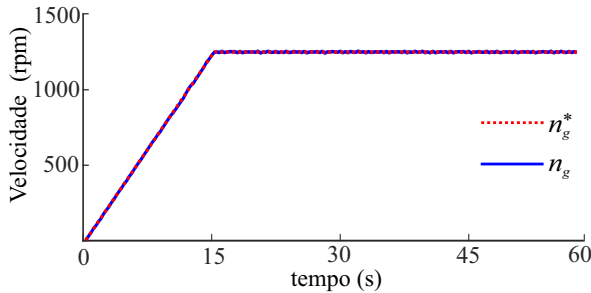


Figura 5: Velocidade de referência e velocidade medida em rampa imposta ao gerador.

Para validação das técnicas de controle, foram realizados três testes. O primeiro teste, consistiu de uma variação em degrau da carga conectada ao PAC mantendo-se constante a potência gerada. Foi utilizada uma carga linear trifásica formada por resistores de 20 Ω em paralelo com indutores de 60 mH. No segundo teste, foi realizada uma variação em degrau de 0 a 100 % na potência fornecida pelo gerador, mantendo-se constante a carga conectada ao PAC. No último teste, a carga foi removida do PAC e um degrau de 0 a 100 % foi imposto ao controle de corrente do gerador sendo a potência gerada entregue à rede elétrica.

O método de sincronização PLL extrai o ângulo de fase θ_r do vetor tensão da rede elétrica, conforme a Fig. 6.

O ângulo fornecido pelo PLL é sincronizado com a fase r do PAC e utilizado como referen-

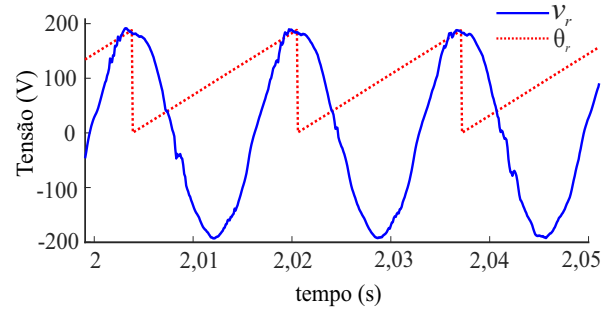


Figura 6: Tensão da fase r do PAC e ângulo de referência θ_r em escala ampliada.

cial na malha interna de controle das correntes do senoidais $i_{r\alpha}$ e $i_{r\beta}$ do inversor conforme a Fig. 7.

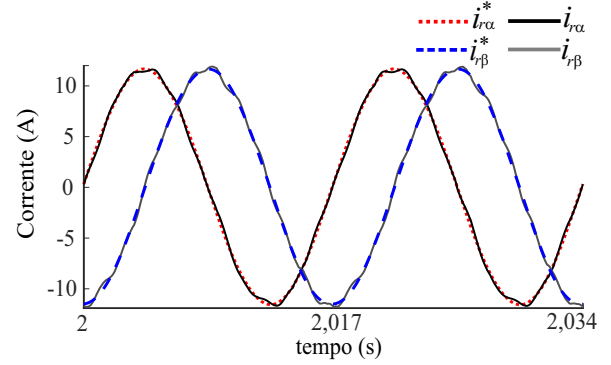


Figura 7: Correntes i_α e i_β da malha interna de controle do inversor.

Na Fig. 8, são ilustradas as correntes no referencial síncrono dq , em que a corrente i_{gd}^* foi controlada para 0 A, reduzindo as perdas resistivas, e a corrente i_{gq}^* controlada para 8,0 A, correspondendo a uma potência gerada de aproximadamente 1,0 kW na condição de velocidade imposta ao gerador. Durante o degrau de carga, o controle das correntes do gerador não é influenciado diretamente pela perturbação no PAC conforme a Fig. 8(a). Como a resposta dinâmica da tensão do barramento CC é mais lenta do que a das correntes, verifica-se inicialmente, um decaimento na tensão v_{cc} durante a ativação da carga e, em seguida, uma elevação em v_{cc} logo após a remoção da carga no PAC, conforme a Fig. 8(b). Quando a tensão do barramento CC decai, o controle do barramento CC impõe que o inversor receba energia da rede elétrica para manter a tensão estável e, quando a carga é removida e v_{cc} aumenta, o controlador novamente impõe a regulação após alguns ciclos da rede elétrica.

No segundo teste, durante a energização do estágio de potência, o barramento CC é carregado até o valor de pico da tensão de linha da rede elétrica (311V) pelos diodos em anti-paralelo dos IGBTs. Quando o controle do inversor é acionado, a tensão do barramento CC é regulada através de uma rampa crescente até o valor de referência

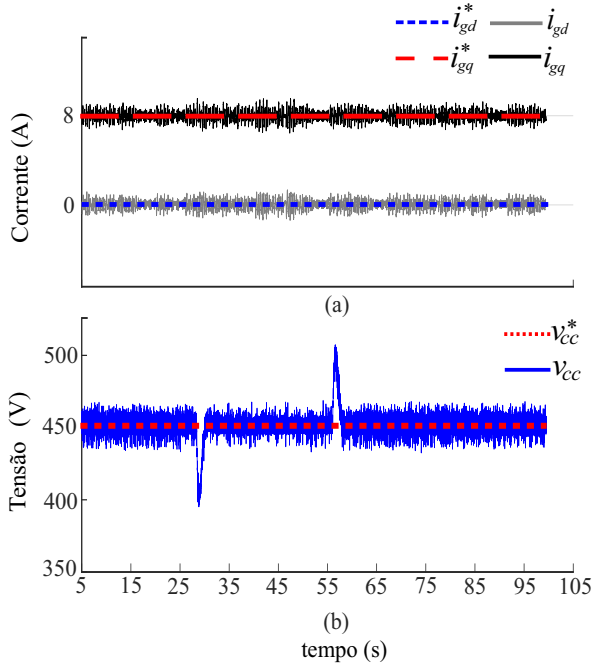


Figura 8: Variação em degrau de carga conectada ao PAC. a) Correntes i_{gd} e i_{gq} . b) Tensão v_{cc} do barramento CC.

de 450V. Nesse intervalo de tempo percebe-se um *overshoot* nas correntes da rede, durante o carregamento do barramento, conforme os instantes iniciais da Fig.9(b).

Inicialmente o controle do retificador controlado impõe $i_{gq} = 0A$ e $i_{gd} = 0A$ conforme a Fig. 9(a) e a rede fornece para a carga uma corrente com valor de pico de aproximadamente 10 A por fase. Em seguida, um degrau é imposto ao controle de corrente do gerador, fazendo $i_{gq}^* = 8A$. Nesta situação verifica-se uma diminuição na amplitude das correntes fornecidas pela rede à carga, segundo a Fig.9(b). A diferença entre os valores de corrente representa a contribuição do gerador no fornecimento de potência ativa à carga.

Por último, foi verificada a resposta ao degrau imposta ao controle do gerador de 0 até o valor correspondente à potência nominal do gerador, e após 10 segundos, o retorno à condição inicial, sem conexão de carga no PAC. Na Fig. 10(a) são representadas as correntes do gerador no referencial síncrono i_{gd} e i_{gq} controladas em 0A e 10 A, respectivamente. Na Fig. 10(b) são representadas as correntes do gerador no referencial natural i_{ga} , i_{gb} e i_{gc} . Verifica-se um *overshoot* de aproximadamente 30,0 A durante o transitório de aplicação do degrau e, em seguida, as correntes se mantêm no valor de pico de aproximadamente 8,0A durante o degrau imposto. A diferença entre o valor de pico das correntes i_{ga} , i_{gb} e i_{gc} e a corrente i_{gq} é justificada pelo uso de matrizes de transformação conservativas em potência nas estratégias de controle. Na Fig. 10(c) a oscilação de tensão no barramento CC é explicada pela dinâ-

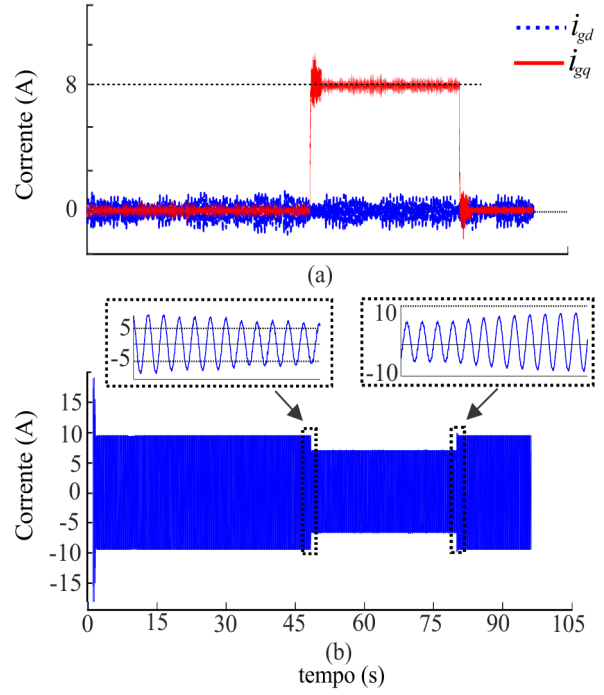


Figura 9: Variação em degrau na cogeração. a) Correntes i_{gd} e i_{gq} do gerador; b) Corrente na fase r do PAC.

mica mais lenta do controlador de tensão e na Fig. 10(d) são plotados em um mesmo gráfico a tensão e corrente da fase r no PAC. Antes da inserção da cogeração, a corrente i_r é praticamente nula e após o degrau, tem valor de pico de aproximadamente 4,0A com defasagem de 180° da tensão da v_r devido à convenção de entrada do sensor de corrente com relação à rede elétrica. Após a remoção do degrau, a tensão do barramento CC decai e, para manter a tensão v_{cc} regulada, durante um determinado intervalo de tempo, a rede fornece corrente ao barramento CC garantindo o retorno ao valor de referência. Após a remoção do degrau a corrente retorna para o valor aproximadamente nulo.

5 Conclusões

Este trabalho propôs a implementação de uma plataforma experimental para emulação de um sistema de geração eólica de velocidade variável. O sistema de geração foi implementado utilizando a topologia PMSM associado a um sistema de conversão completo. Os resultados experimentais validaram as estratégias de controle. A plataforma permite a realização de futuros estudos em outras condições de operação como variações na velocidade do vento, análise de diferentes técnicas para máxima extração da potência do vento, desenvolvimento de outras estratégias de controle e modulação PWM, comparativo de topologias de conversão e mitigação dos seus impactos na sua

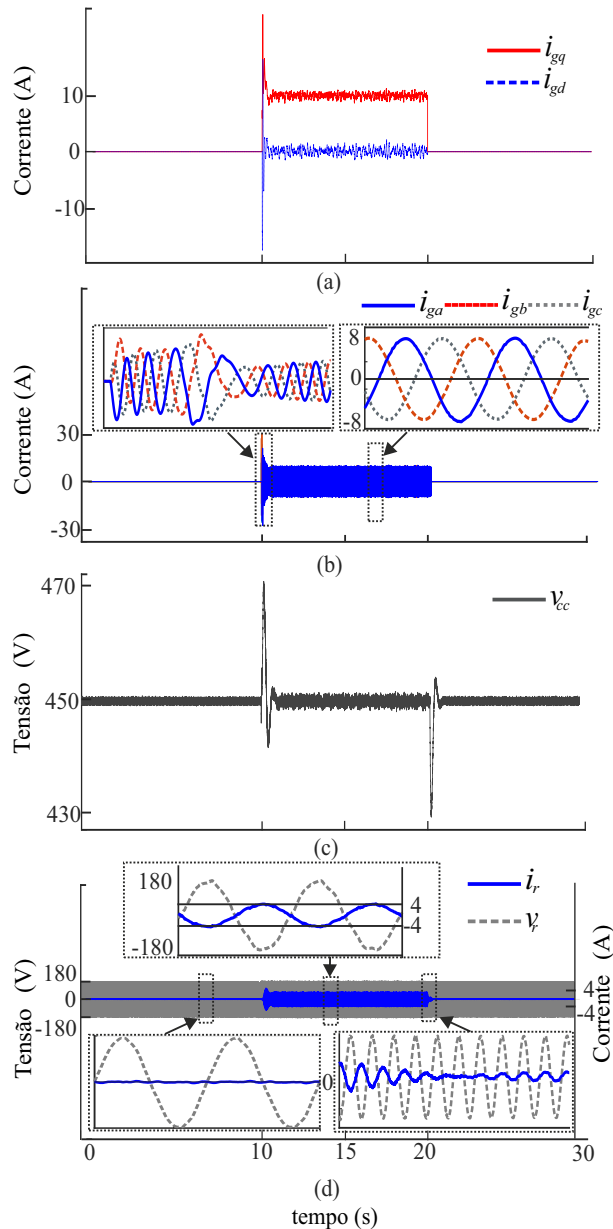


Figura 10: Variação em degrau na cogeração. a) Correntes i_{gd} e i_{gq} do gerador; b) Corrente na fase r do PAC; c) Tensão v_{cc} do barramento CC.

integração em microrredes CA.

Referências

- Carminati, R. C., Vieira, J. L. F., Costa, G. M., Freitas, T. R. S. and Simonetti, D. S. L. (2017). Development of a bench to simulate a pmsg wind turbine using a frequency inverter, *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)* pp. 1–6.
- EPE (2017). *Balanço Energético Nacional*, Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro.
- Gontijo, G., Krejci, D., Guedes, S., Tricarico, T., França, B. and Aredes, M. (2017). Implementation of a wind turbine emulator test

bench using a squirrel cage induction machine, *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)* pp. 1–6.

- Henz, G., Koch, G., Franchi, C. M. and Pinheiro, H. (2013). Development of a variable speed wind turbine emulator for research and training, *2013 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)* pp. 737–742.
- Hussain, J. and Mishra, M. K. (2014). Design and development of real-time small-scale wind turbine simulator, *2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics (IICPE)* pp. 1–5.
- Liserre, M., Blaabjerg, F. and Hansen, S. (2005). Design and control of an lcl-filter-based three-phase active rectifier, *IEEE Transactions on Industry Applications* **41**(5): 1281–1291.
- Mendes, V. F., Matos, F. F., Liu, S. Y., A. F. Cupertino, A., Pereira, H. A. and Sousa, C. V. (2016). Low voltage ride-through capability solutions for permanent magnet synchronous wind generators, *2016 Energies* pp. 1–19.
- Peretti, L., Särkimäki, V. and Faber, J. (2013). A wind turbine emulator for generator control algorithm development, *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* pp. 228–233.
- Rocha, T. O. A. (2015). *Contribuições para Estratégia de Controle Aplicada à Geração Fotovoltaica Interconectada à Rede Elétrica.*, PhD thesis, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- Silva, R. M., Paula, C. L. M., Matos, F. F. V., Rezende, G. M., Souza, C. V. and Mendes, V. F. (2017). Design and commissioning of wind generation system studies workbench using permanent magnet synchronous machine, *2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)* pp. 1–7.
- Soltoski, J. C. F., dos Santos, P. T. P. and Font, C. H. I. (2016). Development of a small scale wind turbine emulator work bench, *2016 12th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)* pp. 1–8.
- Teodorescu, R., Liserre, M. and Rodríguez, P. (2010). *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, Wiley-Blackwell.