

DESENVOLVIMENTO DE UM EMULADOR EÓLICO ELETRÔNICO BASEADO NO MODELO DINÂMICO DO GERADOR SÍNCRONO DE ÍMÃ PERMANENTE

Danilo H. Wollz, Sérgio A. O. da Silva, Leonardo P. Sampaio
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - Cornélio Procópio – PR Brazil
e-mail: danilo_wollz@hotmail.com, augus@utfpr.edu.br, sampaio@utfpr.edu.br

Resumo – Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um emulador eólico eletrônico (EmEE), o qual envolve os modelos dinâmicos da turbina eólica, do gerador síncrono de ímã permanente e do acoplamento mecânico turbina-gerador. Tais modelos são empregados na geração das referências de tensão do EmEE, as quais são sintetizadas por um inversor de tensão trifásico a três fios, de forma que um aerogerador real possa ser emulado para diferentes velocidades do vento. O EmEE proposto apresenta como vantagens o seu baixo custo de implementação e sua versatilidade na emulação de diferentes modelos de aerogeradores comerciais, viabilizando a realização de diversas pesquisas em laboratório. Um retificador controlado trifásico é usado no estágio de entrada do EmEE para controlar a tensão do barramento CC do inversor, bem como drenar da rede elétrica correntes senoidais, de forma que uma efetiva correção do fator de potência seja alcançada. Tanto o modelo matemático do inversor quanto do retificador de entrada, são representados no referencial síncrono dq . No intuito de validar o estudo realizado, assim como avaliar os desempenhos estáticos e dinâmicos do EmEE proposto, resultados experimentais são apresentados considerando o sistema submetido a diferentes tipos de carga e perfis de vento.

Palavras-chave – Emulador eólico eletrônico, Gerador síncrono, Turbina eólica.

DEVELOPMENT OF A WIND TURBINE EMULATOR BASED ON DYNAMIC MODEL OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR

Abstract – This work presents the development of an electronic wind emulator (EWEm), which involves the dynamic models of the wind turbine, the permanent magnet synchronous generator and the mechanical coupling turbine-generator. These models are used to generate the EWEm voltage references, which are synthesized by a three-phase three-wire voltage source inverter, so that a real wind turbine can be emulated at different wind speeds. As advantages, the proposed EWEm presents low cost of implementation and versatility in the emulation of different models of commercial wind turbines, making possible the accomplishment of several

researches in the laboratory. A three-phase controlled rectifier is used in the input stage of the EWEm to control the DC-bus voltage of the inverter, as well as drain sinusoidal currents from the grid, so that an effective power factor correction is achieved. Both mathematical models of the inverter and the input rectifier are represented in the synchronous reference frame dq . In order to validate the study, as well as to evaluate the static and dynamic performances of the proposed EWEm, experimental results are presented considering the system subjected to different types of load and wind profiles.

Keywords – Electronic wind emulator, Synchronous generator, Wind turbine.

I. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, devido à crescente demanda mundial por energia elétrica, aliada aos grandes impactos ambientais causados pela utilização de combustíveis fósseis, a geração de energia elétrica baseada em fontes de energia renováveis (FER) tem se consolidado como uma tendência promissora, quando comparadas às fontes convencionais poluentes de energia elétrica [1],[2]. O uso de FER, tais como a solar e a eólica, tem sido estimulado pelos crescentes incentivos fiscais governamentais concedidos no Brasil. Além disso, devido ao crescente avanço tecnológico, seu uso tem se tornando cada vez mais competitivo financeiramente [3],[4].

Neste contexto, dentre as FER existentes, a eólica tem apresentado um crescimento mais acelerado em termos de potência instalada em âmbito mundial. Tal crescimento tem se intensificado devido ao avanço tecnológico das turbinas eólicas (TE), acarretando aumento de eficiência, capacidade de geração e redução no custo por kWh gerado [4],[5].

Dentre as tecnologias de sistemas eólicos de velocidade variável existentes, destacam-se aquelas que utilizam geradores de indução duplamente alimentado (GIDA) [6], bem como as que empregam geradores síncronos de ímã permanente (GSIP) [7]. As TE que empregam o GSIP têm sido amplamente utilizadas devido à redução dos custos dos materiais magnéticos, bem como por permitirem a ausência da caixa de engrenagens entre a turbina e o gerador [3],[8],[9].

Contudo, o desenvolvimento de pesquisas em laboratórios usando aerogeradores comerciais, se depara aos altos custos envolvidos. Outros fatores limitantes, os quais dificultam o desenvolvimento de pesquisas na área, estão nas inconstâncias

Artigo submetido em 25/04/2019. Primeira revisão em 13/06/2019. Aceito para publicação em 15/11/2019 por recomendação do Editor Marcello Mezaroba. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2019.4.0032>

da velocidade do vento e nas limitações físicas envolvidas nos testes de diversos tipos/potências de aerogeradores.

Assim, equipamentos capazes de reproduzir o comportamento dinâmico e estático de TEs vêm sendo desenvolvidos [10]-[16]. Tais equipamentos, denominados emuladores eólicos (EmE), têm se consolidado como uma ferramenta essencial no desenvolvimento de projetos em laboratórios de pesquisas [11],[12].

Emuladores eólicos convencionais, baseados na utilização de máquinas elétricas, têm sido amplamente difundidos na literatura [11]-[16], enquanto a emulação de aerogeradores com conexão com a rede elétrica tem sido realizada utilizando conversores estáticos de potência [17],[18]. Em [13],[15] são apresentados EmE compostos por um motor de corrente contínua (CC) acoplado ao eixo de um gerador elétrico (GE). Neste caso, o motor CC é o responsável por emular a turbina eólica, aplicando ao eixo de um GE o mesmo torque mecânico que seria aplicado por uma turbina eólica real operando em uma determinada velocidade do vento. Para tal finalidade, a utilização de um conversor estático de potência se faz necessária para controlar o torque do motor CC, que por sua vez são volumosos e necessitam de manutenções periódicas mais frequentes devido a presença de escovas coletoras.

Para contornar os problemas apresentados pelo uso de motores CC, tem-se usado nos EmE motores de indução trifásicos (MIT), os quais são mais eficientes, apresentam menores custos, possuem menores dimensões, além de necessitarem manutenções periódicas menos frequentes quando comparados aos motores CC [12],[14]. Contudo, mesmo com as vantagens apresentadas em relação ao uso de motores CC nos EmE, o uso do MIT, assim como também acontece com os motores CC, apresentam desvantagens adicionais, tais como a geração de ruídos audíveis e a necessidade do uso de conversores de potência para realizar o controle das máquinas, acarretando o aumento de custos.

A principal contribuição deste trabalho consiste em um estudo detalhado referente ao desenvolvimento de um emulador eólico eletrônico (EmEE). Diferentemente dos EmE convencionais, baseados no uso de máquinas rotativas, a estrutura de potência do EmEE proposto mostrado na Figura 1, é composta essencialmente por um inversor de tensão trifásico e elementos de filtragem. Equações dinâmicas, as quais representam os comportamentos dinâmicos e estáticos, obtidas pelas modelagens matemáticas da turbina eólica (TE), gerador síncrono de ímã permanente (GSIP) e acoplamento mecânico (AM) turbina-gerador, são usadas na geração das referências de tensão a serem sintetizadas pelo inversor. O algoritmo de geração de referências (AGR) é embarcado a um controlador digital de sinais (DSC—*Digital Signal Controller*), o qual também realiza todo o controle do inversor para qualquer perfil de velocidade do vento. Um retificador trifásico controlado (RTC) é usado no estágio de entrada do EmEE para controlar a tensão do barramento CC do inversor e drenar da rede correntes senoidais de forma que uma efetiva correção do fator de potência (FP) seja realizada.

Uma vez que apenas conversores estáticos de potência são utilizados, torna o EmEE proposto neste trabalho bastante versátil, pois permite a emulação de uma vasta gama de aerogeradores comerciais, bastando para isso alterar a modelagem matemática a ser embarcada no DSC. Além de

preservar características inerentes aos EmE convencionais baseados em máquinas rotativas, pela possibilidade de emulação de diferentes perfis de vento, o EmEE proposto pode também ser usado em diferentes configurações de sistemas eólicos com conexão com a rede elétrica. No entanto, deve-se considerar que a potência do aerogerador a ser emulado é limitada pela potência nominal processada pelos conversores de potência. Resultados experimentais são apresentados para validar o desenvolvimento do EmEE proposto, bem como avaliar os seus desempenhos dinâmicos e estáticos (regime permanente). Para este propósito, parâmetros de um aerogerador comercial são usados.

II. SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA

A Figura 2 ilustra os elementos principais que compõem um sistema típico de geração de energia elétrica a partir de uma fonte de energia eólica. O sistema é basicamente composto por uma TE, uma caixa de engrenagens (CE), um GE, um conversor estático de potência (CEP) e um transformador para a interligação do sistema com a rede elétrica [3].

De acordo com o nível de potência e da tecnologia empregada, diferentes topologias de TEs podem ser usadas, podendo estas operarem com velocidade de rotação fixa ou variável [8],[19]. Em [8] o estudo envolvendo as topologias de TEs mais difundidas na literatura é abordado, onde ressalta-se que as TEs com velocidade variável apresentam várias vantagens em relação às de velocidade fixa. Um sistema eólico de velocidade variável com desacoplamento total entre o conjunto TE-GSIP e a rede elétrica é apresentada na Figura 3 [19]. O desacoplamento é realizado pelos conversores de potência CA-CC e CC-CA que processam toda a energia do sistema, sendo estes também denominados de conversores de escala total. O conversor do lado do gerador (CLG) é responsável pelo gerenciamento da corrente do mesmo. Desta forma, a velocidade de rotação do rotor pode ser ajustada no intuito de obter a máxima geração de energia em velocidades do vento abaixo da nominal. Sendo assim, devem ser implementadas as técnicas de rastreamento de máxima potência, de forma que o sistema possa atuar em uma ampla faixa de velocidade de rotação do gerador [7],[20],[21].

Na maioria das aplicações, o conversor do lado da rede elétrica (CLR) é controlado, para operar como fonte de corrente, injetando na rede elétrica a energia ativa produzida pelo aerogerador. Adicionalmente, o CLR deve operar de forma a atender aos requisitos de segurança exigidos pelos operadores do sistema elétrico [22].

Em relação ao uso do GSIP em sistemas de geração eólica, este apresenta vantagens em relação aos outros tipos de geradores [8], tais como: ausência de circuitos externos de excitação; maior confiabilidade devido à ausência de componentes mecânicos como a caixa de engrenagens multiplicadora de velocidade, diminuindo os custos de manutenção; ausência de anéis coletores no rotor, diminuindo perdas por condução e promovendo uma melhor eficiência. Desta forma, devido aos atrativos encontrados pelo uso do GSIP em sistemas eólicos, este vem sendo adotado pelas principais indústrias de turbinas eólicas no mundo [23],[24].

Neste trabalho, o EmEE envolve a TE, o AM e o GSIP do sistema eólico apresentado na Figura 3.

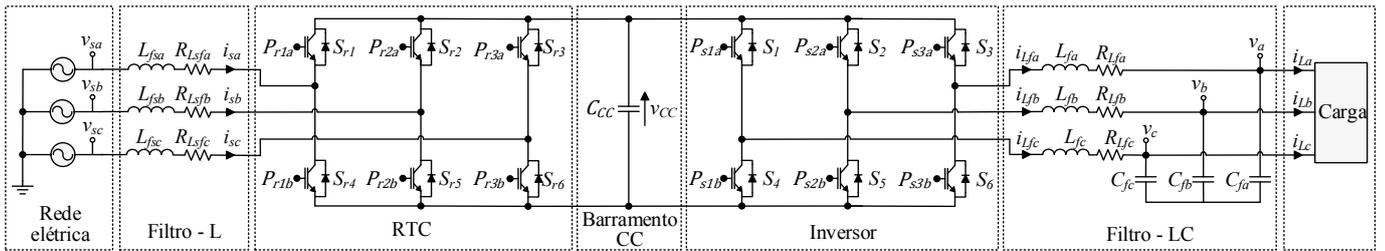


Fig. 1. Estrutura de potência do EmEE.

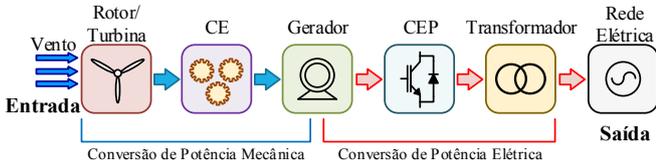


Fig. 2. Configuração de um sistema de geração de energia eólica.

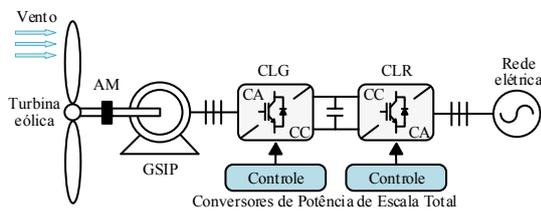


Fig. 3. Sistema eólico de velocidade variável.

III. EMULADORES EÓLICOS

A. Emulador Eólico Convencional (EmE)

A Figura 4 ilustra um EmE convencional empregando um MIT [14]. O motor é responsável por emular a TE, aplicando ao eixo do GSIP a potência mecânica que seria aplicada por uma turbina eólica real, submetida a determinados perfis de velocidade do vento. Assim, um conversor estático de potência se faz necessário para controlar o torque do motor, onde o controle é baseado no modelo dinâmico da TE [25], [26]. Neste caso, o modelo é responsável por fornecer ao controle o torque mecânico de referência (T_m^*) a partir de uma velocidade do vento (V_v) desejada. O gerador converte a potência mecânica oriunda do MIT novamente em energia elétrica, emulando assim um aerogerador.

Como pode ser notado, a estrutura do EmE convencional da Figura 4 necessita do uso de um conversor de potência e duas máquinas rotativas. Além disso, há a necessidade da utilização de sensor para a medição do torque mecânico (T_m) do motor, acarretando custos adicionais à estrutura do EmE.

B. Emulador Eólico Eletrônico (EmEE)

A Figura 5 mostra o esquema simplificado do EmEE proposto. Este é composto estritamente por conversores estáticos de potência, sendo o inversor trifásico o responsável por emular o aerogerador, sintetizando em sua saída tensões trifásicas seguindo as tensões de referência do AGR. O esquema de controle do EmEE é apresentado na Figura 6, o qual é responsável pelo gerenciamento dos conversores estáticos de potência apresentados na Figura 1.

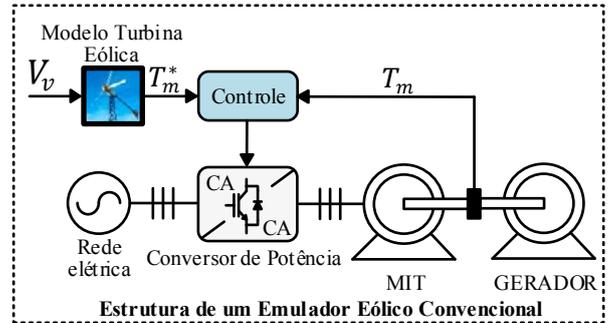


Fig. 4. Estrutura de um EmE convencional equipado com MIT.

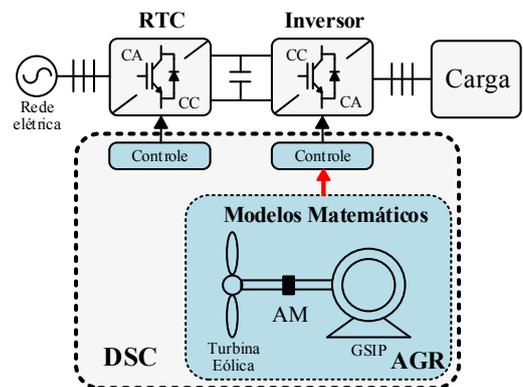


Fig. 5. Esquema simplificado do EmEE proposto.

No AGR são implementos os modelos matemáticos dos elementos principais que compõe o aerogerador, sendo estes a TE, o AM e o GSIP.

O sincronismo do RTC com a rede elétrica é feito pelo sistema PLL (*Phase-Locked Loop*) [27]. O ângulo de fase estimado da rede elétrica (θ_{pu}) é utilizado para a obtenção das coordenadas do vetor unitário síncrono $sen(\theta_{pu})$ e $cos(\theta_{pu})$, as quais são usadas na transformação das grandezas de corrente do referencial estacionário abc para o referencial síncrono dq e vice-versa.

Também no referencial dq , os parâmetros do GSIP, tais como as indutâncias estatóricas e o fluxo magnético dos ímãs permanentes tornam-se independentes da posição angular elétrica θ_e , se comportando como grandezas constantes [7].

A. Modelo Aerodinâmico da Turbina Eólica

A potência mecânica de uma turbina eólica pode ser obtida por (1), onde a grandeza λ que representa a relação linear de velocidade da turbina é calculada por (2).

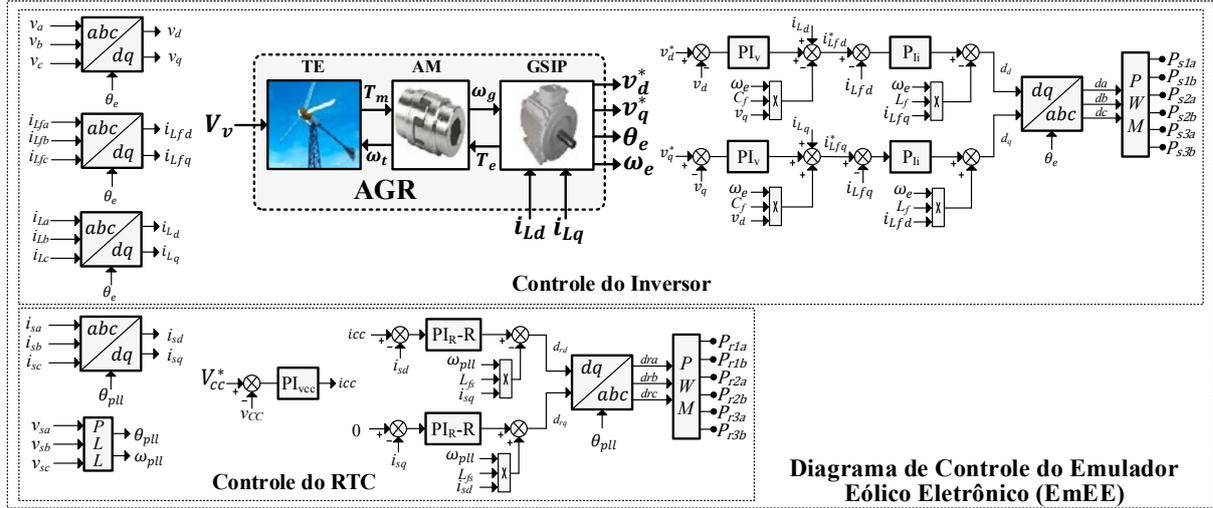


Fig. 6. Diagrama de controle do EmEE proposto.

$$P_m = \frac{1}{2} \pi R_t^2 \rho_{ar} V_v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\omega_t R_t}{V_v} \quad (2)$$

Considerando as (1) e (2), R_t representa o raio da turbina (m); ρ_{ar} é a densidade do ar (kg/m^3); V_v é a velocidade do vento (m/s); C_p é coeficiente de potência da turbina; β é o ângulo de passo das pás da turbina e ω_t é a velocidade de rotação do eixo da turbina (rad/s).

O conjugado mecânico, ou torque mecânico, aplicado ao eixo da turbina pode ser calculado como segue:

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_t} \quad (3)$$

Substituindo (1) e (2) em (3), o conjugado mecânico é dado por:

$$T_m = \frac{1}{2\lambda} \pi R_t^3 \rho_{ar} V_v^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (4)$$

O coeficiente de potência $C_p(\lambda, \beta)$ indica a eficiência com que a TE transforma a energia cinética do vento em energia mecânica. Este coeficiente depende da relação linear entre a velocidade do vento e a velocidade da ponta da hélice da turbina (λ), bem como do ângulo de passo das hélices da turbina (β). O cálculo de $C_p(\lambda, \beta)$ é determinado por:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \beta^{c_5} - c_6 \right) e^{-\frac{c_7}{\lambda_i}} \quad (5)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\lambda + c_8 \beta} \frac{c_9}{\beta^3 + 1} \quad (6)$$

onde os coeficientes c_1 a c_9 , utilizados neste trabalho, são baseados em [25].

Neste trabalho é adotado uma turbina do tipo horizontal de três pás de 6,0 kW de potência nominal, com o raio da turbina (R_t) de 2,775 m.

B. Modelo Dinâmico do GSIP

O modelo dinâmico do GSIP está baseado no referencial síncrono dq , a partir da utilização da transformada de Park [26],[28]. Componentes de sequência negativa e zero foram omitidas, pois se considera um sistema trifásico simétrico e equilibrado.

Assim, o comportamento dinâmico do GSIP é dado por:

$$v_{d,s} = r_s i_{d,s} - \omega_e L_q i_{q,s} + L_d \frac{di_{d,s}}{dt} \quad (7)$$

$$v_{q,s} = r_s i_{q,s} + \omega_e L_d i_{d,s} + \omega_e \psi_m + L_q \frac{di_{q,s}}{dt} \quad (8)$$

onde $v_{d,s}$ é a tensão estatórica no eixo d ; $v_{q,s}$ é a tensão estatórica no eixo q ; r_s é a resistência estatórica; $i_{d,s}$ é corrente estatórica no eixo d ; $i_{q,s}$ é corrente estatórica no eixo q ; ω_e é frequência angular elétrica do gerador; L_d é a indutância estatórica no eixo d ; L_q é a indutância estatórica no eixo q e ψ_m é a amplitude do enlace do fluxo dos ímãs permanentes visto pelos enrolamentos do estator a vazio.

Por (7) e (8) obtêm-se os circuitos equivalentes do GSIP no referencial síncrono dq , ilustrados pelas Figuras 7 e 8, respectivamente, onde as correntes $i_{d,s}$ e $i_{q,s}$ são negativas.

O torque eletromagnético do GSIP é dado por:

$$T_e = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) [\psi_m i_{q,s} + (L_d - L_q) i_{d,s} i_{q,s}] \quad (9)$$

Em (9) percebe-se a presença de dois termos. O primeiro é referente ao torque gerado pelo enlace de fluxo dos ímãs, enquanto o segundo se refere ao torque de relutância.

O primeiro termo, denominado torque de reação, existe devido à interação entre o sistema magnético produzido pelas correntes dos enrolamentos do estator e o sistema magnético gerado pelos ímãs permanentes. O segundo termo, denominado torque de relutância, aparece devido à saliência dos polos. Em máquinas síncronas de rotor liso este torque é nulo, uma vez que $L_d = L_q$ [28].

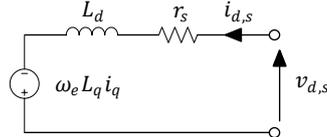


Fig. 7. Circuito equivalente do GSIP (referencial síncrono d).

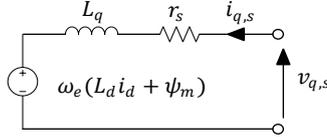


Fig. 8. Circuito equivalente do GSIP (referencial síncrono q).

As potências, ativa (P_e) e reativa (Q_e), bem como a frequência angular elétrica (ω_e) do gerador podem ser obtidas, respectivamente, por:

$$P_e = \left(\frac{3}{2}\right) (v_{q,s} i_{q,s} + v_{d,s} i_{d,s}) \quad (10)$$

$$Q_e = \left(\frac{3}{2}\right) (v_{q,s} i_{d,s} - v_{d,s} i_{q,s}) \quad (11)$$

$$\omega_e = \frac{P}{2} (\omega_g) . \quad (12)$$

Observa-se que ω_e depende do número de polos do gerador (P) e da velocidade de rotação do eixo (ω_g).

C. Modelo Dinâmico do Acoplamento Mecânico (AM)

Uma vez que a topologia do aerogerador adotada dispensa o uso da caixa de engrenagens multiplicadora de velocidade (ver Figura 9), pelo fato do rotor da TE ser acoplado diretamente ao eixo do GSIP, a velocidade de rotação do eixo da turbina (ω_t) e do eixo do gerador (ω_g) são equivalentes em regime permanente, ou seja, $\omega_t = \omega_g$.

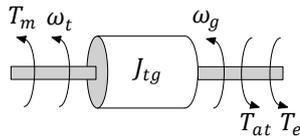


Fig. 9. Modelo dinâmico simplificado do conjunto turbina-gerador.

A grandeza J_{tg} corresponde ao momento de inércia do conjunto turbina-gerador (Kg.m^2) e T_{at} representa torque de atrito de acoplamento dos eixos (N.m), o qual é dado por:

$$T_{at} = B \omega_t \quad (13)$$

onde B é o coeficiente de atrito de acoplamento (N.m.s/rad).

Desta forma, o modelo dinâmico do acoplamento mecânico turbina-gerador é obtido por:

$$J_{tg} \left(\frac{d\omega_t}{dt}\right) = T_m - T_{at} - T_e . \quad (14)$$

D. Modelo Dinâmico do Inversor

Como apresentado na Figura 1, a topologia trifásica do inversor é implementada utilizando três braços inversores e filtros LC em sua saída. A modelagem matemática do inversor no referencial síncrono dq pode ser representada em espaço de estados por:

$$\dot{x}_{ivdq} = A_{dq} x_{ivdq} + B_{dq} u_{dq} + F_{dq} w_{dq} \quad (15)$$

$$\text{onde } A_{dq} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{Lf}}{L_f} & \omega_e & -\frac{1}{L_f} & 0 \\ -\omega_e & -\frac{R_{Lf}}{L_f} & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 & 0 & \omega_e \\ 0 & \frac{1}{C_f} & -\omega_e & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_{dq} = V_{CC} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_f} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; F_{dq} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{C_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix}; x_{ivdq} \text{ é o vetor de}$$

variáveis de estado do sistema; u_{dq} é o vetor das variáveis de entrada e w_{dq} é o vetor de distúrbio.

Tais vetores são definidos por:

$$x_{ivdq} = [i_{Lfd} \ i_{Lfq} \ v_d \ v_q]^T; \quad u_{dq} = [d_d \ d_q]^T; \quad \text{e}$$

$$w_{dq} = [i_{Ld} \ i_{Lq}]^T \text{ onde } i_{Lfd} \text{ e } i_{Lfq} \text{ são as correntes nos indutores } L_f; v_d \text{ e } v_q \text{ são as tensões sobre os capacitores } C_f; d_d \text{ e } d_q \text{ são as razões cíclicas; } i_{Ld} \text{ e } i_{Lq} \text{ são as correntes de carga representadas no referencial síncrono } dq; \text{ e } V_{CC} \text{ corresponde à tensão do barramento CC.}$$

A função de transferência (FT) do inversor é dada por:

$$G_{I_{v dq}}(s) = \frac{v_{dq}(s)}{d_{dq}(s)} = \frac{V_{CC}}{L_f C_f s^2 + R_{Lf} C_f s + 1} . \quad (16)$$

Observa-se que o acoplamento dos estados presentes em A_{dq} foi omitido. Contudo, o acoplamento é considerado na estratégia de controle adotada, como pode ser visto na malha interna de controle de corrente mostrado na Figura 13.

E. Modelo Dinâmico do RTC

O RTC é composto por três braços inversores conectados à rede elétrica por meio de filtros indutivos. Seu modelo em espaço de estados no referencial síncrono dq é dado por:

$$\dot{x}_{Rdq} = A_{Rdq} x_{Rdq} + B_{Rdq} u_{Rdq} + F_{Rdq} w_{Rdq} \quad (17)$$

$$\text{onde } A_{Rdq} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{Lfs}}{L_{fs}} & \omega_{pll} \\ -\omega_{pll} & -\frac{R_{Lfs}}{L_{fs}} \end{bmatrix}; B_{Rdq} = V_{CC} \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{fs}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_{fs}} \end{bmatrix};$$

$$F_{Rdq} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{fs}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{fs}} \end{bmatrix}; x_{Rdq} \text{ é o vetor de variáveis de estado do}$$

sistema; u_{Rdq} é o vetor das variáveis de entrada e w_{Rdq} é o vetor do distúrbio. Tais vetores são definidos por: $x_{Rdq} = [i_{sd} \ i_{sq}]$; $u_{Rdq} = [d_{rd} \ d_{rq}]$; $w_{Rdq} = [v_{sd} \ v_{sq}]$, onde i_{sd} e i_{sq} são as correntes nos indutores L_{fs} , d_{rd} e d_{rq} são as razões cíclicas; e v_{sd} e v_{sq} correspondem às tensões da rede elétrica no referencial dq . Assim, a FT do RTC é dada por:

$$G_{Ri dq}(s) = \frac{i_{sdq}(s)}{d_{rdq}(s)} = \frac{V_{CC}}{L_{fs} s + R_{Lfs}} . \quad (18)$$

Similar ao modelo do inversor, o acoplamento dos estados em A_{Rdq} também foi omitido, no entanto, este foi considerado na estratégia de controle de corrente, conforme observado na Figura 11.

F. Modelo Dinâmico do Barramento CC

O modelo usado para o controle do barramento CC foi apresentado em detalhes em [29], cuja FT é dada por:

$$G_{CC}(s) = \frac{v_{sd}}{C_{CC}V_{CC}s} \quad (19)$$

onde C_{CC} é a capacitância equivalente do barramento.

IV. SISTEMA DE CONTROLE DO EmEE

A. Algoritmo de Geração das Referências de Tensão

A Figura 10 apresenta o algoritmo de geração de referências controle de tensão do inversor. O modelo dinâmico da TE fornece ao modelo do AM, o torque mecânico (T_m) a ser aplicado ao eixo do rotor da TE, para uma dada velocidade do vento (V_v). Já o modelo dinâmico do GSIP fornece ao modelo do AM o torque eletromagnético (T_e) produzido pelas correntes no estator do GSIP.

Conhecido $\omega_g = \omega_t$, o modelo dinâmico do GSIP fornece a informação da posição angular elétrica (θ_e), da frequência angular elétrica (ω_e) e das tensões estatóricas (v_d^* , v_q^*) no referencial dq do eixo do rotor do gerador, sendo estes os parâmetros de saída do AGR. As tensões de referência do controlador de tensão de saída do EmEE (v_d^* e v_q^*) são sintetizadas pelo inversor trifásico. Já a posição angular elétrica (θ_e) do eixo do rotor do GSIP é utilizada na transformação das grandezas do referencial síncrono dq para o referencial estacionário abc , ou vice-versa, a partir da utilização da transformada de Park.

As correntes de carga (i_{Ld} , i_{Lq}) também são grandezas de entrada do AGR, pois a interação destas com o fluxo magnético dos ímãs permanentes produz o T_e do GSIP, que se opõe ao sentido do T_m oriundo do modelo da TE, causando alterações dinâmicas na velocidade de rotação do sistema quando submetido a degraus de carga.

As inércias das massas da TE e do GSIP também são levadas em consideração no desenvolvimento do AGR, a fim de que o EmEE reproduza o comportamento dinâmico da velocidade de rotação do eixo do aerogerador.

B. Malha de Controle de Corrente do RTC

A Figura 11 mostra o diagrama em blocos da malha de controle de corrente do RTC no referencial síncrono dq , onde K_{PRi} e K_{IRi} representam os respectivos ganhos proporcional e integral do controlador de corrente (PI_R) do RTC. O ganho $K_{PWM} = 1/P_{PWM}$ é o ganho estático do modulador PWM do RTC [30], ao passo que P_{PWM} corresponde ao valor de pico da portadora triangular do modulador no DSC. Já ω_{pll} é a frequência angular fundamental da rede elétrica detectada pelo sistema PLL.

O desempenho do controlador PI_R é melhorado pelo uso do controlador ressonante R [31], cuja sua FT é dada por:

$$G_{R6}(s) = \frac{sK_6}{s^2 + (6\omega_0)^2} \quad (20)$$

onde K_6 é o ganho do na frequência específica $6\omega_0$, sendo ω_0 a frequência angular fundamental da tensão da rede elétrica. Assim, o controlador ressonante é sintonizado em 360Hz para atenuar as componentes harmônicas no referencial abc de 5° e 7° ordens, transformadas em 6° ordem no referencial dq . A partir da Figura 11 as FTs em malha aberta de cada uma das coordenadas de corrente são dadas por:

$$G_{MARi_{dq}}(s) = \frac{((K_{PRi} + K_6)s^2 + (K_{IRi} + 6\omega_0 K_{PRi})s + 6K_{IRi}\omega_0)K_{PWM}V_{CC}}{L_{fs}s^3 + (R_{Lfs} + 6L_{fs}\omega_0)s^2 + 6R_{Lfs}\omega_0s} \quad (21)$$

C. Malha de Controle de Tensão do RTC

O diagrama em blocos na malha de controle da tensão do barramento CC é apresenta na Figura 12, o qual, operando em conjunto com as malhas de corrente do RTC, é responsável em manter regulada a tensão do barramento. Por meio de i_{cc} (ver Figura 6), esta malha deve ter uma ação de controle lenta ao atuar no controle das amplitudes das correntes de referência do RTC, de modo a manter o balanço de potência do sistema. A FT em malha aberta do diagrama da Figura 12 é dada por:

$$G_{MAV_{CC}}(s) = \frac{KPV_{CC}v_{sd}s + KIV_{CC}v_{sd}}{C_{CC}V_{CC}s^2} \quad (22)$$

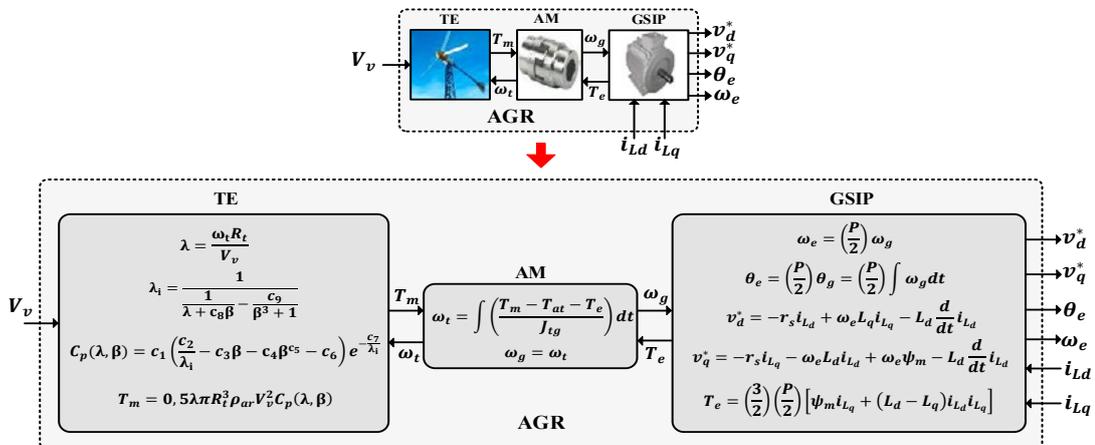


Fig. 10. Diagrama do algoritmo para a geração das tensões de referência do inversor trifásico.

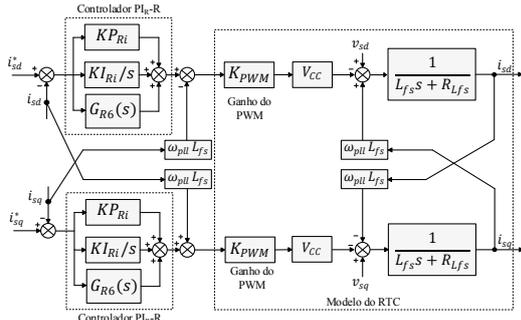


Fig. 11. Diagrama em blocos da malha de controle da corrente do RTC no referencial síncrono dq .

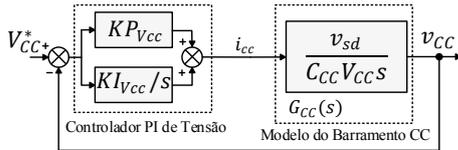


Fig. 12. Diagrama em blocos da malha de controle da tensão CC.

D. Malhas de Controle de Tensão do Inversor

A Figura 13 apresenta o diagrama em blocos das malhas de controle de tensão do inversor no referencial dq . Por meio de um controlador proporcional (KP_{Ii}), a malha interna atua no controle da corrente do indutor de filtragem L_f enquanto a malha externa atua no controle das tensões de saída. Nesta malha externa o controlador PI é utilizado, onde KP_{Iv} e KI_{Iv} são seus respectivos ganhos proporcional e integral. As correntes i_{Ld} e i_{Lq} são os distúrbios do sistema, enquanto ω_e é a frequência angular calculada pelo AGR (ver Figura 6).

Pela Figura 13, a FT de malha aberta da malha interna das correntes dos indutores L_{fabc} e a FT que relaciona as tensões de saída $v_{dq}(s)$ e $i_{Lfdq}^*(s)$ são, respectivamente, dadas por:

$$G_{MAIidq}(s) = \frac{KP_{Ii}KP_{PWM}V_{CC}}{L_f s + R_{L_f}} \quad (23)$$

$$G_{Ividq}(s) = \frac{v_{dq}(s)}{i_{Lfdq}^*(s)} = \frac{KP_{Ii}KP_{PWM}V_{CC}}{L_f C_f s^2 + (R_{L_f} + KP_{Ii}KP_{PWM}V_{CC})C_f s + 1} \quad (24)$$

Finalmente, a FT de malha aberta da malha externa de controle das tensões de saída do inversor é dada por:

$$G_{MAIvdq}(s) = G_{PIv}(s)G_{Ividq}(s) = \frac{(KP_{Iv}s + KI_{Iv})K}{L_f C_f s^3 + (R_{L_f} + K)C_f s^2 + s} \quad (25)$$

onde $K = KP_{Ii}KP_{PWM}V_{CC}$.

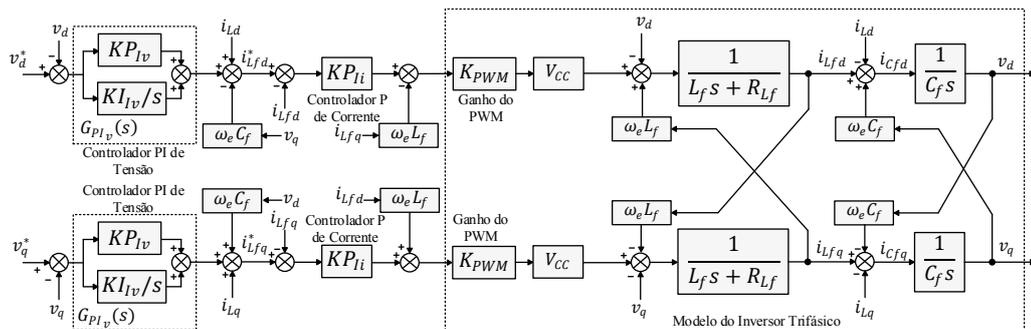


Fig. 13. Diagrama das malhas de controle do inversor (referencial dq).

O protótipo experimental do EmEE mostrado na Figura 14 foi construído baseado no esquema apresentado na Figura 1. Nos conversores foram usados módulos IGBT (SKM100GB 12T4 - *Semikron*). Os algoritmos do AGR e do PLL, assim como os controladores foram embarcados no DSC TMS320F28335 (*Texas Instruments*). As tensões e correntes de linha de saída do EmEE foram medidas pelo wattímetro WT3000 (*Yokogawa*), já as tensões e correntes da rede foram coletadas pelo osciloscópio digital TPS2024 (*Tektronix*). O FP (PF – *Power Factor*) e distorção harmônica total (THD – *Total Harmonic Distortion*) foram medidas pelo analisador de qualidade de energia 43B (*Fluke*).

A Tabela I mostra os parâmetros do protótipo, enquanto na Tabela II estão relacionadas as especificações de projeto dos controladores e seus respectivos ganhos, os quais foram obtidos pela metodologia de projeto apresentada em [32]. A Tabela III apresenta os parâmetros referentes ao aerogerador comercial utilizado no desenvolvimento deste trabalho, os quais foram obtidos via catálogo do fabricante. Já na Tabela IV estão apresentadas as cargas lineares e não lineares utilizadas nos ensaios experimentais.

Operando a vazio e submetido a degraus de carga, a Figura 15 mostra as tensões de linha (v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}) e correntes de fase (i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc}) na saída do EmEE operando com velocidade nominal do vento $V_v = 12,5$ m/s. Verifica-se que, perante variações de carga, a amplitude e a frequência das tensões sintetizadas pelo EmEE variam devido as alterações do torque eletromagnético produzido pelo modelo do GSIP e, portanto, pela velocidade de rotação do seu eixo.

A Figura 16 mostra os comportamentos dinâmicos das tensões de linha e correntes de fase, mostrados por meio de seus valores eficazes (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}) e (I_{La}, I_{Lb}, I_{Lc}), respectivamente, e pela frequência (F_e) das tensões de saída, com o EmEE operando a vazio e submetido a degraus de carga. É possível verificar um tempo de estabelecimento das grandezas medidas em cada degrau de carga, o qual se deve ao momento de inércia do aerogerador emulado.

Assim, ao ser submetido a um degrau de carga, o EmEE leva um certo tempo até atingir um novo ponto de operação. Além disso, é possível verificar um transitório elevado de corrente em cada degrau de carga, pois, em função da inércia, as tensões de saída não se reestabelecem na mesma velocidade das correntes drenadas.

TABELA I

Parâmetros dos Conversores RTC e Inversor

| | |
|---|----------------------------|
| Frequência de chaveamento do inversor e RTC | $f_{chI} = 20 \text{ kHz}$ |
| Indutância de filtragem do inversor | $L_f = 1,5 \text{ mH}$ |
| Resistência interna do indutor de filtragem do inversor | $R_{Lf} = 0,22 \Omega$ |
| Capacitância de filtragem do inversor | $C_f = 60 \mu\text{F}$ |
| Frequência de chaveamento do RTC | $f_{chR} = 20 \text{ kHz}$ |
| Indutância de filtragem do RTC | $L_{fS} = 1,5 \text{ mH}$ |
| Resistência interna do indutor de filtragem do RTC | $R_{LfS} = 0,22 \Omega$ |
| Capacitância do barramento CC | $C_{CC} = 9,4 \text{ mF}$ |
| Tensão do barramento CC | $V_{CC} = 530 \text{ V}$ |
| Pico da triangular do modulador PWM | $P_{PWM} = 3750$ |
| Taxa de amostragem do DSC | $T_a = 40 \text{ kHz}$ |

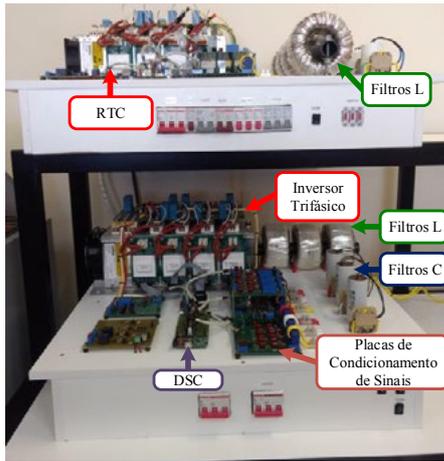


Fig. 14. Protótipo: RTC (parte superior) e o inversor (parte inferior).

A Figura 17 apresenta o comportamento dinâmico da potência elétrica do EmEE quando submetido a degraus de carga. Observa-se que o transitório de potência a cada degrau de carga tem o mesmo perfil das correntes drenadas pelas cargas (ver Figura 16). A potência ativa máxima consumida pelas cargas foi de 4800 W.

A Figura 18 apresenta as grandezas de tensões eficazes de linha, correntes eficazes de fase e frequência (F_e) de saída do EmEE, quando conectado à Carga 1 e submetido a variações na velocidade do vento (V_v). Como pode ser notado, com a alteração da velocidade do vento altera-se, conseqüentemente, a velocidade de rotação do eixo da TE. Uma vez que a

amplitude e frequência das tensões estatóricas do GSIP estão diretamente relacionadas com a velocidade de rotação do eixo do gerador, estas grandezas também sofrem alterações.

TABELA II

Especificações de Projeto e Ganhos dos Controladores

| | |
|---|---|
| Ganho do PWM | $K_{PWM} = 5,33 \times 10^{-4}$ |
| Ganhos do controlador PI _R | $K_{P_{Ri}} = 84,30;$ $K_{I_{Ri}} = 3,894 \times 10^5$ |
| Frequência de cruzamento (f_c) do PI _R | $\omega_{c_{Ri}} = 1,5708 \times 10^4 \text{ rad/s}$ |
| Margem de fase do PI _R | $MF_{d_{Ri}} = 89^\circ$ |
| Ganho do controlador ressonante R | $K_g = 7,76685 \times 10^3$ |
| f_c do controlador ressonante R | $\omega_{c_{Rg}} = 8,3776 \times 10^4 \text{ rad/s}$ |
| Ganhos do controlador PI _{Vcc} | $K_{P_{Vcc}} = 1,0244;$ $K_{I_{Vcc}} = 0,2427$ |
| Frequência de ondulação do barramento CC | $f_{ob} = 360 \text{ Hz}$ |
| f_c do PI _{Vcc} | $\omega_{c_{CC}} = 2\pi f_{ob}/50 \text{ rad/s}$ |
| Margem de fase do PI _{Vcc} | $MF_{d_{CC}} = 89,7^\circ$ |
| Ganhos do controlador PI _V | $K_{P_{Vv}} = 0,3016;$ $K_{I_{Vv}} = 7,9376$ |
| f_c do PI _V | $\omega_{c_{Vv}} = 5,0265 \times 10^3 \text{ rad/s}$ |
| Margem de Fase do PI _V | $MF_{d_{Vv}} = 89,7^\circ$ |
| Ganho do controlador PI _{Ii} | $K_{P_{Ii}} = 47,6386$ |
| f_c do PI _{Ii} | $\omega_{c_{Ii}} = 8,976 \times 10^3 \text{ rad/s}$ |

TABELA III

Parâmetros do Aerogerador Comercial

| | |
|---|---------------------------------|
| Diâmetro da hélice | $D_t = 5,55 \text{ m}$ |
| Número de pás | $N_{pt} = 3$ |
| Massa total | $M_{total} = 200 \text{ Kg}$ |
| Momento de inércia do conjunto turbina/gerador | $J_{tg} = 7,219 \text{ Kg.m}^2$ |
| Coefficiente de atrito de acoplamento | $B = 0,001 \text{ N.m.s/rad}$ |
| Velocidade nominal do vento | $V_v = 12,5 \text{ m/s}$ |
| Sistema magnético | Neodímio (ímã permanente) |
| Potência nominal | $P_N = 6 \text{ kW}$ |
| Tensão nominal (ligação em delta) | $V_N = 240 \text{ V}$ |
| Resistência estatórica do GSIP | $R_s = 0,4 \Omega$ |
| Indutância de eixo direto | $L_d = 4,5 \text{ mH}$ |
| Indutância de eixo em quadratura | $L_q = 4,5 \text{ mH}$ |
| Número de polos | $P = 18$ |
| Amplitude do enlace do fluxo dos ímãs permanentes | $\psi_m = 0,85 \text{ Wb}$ |

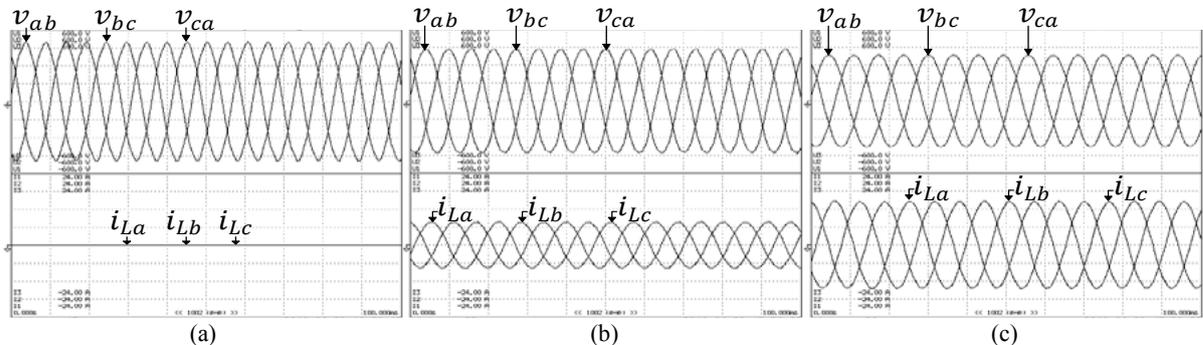


Fig. 15. Tensões de linha (v_{ab} , v_{bc} , v_{ca}) e correntes de linha (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) do EmEE operando com velocidade nominal do vento ($V_v = 12,5 \text{ m/s}$) (150 V/div, 6 A/div, 10 ms/div): (a) em regime permanente operando a vazio, (b) em regime permanente com a Carga 1 e (c) em regime permanente com as Cargas 1 e 2.

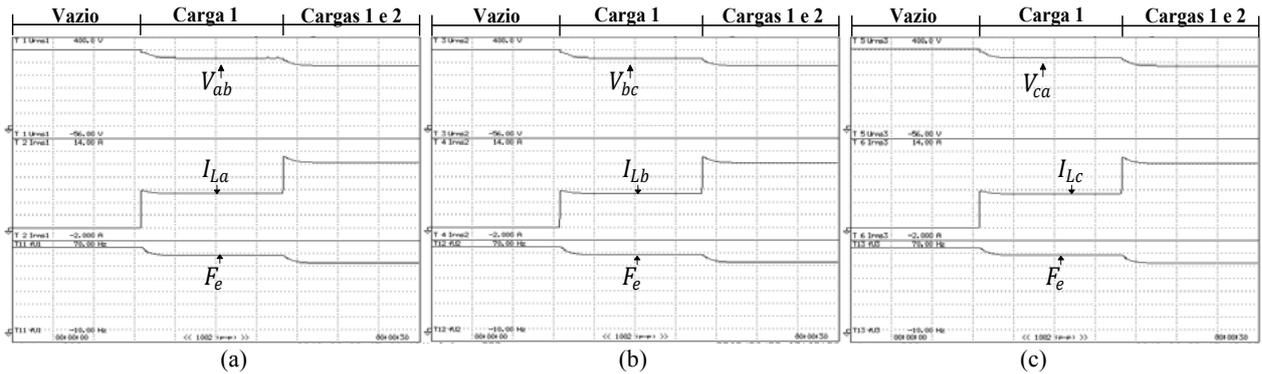


Fig. 16. Comportamento dinâmico do EmEE com degraus de carga (57 V/div, 2 A/div, 10 Hz/div, 3 s/div): (a) tensão eficaz de linha V_{ab} , corrente eficaz de linha I_{La} e frequência F_e ; (b) V_{bc} , I_{Lb} e F_e e (c) V_{ca} , I_{Lc} e F_e .

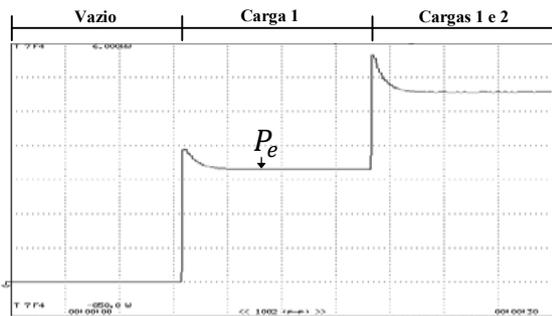


Fig. 17. Comportamento dinâmico da potência elétrica do GSIP (P_e) com degraus de carga (856,25 W/div, 3 s/div).

Observa-se que os comportamentos dinâmicos das correntes de saída do EmEE acompanham a dinâmica das tensões de saída, sendo estas decorrentes da velocidade de rotação do eixo do GSIP.

O EmEE foi também testado considerando um perfil diário de velocidade média do vento [33], ajustado para um intervalo de tempo de 150 s (ver Figura 19). Os testes foram feitos com carga não linear composta por um retificador trifásico a diodos alimentando uma carga L-RC (Carga 3).

A Figura 20 mostra a potência elétrica, a frequência angular elétrica e o torque eletromagnético do GSIP empregando o perfil do vento da Figura 19 e alimentando a Carga 3. Verifica-se que o EmEE reproduz o comportamento do aerogerador, validando a eficácia do EmEE.

A Figura 21 mostra as formas de onda de tensão e corrente de saída do EmEE operando com a Carga 3 e velocidade do vento igual a 12,5 m/s. Neste teste, operando com carga não

linear e drenando uma potência (P_e) de 5 kw, as THDs das tensões do EmEE ficaram em torno de 10,5 %.

TABELA IV
Parâmetros das Cargas

| | |
|--|--|
| Carga 1 (conexão em Y) | $R_1 = 100 \Omega$ |
| Carga 2 (conexão em Δ) | $R_2 = 30 \Omega$ |
| Carga 3 Retificador trifásico seguido por uma carga L-RC | $R = 26 \Omega$; $C = 275 \mu\text{F}$ $L = 1,5\text{mH}$ (indutor de filtragem) |

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o estudo e experimentação de um emulador eólico eletrônico, o qual foi capaz de reproduzir tanto o comportamento estático quanto o dinâmico de um aerogerador real/comercial, representado por meio de modelos matemáticos envolvendo a TE, AM e GSIP. A interação entre os respectivos modelos matemáticos resultou na geração de referências de tensão que, a serem sintetizadas por um inversor trifásico controlado em tensão, permitiu o funcionamento do EmEE para diferentes perfis de velocidade do vento, bem como alimentando a cargas lineares e não lineares. Portanto, foi comprovado experimentalmente que o EmEE desenvolvido representa uma ferramenta de grande importância e utilidade para o desenvolvimento de pesquisas em laboratório envolvendo sistema eólicos. Além disso, ressalta-se a grande versatilidade do EmEE, uma vez que este, com as devidas adequações matemáticas, é capaz de emular diferentes modelos de aerogeradores com diferentes potências nominais.

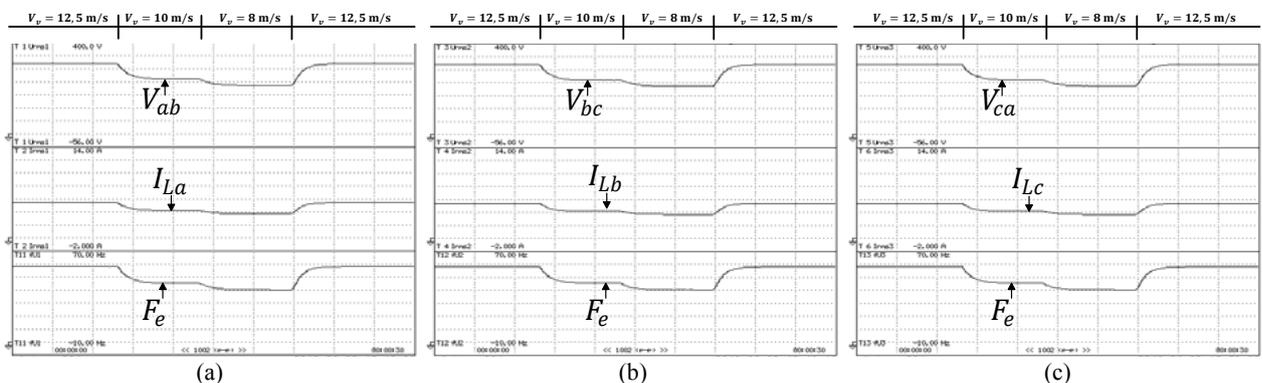


Fig. 18. Comportamento dinâmico do EmEE com variações da velocidade do vento (57 V/div, 2 A/div, 10 Hz/div, 3 s/div): (a) tensão eficaz de linha V_{ab} , corrente eficaz de linha I_{La} e frequência (F_e); (b) V_{bc} , I_{Lb} e F_e e (c) V_{ca} , I_{Lc} e F_e .

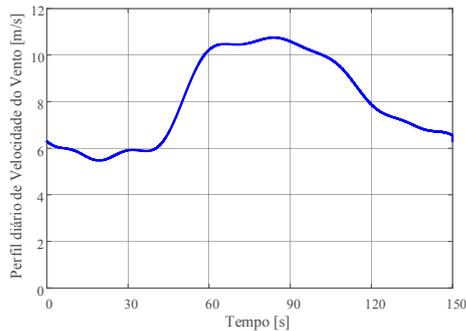


Fig. 19. Perfil diário de velocidade média do vento em escala reduzida de 24h/150s.

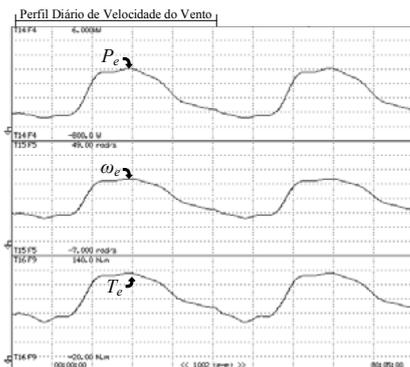


Fig. 20. Potência elétrica (P_e), frequência angular elétrica (ω_e) e torque eletromagnético (T_e) do EmEE/GSIP conectado à Carga 3 (800 W/div, 7 rad.s⁻¹/div, 20 N.m/div, 30 s/div).

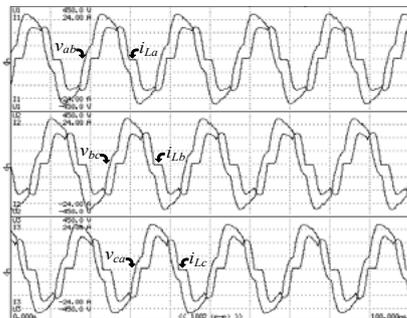


Fig. 21. Tensões de linha (v_{ab} , v_{bc} , v_{ca}) e correntes de fase (i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc}) do EmEE operando com velocidade do vento $V_v = 12,5$ m/s e carga não linear (450 V/div, 24 A/div, 10 ms/div).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido do CNPq (Processo 303359/2018-8) e (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

[1] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, A. V Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, nº 5, pp. 1398-1409, Oct. 2006.

[2] A. Consoli, M. Cacciato, V. Crisafulli, "Power Converters for Photovoltaic Generation Systems in Smart Grid Applications", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 14, nº 4, pp. 251-257, Nov. 2009.

[3] F. Blaabjerg, K. Ma, "Wind Energy Systems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, nº 11, pp. 2116-2131, Nov. 2017.

[4] Devashish, A. Thakur, S. Panigrahi, R. R. Behera, "A Review on Wind Energy Conversion System and Enabling Technology", in *Proc. of ICEPES*, pp. 527-532, 2016.

[5] L. Hirth, S. Müller, "System-Friendly Wind Power: How Advanced Wind Turbine Design Can Increase the Economic Value of Electricity Generated Through Wind Power", *Energy Economics*, vol. 56, pp. 51-63, Mar. 2016.

[6] R. G. de Oliveira, J. L. da Silva, S. R. Silva, B. Rabelo Junior, W. Hofmann, "Desenvolvimento de uma Nova Estratégia de Controle de Potência Reativa em Gerador de Indução de Dupla Alimentação para Turbinas Eólicas", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 13, nº 4, pp. 277-284, Nov. 2008.

[7] L. S. Barros, C. M. V. Barros, "Modificação no Controle do Lado da Rede de Geradores Eólicos Baseados em PMSG para Ampliar a Suportabilidade a Afundamentos de Tensão", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 22, nº 2, pp. 167-178, Jun. 2017.

[8] H. Li, Z. Chen, "Overview of Different Wind Generator Systems and their Comparisons", *IET Renewable Power Generator*, vol. 2, nº 2, pp. 123-138, June 2008.

[9] F. Blaabjerg, K. Ma, "Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems", *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, nº 3, pp. 139-152, Sept. 2013.

[10] P. V. Silva, R. F. Pinheiro Filho, A. O. Salazar, L. P. dos Santos Júnior, J. D. Fernandes, "Um Novo Sistema para Controle de Velocidade em Aerogeradores Utilizando o Regulador Eletromagnético de Frequência", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 20, nº 3, pp. 254-262, Ago. 2015.

[11] L. A. Lopes, J. Lhuillier, M. F. Khokhar, A. Mukherjee, "A Wind Turbine Emulator that Represents the Dynamics of the Wind Turbine Rotor and Drive Train", in *Proc. of PESC*, vol. 36, pp. 2092-2097, 2005.

[12] A. J. Sguarezi Filho, A. L. L. F. Murari, C. E. C., J. A. T. Altuna, R. V. Jacomini, "A State Feedback DFIG Power Control for Wind Generation", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 20, nº 2, pp. 151-159, May 2015.

[13] W. Li, D; Xu, W. Zhang, H. Ma, "Research on Wind Turbine Emulation Based on DC Motor", in *Proc. of ICIEA*, vol. 2, pp. 2589-2593, 2007.

[14] L. K. Gan, J. K. H. Shek, M. A. Mueller, "Modeling and Characterization of Downwind Tower Shadow Effects using a Wind Turbine Emulator", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, nº 9, pp. 7087-7097, Sept. 2017.

[15] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J. L. Rodriguez-Amenedo, "Laboratory Set-up for Wind Turbine Emulation", in *Proc. of IEEE ICIT*, vol. 1, pp 553-557, 2004.

[16] T. A. S. Barros, P. S. Nascimento Filho, A. B. Moreira, E. Ruppert Filho, "Algoritmos para Otimização do Desempenho de Geradores a Relutância Variável Aplicados em Geração Eólica", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 21, nº 1, pp. 32-41, Fev. 2016.

- [17] Y. Ma, L. Yang, J. Wang, F. Wang, L. M. Tolbert, “Emulating Full-Converter Wind Turbine by a Single Converter in a Multiple Converter Based Emulation System”, in *Proc. of APEC*, vol. 2014, pp. 3042-3047, 2014.
- [18] L. F. Silva, A. R. Castro, B. W. França, G. F. Gontijo, M. Aredes, P. E. D. Rocha, “Emulador Estático de Sistemas de Geração Renovável Aplicado a Estudos de Conversores Conectados ao Sistema Elétrico”, in *Proc. of CBA*, vol. 2016, pp. 3482- 3487, 2016.
- [19] F. B. Grigoletto, H. Pinheiro, “Arranjo Flexível de Conversores Estáticos para Sistemas de Conversão de Energia Eólica Conectados à Rede”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 18, n° 4, pp. 1245-1256, Nov. 2013.
- [20] D. Kumar, K. Chatterjee, “A Review of Conventional and Advanced MPPT Algorithms for Wind Energy Systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 957-970, Mar. 2016.
- [21] C. M. V. Barros, W. S. Mota, P. R. Barros, L. S. Barros, “MPPT de Sistemas de Conversão de Energia Eólica Baseados em PMSG Usando Controle Preditivo”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 20, n° 4, pp. 364-372, Nov. 2015.
- [22] Z. Chen, J. M. Guerrero, F. Blaabjerg, “A Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, n° 8, pp. 1859-1875, Aug. 2009.
- [23] V. Yaramasu, B. Wu, P. C. Sen, S. Kouro, M. Narimani, “High-Power Wind Energy Conversion Systems: State-of-the-Art and Emerging Technologies”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, n° 5, pp. 740-788, 2015.
- [24] H. W. Kim, S. S. Kim, H. S. Ko, “Modeling and Control of PMSG-Based Variable-Speed Wind Turbine”, *Electric Power Systems Research*, vol. 80, n° 1, pp. 46-52, Jan. 2010.
- [25] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons, 1ª Edição, Nova Jersey, EUA, 1998.
- [26] O. Wasynczuk, P. C. Krause, S. D. Sudhoff, S. D. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, John Wiley & Sons, 3ª Edição, Nova Jersey, EUA, 2002.
- [27] V. D. Bacon, S. A. O. da Silva, “Performance Improvement of a Three-Phase Phase-Locked-Loop Algorithm Under Utility Voltage Disturbances Using Non-Autonomous Adaptive Filters”, *IET Power Electronics*, vol. 8, n° 11, pp. 2237–2250, Nov. 2015.
- [28] A. A. de Oliveira, J. R. B. de A. Monteiro, M. L. Aguiar and D. P. Gonzaga, “Extended DQ Transformation for Vectorial Control Applications of Non-sinusoidal Permanent Magnet AC Machines”, in *Proc. of PESC*, vol. 36, pp. 1807-1812, 2005.
- [29] L. B. G. Campanhol, S. A. O. da Silva, A. Goedtel, “Application of Shunt Active Power Filter for Harmonic Reduction and Reactive Power Compensation in Three-Phase Four-Wire Systems”, *IET Power Electronics*, vol. 7, n° 11, pp. 2825–2836, Nov. 2014.
- [30] S. Buso, P. Mattavelli, *Digital Control in Power Electronics*, Morgan & Claypool, 1ª Edição, San Rafael, USA, 2006.
- [31] D. N. Zmood, D. G. Holmes, G. H. Bode, “Frequency-Domain Analysis of Three-Phase Linear Current Regulators”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, n° 2, pp. 601-610, Mar./Apr. 2001.
- [32] B. A. Angélico, L. B. G. Campanhol, S. A. O. da Silva, “Proportional-Integral/Proportional-Integral-Derivative Tuning Procedure of a Single-Phase Shunt Active Power Filter Using Bode Diagram”, *IET Power Electronics*, vol. 7, n° 10, pp. 2647-2659, Aug. 2014.
- [33] H. N. Camelo, P. C. M. Carvalho, J. B. V. Leal Junior, J. B. P. Accioly Filho, “Análise estatística da velocidade de vento do estado do Ceará”, *Revista Tecnologia*, vol. 29, n° 2, pp. 211-223, Dez. 2008.

BIOGRAFIAS

Danilo Henrique Wollz, é engenheiro eletricitista (2016) e mestre em engenharia elétrica (2018) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Cornélio Procópio (UTFPR-CP). Atualmente desenvolve suas atividades de pesquisa no Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). Suas áreas de interesse englobam sistemas de energia renováveis, qualidade de energia, filtros ativos de potência e ferramentas educacionais aplicadas ao ensino de eletrônica de potência. É membro da SOBRAEP.

Sérgio Augusto Oliveira da Silva, é engenheiro eletricitista (1987) e mestre em engenharia elétrica (1989) pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); e doutor em engenharia elétrica (2001) pela Universidade Federal de Minas Gerais. É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, (UTFPR-CP) desde 1993. É coordenador do Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). Suas áreas de interesse são: sistemas de energia ininterrupta (UPS), condicionadores ativos de energia elétrica, controle empregando DSC, qualidade da energia elétrica, energias renováveis e desenvolvimento de ferramentas educacionais para o ensino de eletrônica de potência. É membro da SOBRAEP e do IEEE.

Leonardo Poltronieri Sampaio, é engenheiro eletricitista (2008), mestre em engenharia elétrica (2010) e doutor em engenharia elétrica (2013) pela Universidade Estadual Paulista, Campus Ilha Solteira (UNESP/IS). É professor do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP) e membro do LEPQER desde 2012. Seus principais interesses são: aproveitamento de energias alternativas e renováveis, aplicações fotovoltaicas, qualidade de energia, modelagem e controle de conversores estáticos empregando DSC, desenvolvimento de ferramentas educacionais e programação em Java e C. É membro da SOBRAEP.