

EMULADOR ELETRÔNICO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA BASEADO NO GSP INTERLIGADO À REDE ELÉTRICA TRIFÁSICA

Gabriel R. Previero, Sérgio A. O. da Silva, Leonardo P. Sampaio, Danilo H. Wollz

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio-PR, Brasil

e-mail: gabriel-previero@hotmail.com, augus@utfpr.edu.br, sampaio@utfpr.edu.br, danilo_wollz@hotmail.com

Resumo – Este trabalho apresenta um emulador eletrônico de um sistema de geração eólica (EE-SGE), fundamentado em modelos matemáticos de um aerogerador (MMA) composto virtualmente pela associação de uma turbina eólica e um gerador síncrono de ímã permanente. Referências de controle, proporcionais à potência elétrica gerada pelos MMA, são calculadas em um sistema de geração de referências (SGR) e usadas para controlar o estágio de entrada de um conversor *back-to-back* composto por um retificador controlado isolado e um inversor de tensão, ambos conectados à rede elétrica e compartilhando o mesmo barramento CC. O retificador controlado é responsável por drenar da rede elétrica correntes senoidais, cujas amplitudes são proporcionais à potência definida pelo SGR. Já o inversor de tensão, controlado em corrente, além de controlar a tensão do barramento CC, injeta na rede elétrica correntes senoidais. No SGR, é também realizado o rastreamento do ponto de máxima potência, de forma a otimizar o desempenho do sistema eólico virtual. Adicionalmente, no referencial síncrono *d-q*, são apresentadas as funções de transferências dos conversores de potência, bem como do controle de tensão do barramento CC. Para validação do EE-SGE proposto, resultados de simulações e experimentais são apresentados, buscando demonstrar e avaliar seus comportamentos estáticos e dinâmicos.

Palavras-Chave – Emulador Eólico Eletrônico, Sistema de Geração Eólica Virtual, Turbina Eólica.

WIND GENERATION SYSTEM ELECTRONIC EMULATOR BASED ON PMSG CONNECTED TO THE THREE- PHASE UTILITY GRID

Abstract – This work presents an electronic emulator of a wind generation system (EE-WGS) based on the wind turbine mathematical models (WTMM) virtually composed of the association of a wind turbine and a permanent magnet synchronous generator. Control references, proportional to the electrical power generated by the MMA, are calculated in a reference generation system (RGS) and used to control the input stage of the back-to-back converter composed of an isolated controlled

rectifier and an inverter voltage, both connected to the power grid and sharing the same DC bus. The controlled rectifier drains sinusoidal currents from the utility grid, whose amplitudes are proportional to the power defined by the RGS. The voltage source inverter, controlled in current, controls the voltage of the DC-bus, in addition to injecting sinusoidal currents into the grid. In the RGS, the maximum power point tracking is also carried out to optimize the performance of the virtual eolic system. Additionally, in the *d-q* synchronous reference, the transfer functions of the power converters are presented, as well as the DC-link voltage control. Simulation and experimental results are presented to validate the proposed EE-WGS, seeking to demonstrate and evaluate their static and dynamic behaviors.

Keywords – Eolic Electronic Emulator, Virtual Wind Generation System, Wind Turbine.

I. INTRODUÇÃO

Em virtude dos eminentes impactos causados ao meio ambiente, bem como da escassez cada vez maior das fontes não renováveis e poluentes para a geração de energia, tem-se aumentado, no cenário energético mundial, a necessidade do uso de fontes alternativas e renováveis de energia. Portanto, diversos países passaram a priorizar o uso de fontes de energias renováveis (FER) para a produção de energia elétrica, as quais minimizam a agressão ao meio ambiente, diferentemente do que acontece quando combustíveis fósseis são empregados para esta finalidade [1]. Dentre as diversas FER existentes, a eólica se destaca no cenário mundial [2].

Portanto, em aplicações de FER envolvendo a geração de energia elétrica a partir da energia cinética dos ventos, o desempenho do sistema eólico pode ser diretamente afetado pelas condições meteorológicas, as quais, neste caso, podem ser exemplificadas pela variação da direção e da velocidade dos ventos [3]. Sendo assim, estudos baseados na forma de integração das turbinas eólicas com as máquinas elétricas e conversores estáticos de potência vêm sendo realizados [4], com o intuito de possibilitar ao sistema eólico atuar em diversas faixas de operação determinadas pelas condições climáticas, mantendo sempre um desempenho satisfatório. Como consequência, as áreas de eletrônica de potência e máquinas elétricas, se tornaram fundamentais para o

desenvolvimento de várias configurações de aerogeradores comerciais [5],[6].

Tendo como base a ascensão contínua do uso da energia eólica e seu destaque no cenário mundial, estudos e pesquisas acerca desta fonte de energia se tornaram mais importantes para a análise dos comportamentos estáticos e dinâmicos de aerogeradores existentes, ou mesmo em desenvolvimento.

Portanto, estratégias para emular os comportamentos estáticos e dinâmicos destes sistemas se tornaram essenciais, pois agrega vantagens de não se utilizar volumosas turbinas, bem como por não estar submetido às intermitências associadas às condições climáticas. Desta forma, equipamentos destinados a emular em laboratório a operação de aerogeradores reais têm sido propostos na literatura [7]-[15], os quais podem ou não fazer uso de modelos matemáticos que descrevem os componentes que compõem um sistema de geração eólica (SGE), tais como a turbina eólica (TE), acoplamentos mecânicos, geradores, conversores estáticos, dentre outros. Grande parte destes emuladores se baseiam na utilização de máquinas elétricas rotativas para a representação do comportamento de torque, o qual seria proporcionado por uma TE em um sistema real.

A configuração mais comum de emuladores eólicos conta com a utilização do motor de corrente contínua em sua estrutura [7]-[9]. Por outro lado, com a finalidade de reduzir custo e volume associados às máquinas CC, máquinas CA, como o motor de indução trifásico, surgem como uma opção de uso em substituição ao motor CC [10],[11].

Algumas configurações e estratégias de emuladores de aerogeradores têm sido propostas na literatura utilizando a máquina CC virtual em suas estruturas [12], [13]. Em [12] foi apresentado a modelagem para simulação de um emulador de TEs, cujas características das mesmas são emuladas por meio de uma máquina CC. No entanto, não foram apresentados testes experimentais e a conexão com a rede elétrica não foi considerada. Em [13], sem testes experimentais e também baseado em uma máquina CC, foi proposto um emulador de TEs capaz de simular suas curvas de potência, sem a necessidade de se utilizar um sistema de controle em malha fechada. Apesar da simplicidade envolvendo a proposta, a curva de potência gerada não garante com exatidão, a representação de um modelo real de um aerogerador. Além disso, o sistema proposto não foi testado em uma configuração de um SGE conectado à rede elétrica.

Na busca de redução de custos associados à utilização de máquinas rotativas físicas na emulação de sistemas eólicos, em [14] é apresentado e testado experimentalmente um emulador eletrônico (EE), com o qual foi possível avaliar os comportamentos estáticos e dinâmicos de um aerogerador envolvendo o gerador síncrono de ímã permanente (GSIP). No entanto, a conexão com a rede elétrica, caracterizado por um SGE completo, não foi abordado. Com o intuito de testar, em tempo real, as interações entre aerogeradores e a rede elétrica, em [15] é proposto um EE de um SGE completo, tendo como base o GSIP. Nesta proposta, além dos modelos da TE e do GSIP, fez-se necessário o uso de um modelo matemático virtual do conversor *back-to-back* conectado ao GSIP. Percebe-se ainda que o conversor *back-to-back* virtual necessita de informações relativas à rede elétrica.

No presente trabalho é proposto um EE de um SGE,

denominado EE-SGE. Uma vez que não são empregados máquinas rotativas em sua concepção, o EE-SGE é embasado no uso de equações matemáticas que modelam a TE, acoplamentos mecânicos e o GSIP. Diferentemente da estratégia empregada em [15], onde o modelo do conversor *back-to-back* é conectado ao GSIP virtual, neste trabalho é adotado apenas o modelo de um retificador trifásico controlado (RTCcm) virtual conectado ao modelo do GSIP, o qual drena a energia gerada pelo conjunto TE-GSIP. Assim, além de não ser necessária informações da rede elétrica para o sistema virtual operar, o sistema proposto possui uma dinâmica mais rápida, pois a influência da dinâmica do conversor *back-to-back* apresentado em [15] é suprimida.

Como maior contribuição, o EE proposto tem indicativos para se tornar uma ferramenta educacional promissora para estudos de SGE, tendo como destaque o acesso a uma vasta gama de grandezas elétricas e mecânicas possíveis de serem coletadas experimentalmente e visualizadas. A versatilidade do sistema permite o uso de diferentes modelos e tipos de TEs, além do acesso às grandezas elétricas e mecânicas envolvidas, as quais dão o suporte para análises em regimes estacionários e transitórios, sob a ação de perfis do ventos variados.

II. DESCRIÇÃO DO EE-SGE PROPOSTO

A Figura 1 apresenta o diagrama que representa o EE-SGE proposto. A configuração de potência e controle do EE é composta por dois elementos, como segue: 1) sistema gerador de referências (SGR), todo implementado virtualmente em um controlador digital de sinais (DSC, do inglês *Digital Signal Controller*). O SGR é responsável por gerar referências de controle para o estágio retificador do conversor *back-to-back* que é implementado fisicamente; e 2) conversor *back-to-back*, formado por um retificador trifásico controlado (RTCcr) e um inversor de tensão controlado em corrente, ambos conectados à rede elétrica e controlados por um DSC adicional.

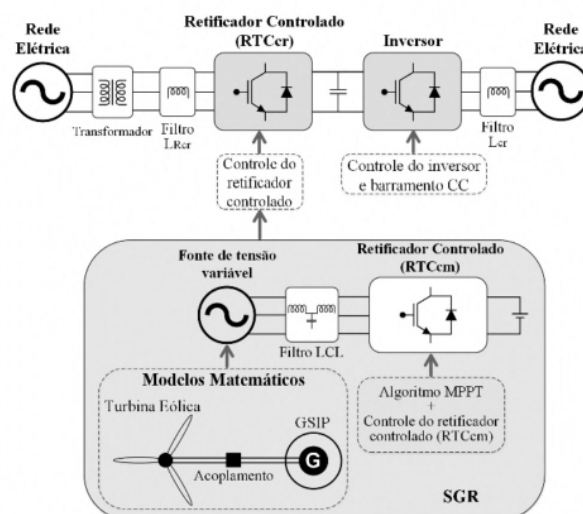


Fig. 1. Estrutura simplificada do EE-SGE proposto.

A. Sistema de Geração de Referências (SGR)

Toda a modelagem matemática do sistema responsável pela geração das referências de controle do conversor *back-to-back* é embarcada em um DSC. As referidas modelagens embarcadas neste DSC envolvem a TE, acoplamento

mecânico turbina-gerador, GSIP, modelo e controle do retificador controlado trifásico virtual conectado à máquina (RTCCm), onde a referida máquina (GSIP) é representada por uma fonte de tensão variável (ver Figura 1). Adicionalmente, está também embarcado no DSC o algoritmo de MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*), implementado pela técnica Perturba e Observa (P&O) [16].

Através das equações envolvidas na modelagem, discutidos na Seção III, o EE é capaz de representar virtualmente os comportamentos dinâmicos e estacionários de um conjunto aerogerador (TE-GSIP). Embarcados no DSC também estão inseridas as equações que retratam o comportamento do RTCCm empregado como carga virtual do aerogerador, bem como sua estrutura de controle. O algoritmo de MPPT, por sua vez, controla indiretamente a velocidade de rotação do gerador, através do controle de torque sobre seu eixo, fazendo com que o conjunto sempre atue no ponto ideal de trabalho, ou seja no MPP. O controle do torque do gerador virtual (GSIP), o qual é determinado pelo algoritmo de MPPT, é realizado através do controle de um sistema multimalhas que controla o RTCCm. Maiores detalhes do SGR são tratados na Seção IV.

B. Conversor Back-to-Back

Em um segundo DSC são embarcados os controles dos conversores físicos de potência do EE-SGE (ver na Figura 1 RTCCr e Inversor), assim como o algoritmo de detecção de ângulo de fase (PLL do inglês *Phase-Locked Loop*). O conversor *back-to-back* é o responsável por emular as dinâmicas do aerogerador em estudo, cuja referência de controle de corrente, no referencial síncrono, provém do SGR.

Uma vez definida pelo SGR a referência de corrente no referencial *d-q*, a qual é proporcional à potência gerada matematicamente pelo grupo TE-GSIP inserido no SGR, cabe ao retificador trifásico controlado físico conectado à rede elétrica (RTCCr) a tarefa de drenar tal potência. Uma vez que o barramento CC é compartilhado com o inversor, cabe a este conversor a tarefa de regular a tensão do barramento CC de forma a estabelecer o balanço de potência do sistema, bem como injetar na rede elétrica a energia drenada pelo RTCCr.

Percebe-se que o EE-SGE proposto é capaz de emular um sistema eólico completo mostrado na Figura 2, utilizando-se apenas do conversor *back-to-back* implementado fisicamente.

III. MODELAGEM DOS COMPONENTES E CONVERSORES DO EE-SGE

Nesta Seção são apresentadas as modelagens associadas aos componentes que compõem o EE-SGE proposto neste trabalho, tendo como base topologia usual de um SGE de velocidade variável baseado no GSIP observado na Figura 2.

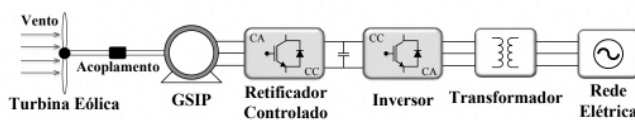


Fig. 2. Topologia convencional de um SGE equipado com o GSIP.

A. Turbina Eólica

A TE é responsável pela transformação da energia cinética dos ventos em energia mecânica rotacional, que posteriormente, com o acoplamento a um gerador, poderá ser transformada em energia elétrica. A potência mecânica de uma turbina eólica (P_m) e a relação linear de velocidade da turbina (λ) podem ser obtidas, respectivamente, por [17-21]:

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

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

onde R_t é o raio da turbina (m); ρ_{ar} representa 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_m é a velocidade mecânica de rotação do eixo da turbina (rad/s).

O conjugado mecânico no eixo da turbina é definido por:

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

Substituindo (1) e (2) em (3), encontra-se:

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

O coeficiente $C_p(\lambda, \beta)$ indica a eficiência com que a TE transforma a energia cinética do vento em energia mecânica. Este coeficiente depende do ângulo de passo das hélices da turbina (β), assim como da relação linear entre a velocidade do vento e a velocidade da ponta da hélice da turbina (λ_i). Assim, $C_p(\lambda, \beta)$ e λ_i são dados, respectivamente, por:

$$C_p(\lambda, \beta) = k_1 \left(\frac{k_2}{\lambda_i} - k_3 \beta - k_4 \beta^{k_5} - k_6 \right) e^{-\frac{k_7}{\lambda_i}} \quad (5)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + k_8 \beta} - \frac{k_9}{\beta^{3+1}}} \quad (6)$$

onde k_1 a k_9 são descritos em [17]. Neste trabalho é utilizada uma turbina comercial do tipo horizontal de três pás de 6,0 kW de potência nominal. Neste trabalho, os parâmetros k_1 a k_9 foram ajustados empiricamente com base na curva de potência do fabricante (ver Tabela I). ângulo de passo das hélices da turbina (β) adotado neste trabalho foi igual a zero.

B. GSIP

Os comportamentos elétricos e eletromecânicos das máquinas síncronas, mais precisamente do GSIP, podem ser compreendidos por equações matemáticas através de sua modelagem dinâmica baseada no referencial síncrono *dq* [17-21]. Portanto, as tensões estatóricas nos eixos *dq* ($v_{d,s}$ e $v_{q,s}$), podem ser representadas, respectivamente, por:

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

onde r_s é a resistência do estator; $i_{q,s}$ e $i_{d,s}$ são as correntes estatóricas no referencial *d-q*, respectivamente; L_d é indutância estatórica do eixo direto e L_q a indutância estatórica

do eixo em quadratura; ω_e é a frequência angular elétrica de rotação da máquina e ψ_m é a amplitude do enlace de fluxo dos ímãs visto pelos enrolamentos do estator a vazio.

No referencial síncrono, o torque eletromagnético (T_e), a potência ativa (P_e), a potência reativa (Q_e) e a frequência angular elétrica (ω_e) são dadas, respectivamente, por:

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

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

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

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

onde P é o número de polos do gerador e ω_g é a velocidade de rotação do eixo da máquina.

C. Acoplamento Mecânico

O modelo do acoplamento mecânico entre turbina e gerador, pode ser representado como segue:

$$J_{ag} \left(\frac{d\omega_m}{dt}\right) = T_m - T_a - T_e \quad (13)$$

onde J_{ag} é o momento de inércia do aerogerador (Kg.m^2) e T_a é o torque gerado pelo atrito de acoplamento (N.m). Cabe ressaltar que, como não foi considerada a presença de uma caixa de engrenagens, a velocidade de rotação de TE (ω_m) é igual à velocidade de rotação do eixo do GSIP virtual (ω_g).

D. Retificador Trifásico Controlado Conectado à Máquina

A modelagem em espaço de estados do RTC virtual conectado à máquina (RTCcm) está baseado no esquema mostrado na Figura 3 e pode ser representado por (14). O modelo é composto pelo vetor das variáveis de estado (x_{RCdq}); vetor de derivada dessas variáveis (\dot{x}_{RCdq}); vetor das variáveis de entrada (u_{RCdq}); e o vetor de distúrbios (w_{RCdq}).

$$\dot{x}_{RCdq} = A_{RCdq} x_{RCdq} + B_{RCdq} u_{RCdq} + F_{RCdq} w_{RCdq} \quad (14)$$

onde:

$$\dot{x}_{RCdq} = \left[\frac{d\hat{i}_{Lmd}}{dt} \quad \frac{d\hat{i}_{Lmq}}{dt} \quad \frac{d\hat{i}_{LCmd}}{dt} \quad \frac{d\hat{i}_{LCmq}}{dt} \quad \frac{d\hat{v}_{CCmd}}{dt} \quad \frac{d\hat{v}_{CCmq}}{dt} \right]^T;$$

$$x_{RCdq} = [\hat{i}_{Lmd} \quad \hat{i}_{Lmq} \quad \hat{i}_{LCmd} \quad \hat{i}_{LCmq} \quad \hat{v}_{CCmd} \quad \hat{v}_{CCmq}]^T;$$

$$u_{RCdq} = [\hat{d}_{dRcm} \quad \hat{d}_{qRcm}]^T; w_{RCdq} = [\hat{v}_{md} \quad \hat{v}_{mq}]^T;$$

$$A_{RCdq} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_m & 0 & 0 & -\frac{1}{L_m} & 0 \\ -\omega_m & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_m} \\ 0 & 0 & 0 & \omega_m & \frac{1}{L_{cm}} & 0 \\ 0 & 0 & -\omega_m & 0 & 0 & \frac{1}{L_{cm}} \\ \frac{1}{C_{cm}} & 0 & -\frac{1}{C_{cm}} & 0 & 0 & \omega_m \\ 0 & \frac{1}{C_{cm}} & 0 & -\frac{1}{C_{cm}} & -\omega_m & 0 \end{bmatrix};$$

$$B_{RCdq} = V_{CC} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{1}{L_{cm}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_{cm}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; F_{RCdq} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{cm}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{cm}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

No referencial síncrono $d-q$, v_{cmdq} representa as tensões lidas nos capacitores de filtragem C_{cm} ; i_{Lmdq} e i_{LCmdq} são as correntes lidas nos indutores de filtragens L_m e L_{cm} , respectivamente; d_{dqRcm} representa as razões cíclicas do retificador; e V_{CC} é a tensão do barramento CC.

Para a obtenção das funções de transferências (FT) são desconsiderados os distúrbios do sistema, bem como o acoplamento cruzado entre os estados, os quais são inseridos posteriormente no diagrama de controle do conversor. Além disso, a variação de pequenos sinais das correntes no filtro L_m é desprezada, uma vez que esta não é considerada uma variável de controle. Este filtro indutivo é inserido apenas para a função de acoplamento, de modo a possibilitar o cálculo das correntes que circulam entre o GSIP e os filtros capacitivos. Desta forma, As FTs de tensão do RTCcm, bem como da malha interna de corrente são dadas por:

$$G_{vi,dq_{Rcm}}(s) = \frac{\hat{v}_{CCmdq}(s)}{\hat{i}_{LCmdq}(s)} = -\frac{1}{C_{cm}s} \quad (15)$$

$$G_{id,dq_{Rcm}}(s) = \frac{\hat{i}_{LCmdq}(s)}{\hat{d}_{dqRcm}(s)} = -\frac{V_{CC}C_{cm}s}{L_{cm}C_{cm}s^2+1} \quad (16)$$

E. Conversor Back-to-Back (RTCcr e Inversor)

1) *Inversor de tensão conectado à rede*: O inversor trifásico (estágio de saída), é representado em espaço de estados por (17), onde x_{ivdq} é o vetor das variáveis de estado; \dot{x}_{ivdq} é o vetor diferencial; u_{ivdq} é o vetor das variáveis de entrada e w_{ivdq} é o vetor de distúrbios.

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

$$\text{onde } \dot{x}_{ivdq} = \left[\frac{d\hat{i}_{Lcrd}}{dt} \quad \frac{d\hat{i}_{Lcrq}}{dt} \right]^T; x_{ivdq} = [\hat{i}_{Lcrd} \quad \hat{i}_{Lcrq}]^T;$$

$$u_{ivdq} = [\hat{d}_{id} \quad \hat{d}_{iq}]^T; w_{ivdq} = [\hat{v}_{sd} \quad \hat{v}_{sq}]^T;$$

$$A_{ivdq} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{Lcr}}{L_{cr}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{Lcr}}{L_{cr}} \end{bmatrix}; B_{ivdq} = V_{CC} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{cr}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{cr}} \end{bmatrix};$$

$$F_{ivdq} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_{cr}} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_{cr}} \end{bmatrix}.$$

No referencial $d-q$, as grandezas i_{Lcrdq} representam as correntes lidas nos filtros indutivos de saída L_{cr} (ver Figura 1); d_{idq} representa as razões cíclicas do inversor; v_{sdq} as tensões da rede; e R_{Lcr} é a resistência interna associada aos indutores de filtragem L_{cr} .

A FT da malha de corrente do inversor no referencial

síncronos dq é dada por:

$$G_{id,dq_{inv}}(s) = \frac{i_{L_{Rcr}dq}(s)}{d_{idq}(s)} = \frac{V_{CC}}{L_{Rcr}s + R_{Lcr}} \quad (18)$$

2) *Retificador trifásico conectado à rede (RTCcr):* Analogamente, a FT do RTCcr, responsável por drenar as correntes da rede elétrica, é dada por:

$$G_{id,dq_{RCr}}(s) = \frac{i_{L_{Rcr}dq}(s)}{d_{dqRCr}(s)} = \frac{V_{CC}}{L_{Rcr}s + R_{Lcr}} \quad (19)$$

onde $i_{L_{Rcr}dq}$ e d_{dqRCr} são as respectivas correntes lidas no filtro indutivo de entrada L_{Rcr} (ver Figura 1) e as razões cíclicas do RTCcr; e R_{Lcr} é a resistência interna do L_{Rcr} .

F. Barramento CC

A modelagem do barramento CC abordado neste trabalho se baseia no método de fluxo de potência ativa no referencial síncrono dq descrito em [22],[23]. Desse modo, a FT de controle de tensão do barramento CC é representada por:

$$G_{v_{ibcc}} = \frac{\hat{v}_{cc}(s)}{i_{Lcrd}(s)} = \frac{3v_d}{2V_{CC}C_{cc}s} \quad (20)$$

onde C_{cc} é a capacitância do barramento.

IV. SISTEMA COMPLETO DO EE-SGE PROPOSTO

A. Descrição do Sistema Gerador de Referência (SGR)

O esquema do SGR está apresentado na Figura 3. Como mencionado anteriormente, este possui a função de gerar a referência de controle para o RTCcr, o qual deverá drenar da rede elétrica uma potência proporcional àquela produzida pelo aerogerador. Internamente, pela implementação das equações dinâmicas apresentadas na Seção III, as quais descrevem o comportamento do GSIP e da TE, no SGR são geradas as tensões de referência de controle de uma fonte de tensão variável, definidas por v_{md}^* e v_{mq}^* .

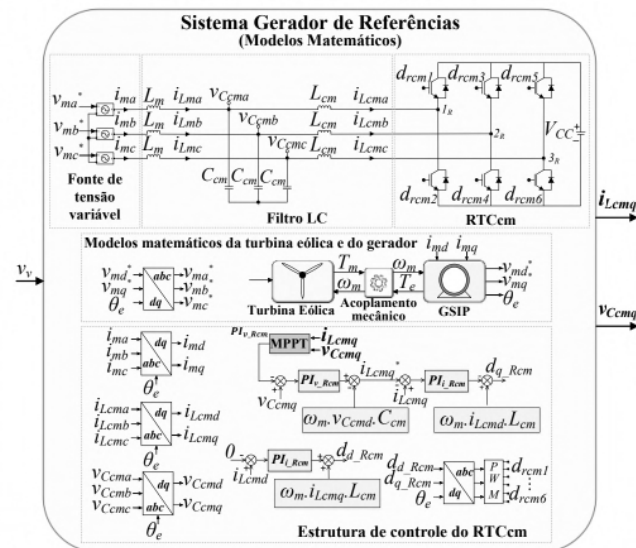


Fig. 3. Esquema detalhado do SGR do EE-SGE.

Os modelos descritos vão atuar de acordo com a velocidade de entrada do vento programada, onde, para cada velocidade,

o algoritmo de MPPT encontra a máxima potência do sistema eólico virtual. Este algoritmo atua por intermédio do controle do RTCcm, que é capaz de alterar de forma indireta a velocidade de rotação do gerador através do conjugado aplicado ao rotor da máquina, gerenciando as correntes drenadas do GSIP.

As correntes drenadas pelo RTCcm são realimentadas ao modelo do GSIP, onde estas são responsáveis por gerar o torque eletromagnético do gerador. Para que seja estabelecida a dinâmica conforme as equações de modelagem da máquina, as variáveis de entrada são definidas por: torque mecânico (T_m) e velocidade de rotação mecânica da turbina (ω_m), provenientes do modelo da TE. Como resposta, são obtidas as tensões estatóricas da máquina no eixo dq (v_{md}^* e v_{mq}^*), as quais são transformadas para os eixos estacionários abc (v_{ma}^* , v_{mb}^* e v_{mc}^*), para controle da fonte variável de entrada do RTCcm.

Os algoritmos de MPPT atuam com base no cálculo da potência elétrica média. A estimação dessa potência pode ser feita através das grandezas alternadas de tensão (v_{CCma} , v_{CCmb} e v_{CCmc}) e corrente (i_{LCma} , i_{LCmb} e i_{LCmc}), lidas no filtro $L_{cm}C_{cm}$ (ver Figura 3), as quais representam as grandezas elétricas for fase da saída do gerador. Para facilitar o cálculo de potência pelo algoritmo, estas variáveis são transformadas para os eixos síncronos dq , através da posição angular do gerador θ_e .

O algoritmo de MPPT tem como entrada a corrente e tensão no eixo q do gerador (i_{LCmq} e v_{CCmq}), uma vez que o fluxo magnético dos ímãs permanentes está alinhado com o eixo em quadratura da máquina. Um controle do tipo multimalhas baseado no controlador PI é empregado, sendo assim, o algoritmo de MPPT fornece sempre uma tensão de referência para a malha externa de controle (v_{CCmq}^*). Esta variável é controlada de modo a fazer com que a curva de potência da TE seja percorrida, variando o torque sobre o eixo do gerador, buscando atingir o ponto ideal de operação, onde a máxima potência média é transferida.

A Figura 4 resume, de forma mais simplificada, como são geradas as grandezas de controle do conversor *back-to-back*. Percebe-se que a multiplicação das grandezas geradas v_{CCmq} e i_{LCmq} representa a potência média gerada pelo aerogerador.

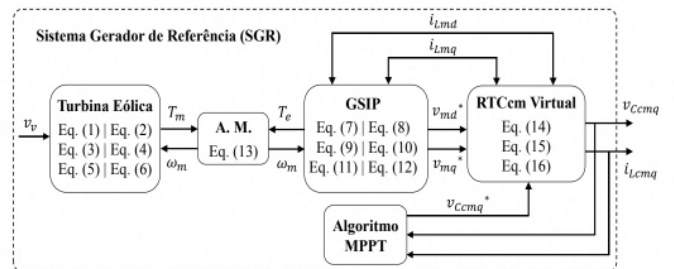


Fig. 4. Esquema simplificado do SGR do EE-SGE.

B. Esquemas Empregados no EE-SGE

A Figura 5 mostra o esquema completo do EE-SGE proposto, envolvendo os circuitos de potência do RTCcr, inversor e elementos de filtragem, bem como os diagramas de controle do RTCcr, inversor e do barramento CC.

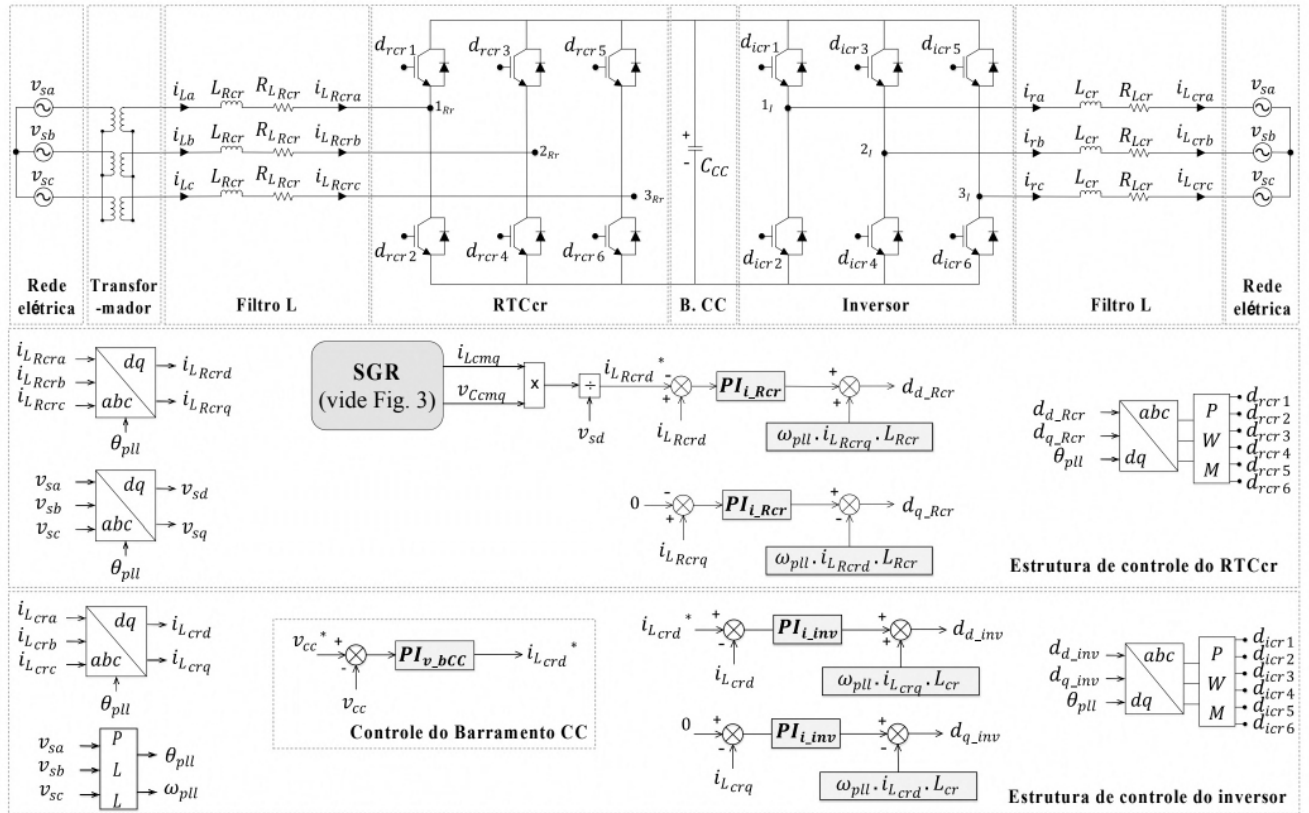


Fig. 5. Esquema de potência e estrutura de controle do EE-SGE proposto.

Uma vez conhecidas as variáveis de saída i_{Lcmq} e v_{Ccmq} do SGR, é possível calcular a potência ativa média do gerador. Sendo assim, considerando que a potência que se deseja drenar da rede elétrica deva ser igual à potência extraída pelo aerogerador virtual, a corrente de referência i_{LRcd}^* do RTCcr, no referencial síncrono, pode ser calculada por:

$$i_{LRcd}^* = \frac{i_{Lcmq} \cdot v_{Ccmq}}{v_{sd}} \quad (21)$$

onde v_{sd} é a tensão direta no referencial síncrono, na rede elétrica onde o RTCcr é conectado.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta Seção, por meio da ferramenta computacional Simulink/Matlab®, são apresentados alguns resultados dinâmicos de simulação do EE-SGE proposto. A Tabela I apresenta os parâmetros da TE. Parâmetros adicionais podem ser encontrados na Tabela II, envolvendo o conjunto aerogerador e demais elementos do sistema.

A potência gerada pelo aerogerador depende da velocidade do vento, ou seja, existe uma máxima potência gerada para uma dada velocidade rotação do eixo do gerador e, consequentemente, da TE. Isto pode ser observado na Figura 6 onde, para velocidades do vento (V_p) diferentes também são encontradas curvas de operação distintas do sistema. Nas simulações são considerados degraus na velocidade cinética do vento, a fim de testar o rastreamento do algoritmo de MPPT em condições adversas.

Desta forma, o sistema sempre operará no MPP em função da atuação do algoritmo de MPPT P&O, cujos parâmetros adotados estão mostrados na Tabela III.

TABELA I

Parâmetros da Turbina Tipo Horizontal de Três Pás

k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9
0,63	125	0,58	0,002	2,14	13,2	19	0,02	-0,0035

TABELA II

Parâmetros do Conjunto Turbina-Gerador

Velocidade nominal do vento	12,5 m/s
Potência mecânica nominal	6 kW
Tensão nominal	$V_N = 240$ V
Diâmetro da hélice	$D_t = 5,5$ m
Massa total	$M_{total} = 200$ Kg
Sistema magnético	Neodímio (imã permanente)
Resistência do estator do GSIP	0,4 Ω
Indutância do eixo direto e em quadratura	4,5 mH
Número de polos do gerador	18
Amplitude do fluxo magnético dos imãs permanentes	0,85 Wb
Número de pás da turbina	3
Material das pás da turbina	Compósito de fibra de vidro
Momento de Inércia do conjunto	0,8 kg. m ²

TABELA III

Parâmetros do Algoritmo de MPPT P&O

Passo de incremento	2 V
Frequência amostragem	4 Hz

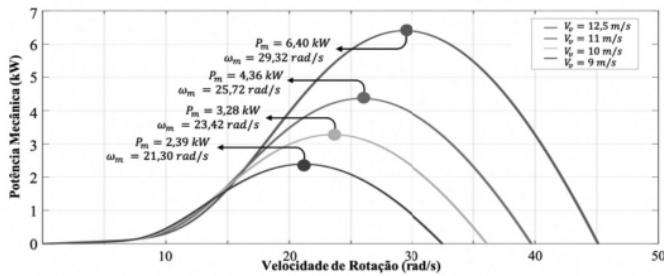


Fig. 6. Curvas de operação do aerogerador para velocidades do vento distintas.

Na Figura 7 são apresentadas as respostas dinâmicas do sistema. A potência mecânica (P_m) e a elétrica (P_e) do GSIP, a velocidade mecânica (ω_m) e o torque mecânico (T_m) para degraus de variação da velocidade do vento (11 m/s, 9 m/s e 10 m/s) são mostrados nas Figuras 7.a, 7.b e 7.c, respectivamente. É possível notar os transitórios após os degraus de velocidade do vento, onde percebe-se que a dinâmica do gerador influencia na busca do MPP. Isso ocorre devido o momento de inércia do eixo do gerador, onde se observa um tempo maior para se reestabelecer com uma variação maior na velocidade do vento. Nas Figuras 7.d e 7.e são mostradas as variáveis de tensão (v_{Ccmq}) e corrente (i_{LCmq}), no referencial síncrono, as quais são geradas pelo SGR discutidos na Seção IV. Tais grandezas são empregadas para o cálculo da corrente de referência do RTCcr definida por (21). As correntes eficazes associadas ao conversor *back-to-back* são mostradas na Figura 7.f, para o RTCcr, e na Figura 7.g, para o inversor, ambos referentes à fase “a” da rede.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Esta Seção apresenta os resultados experimentais obtidos através de uma bancada experimental do EE-SGE, cujo circuito de potência está mostrado na Figura 5. A energia drenada da rede pelo RTCcr é definida pelo SGR, o qual é embarcado no DSC TMS 320F28335 (*Texas Instruments*). Outro DSC é usado para controlar o conversor *back-to-back*.

As taxas de distorção harmônica (TDH) das correntes, fator de potência (FP) e fator de deslocamento (FD) foram adquiridos por meio do analisador de qualidade de energia FLUKE 43B. As formas de onda das correntes foram obtidas através do osciloscópio digital isolado TPS2024 (TEKTRONIX). Já para a obtenção dos resultados dinâmicos do sistema, utilizou-se o analisador de energia WT3000 (YOKOGAWA).

Em todos os experimentos o algoritmo de MPPT P&O foi empregado para a busca do MPP do aerogerador virtual.

A Figura 8.a, apresenta as correntes trifásicas instantâneas drenadas da rede elétrica pelo RTCcr e a tensão da rede da fase “a”, emulando o aerogerador virtual operando em regime permanente com potência nominal de 6 kW e velocidade do vento $V_v = 12,5$ m/s. A dinâmica das respectivas correntes (valores eficazes) e da potência ativa drenada da rede (P_{sd}) são mostradas nas Figuras 8.b e 8.c, respectivamente. As TDHs em percentual das correntes drenadas da rede se situam em torno de 1,4 %, enquanto o FP = FD = 1,0, evidenciando bons indicadores de qualidade de energia elétrica (QEE).

A Figura 9.a, mostra as correntes trifásicas instantâneas

injetadas na rede elétrica pelo inversor e a tensão da rede da fase “a” do EE-SGE. A dinâmica das respectivas correntes (valores eficazes) e da potência ativa injetada da rede (P_{si}) são mostradas nas Figuras 9.b e 9.c, respectivamente. As TDHs das correntes injetadas da rede se situam em torno de 1,8 %. Já o FP = FD = 1,0, evidenciando também bons indicadores de QEE.

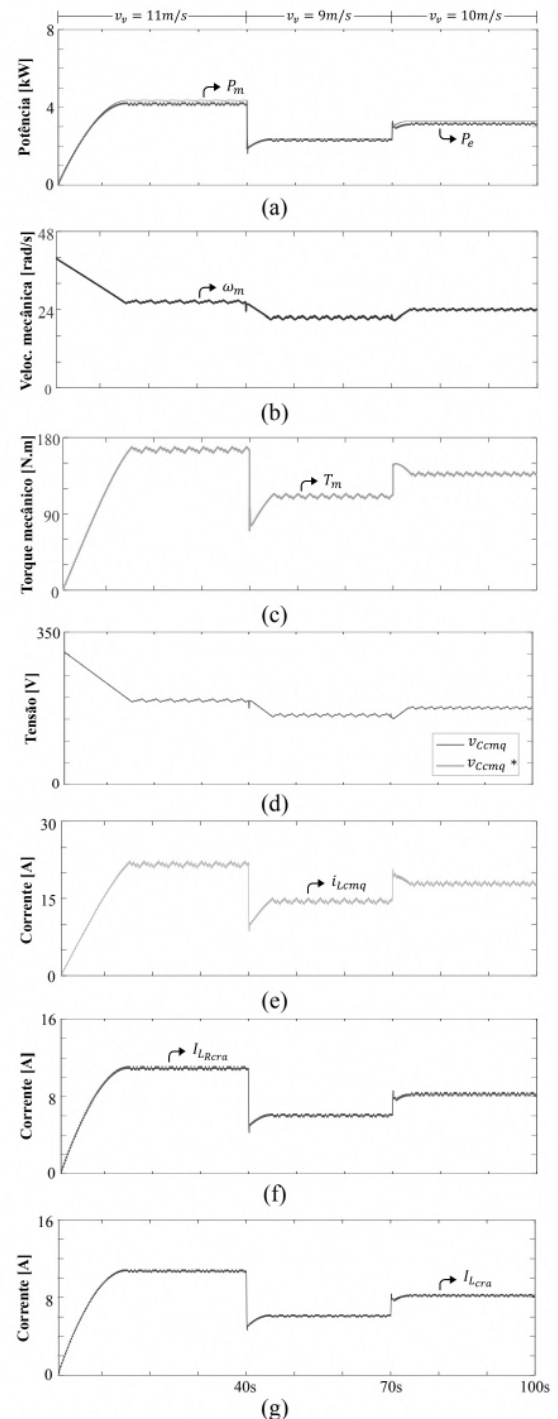
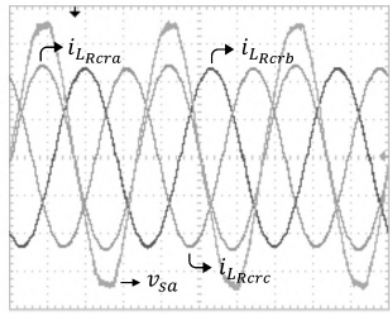
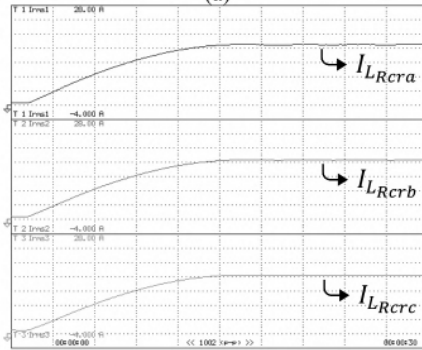


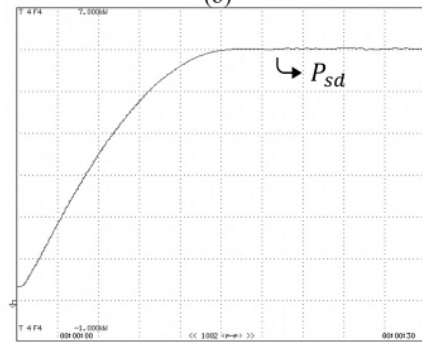
Fig. 7. Comportamento dinâmico do GSIP operando com variações na velocidade do vento: (a) Potência mecânica (P_m) e potência elétrica (P_e); (b) Velocidade mecânica (ω_m); (c) Torque mecânico (T_m); (d) Tensão de controle gerado pelo SGR (v_{Ccmq} e v_{Ccmq}^*); (e) Corrente de controle gerada pelo SGR (i_{LCmq}); (f) Corrente eficaz na fase “a” do RTCcr; e (g) Corrente eficaz na fase “a” do inversor.



(a)



(b)

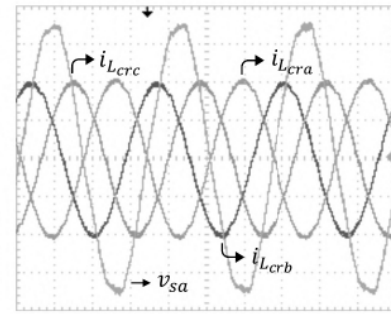


(c)

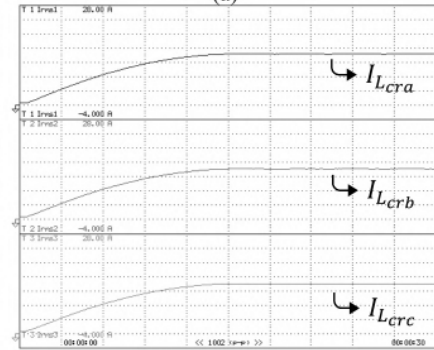
Fig. 8. Comportamento estático e dinâmico do EE-SGE: (a) Tensão da fase “a” da rede v_{sa} e correntes drenadas pelo RTCr i_{LRcra} , i_{LRcrb} e i_{LRcr} (50 V/div, 10 A/div, 5ms/div); (b) Correntes eficazes do RTCr I_{LRcra} , I_{LRcrb} e I_{LRcr} (4 A/div, 3s/div); e (c) Potência ativa P_{sd} drenada pelo RTCr (1000 W/div, 3 s/div).

Na Figura 10 são mostrados os comportamentos dinâmicos das correntes e potências do EE-SGE considerando variações na velocidade do vento. As Figuras 10.a e 10.b se referem às correntes eficazes e potência ativa drenadas pelo RTCr, enquanto nas Figuras 10.c e 10.d estão relacionadas às mesmas grandezas injetadas na rede pelo inversor. A velocidade do vento $V_v = 11 \text{ m/s}$ é mantida até 9,6 s, quando é alterada para $V_v = 9 \text{ m/s}$ por 3s e em seguida alterada para $V_v = 10 \text{ m/s}$. Nota-se que os resultados experimentais obtidos são similares aos atingidos via simulações computacionais.

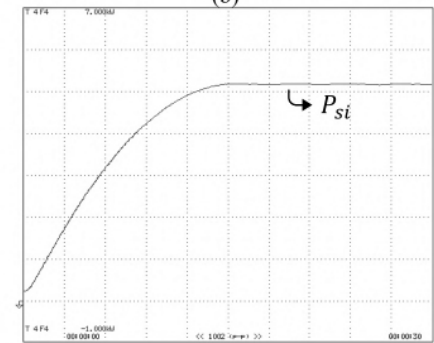
Uma interface gráfica foi desenvolvida para mostrar grandezas calculadas internamente no DSC. Por comunicação serial, as variáveis da velocidade mecânica (ω_m), potência mecânica (P_m) e torque mecânico (T_m) foram adquiridas e plotadas de acordo com a velocidade do vento mostrado na Figura 10. Pode ser observado que os resultados experimentais das variáveis internas do DSC são muito próximos dos resultados obtidos via simulação computacional da Figura 7.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Comportamento estático e dinâmico do EE-SGE: (a) Tensão da fase “a” da rede v_{sa} e correntes injetadas na rede pelo inversor i_{Lcra} , i_{Lcrb} e i_{Lcrc} (50 V/div, 10 A/div, 5ms/div); (b) Correntes eficazes do inversor I_{Lcra} , I_{Lcrb} e I_{Lcrc} (4 A/div, 3s/div); e (c) Potência ativa P_{si} injetada na rede (1000 W/div, 3 s/div).

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou m EE de um SGE. O aerogerador, composto por uma TE e um GSIP operando em MPP, assim como uma carga representada pelo RTCcm, o qual consome a potência gerada pelo aerogerador, foram implementados virtualmente por meio de equações matemáticas embarcadas em DSC. Com base na potência gerada pelo SGE, foi possível controlar um conversor *back-to-back*, composto fisicamente por um retificador (RTCcr) e um inversor, os quais, em um sistema real, seriam conectados ao GSIP do aerogerador. Testes envolvendo simulações computacionais e experimentais foram apresentados de forma a comprovar o efetivo desempenho do EE-SGE proposto. Com as devidas adequações, o EE-SGE proposto se potencializa por apresentar um viés didático educacional promissor, uma vez que é possível emular uma vasta gama de modelos matemáticos de aerogeradores, o que permite avaliar seus desempenhos em regimes estacionário e não estacionário por meio da análise de grandezas elétricas e mecânicas.

Tais desempenhos podem ser comprovados via simulações e experimentalmente, o que caracteriza a proposta como uma ferramenta educacional versátil para o ensino de sistemas de geração eólica tendo como entrada perfis de vento distintos.

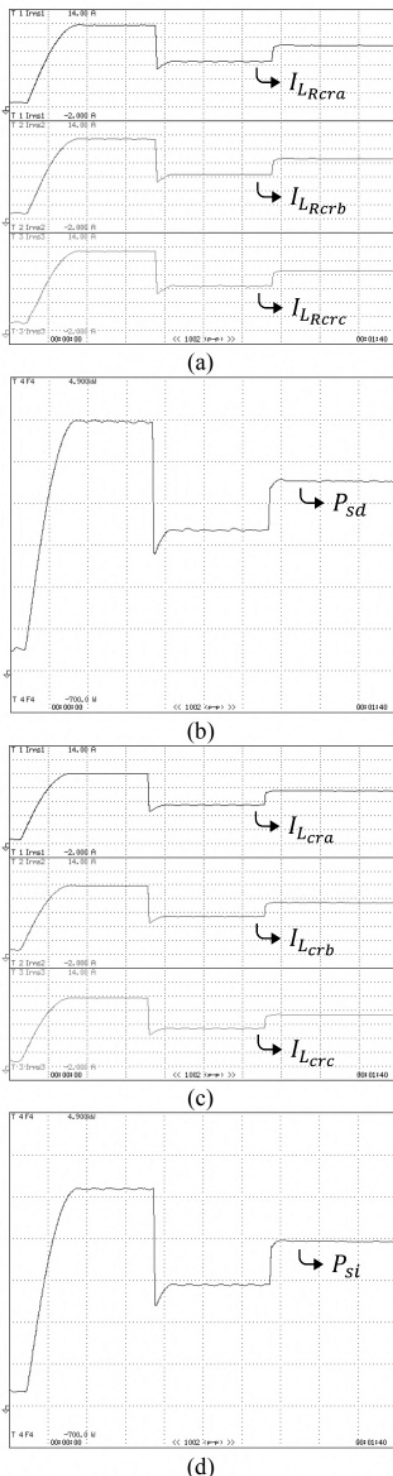


Fig. 10. Comportamento dinâmico do GSIP para variações na velocidade do vento: (a) Correntes eficazes do RCTcr I_{LRcra} , I_{LRcrb} e I_{LRcrc} (2 A/div, 10 s/div); (b) Potência ativa drenada da rede elétrica pelo RTCr P_{sd} (700 W/div, 10 s/div); (c) Correntes eficazes do inversor I_{Lcra} , I_{Lcrb} e I_{Lcrc} (2 A/div, 10 s/div); (d) Potência ativa injetada pelo inversor na rede P_{si} (700 W/div, 10 s/div).

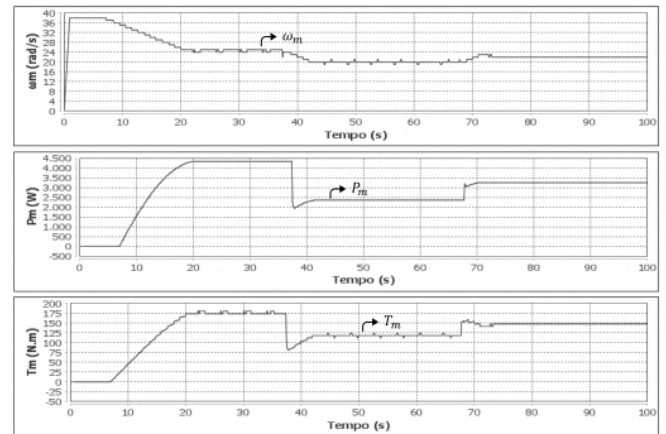


Fig. 11. Grandezas internas do DSC: velocidade mecânica (ω_m), potência mecânica (P_m) e torque mecânico (T_m).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro recebido do CNPq (Processos 308620/2021-6 e 304707/2021-0) e o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] Devashish, A. Thakur, S. Panigrahi and R. R. Behera, "A review on wind energy conversion system and enabling technology", in *Proc. of ICEPES*, pp. 527-532, 2016, doi: 10.1109/ICEPES.2016.7915985.
- [2] Z. Chen, Y. Hu, F. Blaabjerg, "Stability improvement of induction generator-based wind turbine systems", *IET Renewable Power Generation*, vol. 1, n° 1, pp. 81-93, Mar. 2017, doi: 10.1049/iet-rpg:20060021.
- [3] A. D. Sahin, "Progress and recent trends in wind energy", *Progress in Energy Combustion Science*, vol. 30, n° 5, pp. 501-543, 2004, doi: 10.1016/j.pecs.2004.04.001.
- [4] F. Deng, Z. Chen, "Power control of permanent magnet generator based variable speed wind turbines", in *Proc. of ICEMS*, pp. 1-6, 2009, doi: 10.1109/ICEMS.2009.5382803.
- [5] J. Esch, "Prolog to, "High-power wind energy conversion systems: State-of-the-art and emerging technologies", *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, n° 5, pp. 740-788, May 2015, doi: 10.1109/JPROC.2015.2418461.
- [6] F. Blaabjerg, K. Ma, "Wind energy systems", *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, n° 11, pp. 2116-2131, Nov. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2017.2695485.
- [7] M. Monfared, H. Kojabadi, H. Rastegar, "Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled dc motor", *Renewable Energy*, vol. 33, n° 5, pp. 906-913, May 2008, doi: 10.1016/j.renene.2007.06.007.
- [8] W. Li, D. Xu, W. Zhang and H. Ma, "Research on wind turbine emulation based on dc motor", in *Proc. of ICIEA*, pp. 2589-2593, 2007, doi: 10.1109/ICIEA.2007.4318881.
- [9] Himani, R. Dahiya, "Development of Wind Turbine

- emulator for standalone wind energy conversion system”, in *Proc. of ICPS*, pp. 1-6, 2016, doi: 10.1109/ICPES.2016.7583999.
- [10] N. Karakasis, A. Mesemanolis, C. Mademlis, “Wind turbine simulator for laboratory testing of a wind energy conversion drive train”, in *Proc. of MEDPOWER*, pp. 1-6, 2012, doi: 10.1049/cp.2012.2033.
- [11] 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, Set. 2017, doi: 10.1109/TIE.2017.2686306.
- [12] H. Garg, N. Sharma, R. Dahiya, “Design and Simulation of Wind Turbine Emulator”, in *Proc. of PIICON*, pp. 1-6, 2018, doi: 10.1109/POWERI.2018.8704424.
- [13] F. Martinez, L. Ca. Herrero, S. de Pablo, “Open loop wind turbine emulator”, *Renewable Energy*, vol. 63, pp. 212-221, Mar. 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.09.019.
- [14] H. D. Wollz, S. A. O. da Silva, L. P. Sampaio, “Realtime monitoring of an electronic wind turbine emulator based on the dynamic PMSG model using a graphical interface”, *Renewable Energy*, vol. 155, pp. 296-308, Ago. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.03.096.
- [14] 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*, pp. 3042-3047, 2014, doi: 10.1109/APEC.2014.6803738.
- [15] M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, C. W. Tan, R. Saidur, “A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, nº 5, pp. 3220-3227, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.02.016.
- [16] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, Wiley, 3ª Edição, Chichester, 2014.
- [17] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, S. D. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, Wiley-IEEE, 3ª Edição, Nova Jersey, 2013.
- [18] L. S. Barros, Camila Mara Vital 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, doi: 10.18618/REP.2017.2.2666.
- [19] V. Yaramasu; B. Wu, “Control of PMSG WECS with Back-to-Back Connected Converters”, in *Model Predictive Control of Wind Energy Conversion Systems*, Wiley-IEEE, 1ª Edição, Nova Jersey, 2017.
- [20] 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, nº 4, pp. 364-372, Nov. 2015, doi: 10.18618/REP.2015.4.2553.
- [21] L. B. G. Campanhol, S. A. O. da Silva, A. Goedel, “Application of shunt active power filter for harmonic reduction and reactive power compensation in three-phase four-wire systems”, *IET Power Electronics*, vol. 7, nº 11, pp. 2825-2836, Nov. 2014, doi: 10.1049/iet-pel.2014.0027.
- [22] 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, nº 2, pp. 601-610, Mar./Abr. 2001, doi: 10.1109/28.913727.

DADOS BIOGRÁFICOS

Gabriel Ramos Previero é engenheiro eletricitista (2020) e mestre em engenharia elétrica (2022) pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus Cornélio Procópio* (UTFPR-CP). Suas áreas de interesse englobam sistemas de energia renováveis, qualidade de energia, sistemas fotovoltaicos e eólicos.

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). Atualmente, é coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UTFPR-CP e bolsista produtividade PQ-1D do CNPq. 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 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 associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR-CP). É membro e colaborador do Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). É bolsista produtividade PQ-2 do CNPq. Seus 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.

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 é doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UTFPR-CP, desenvolvendo suas atividades de pesquisa no Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). Atua na empresa Romagnole Produtos Elétricos S.A. nas áreas de engenharia de produto de transformadores e *smart grid*. Suas áreas de interesse englobam sistemas de energia renováveis, qualidade de energia, modelagem e controle de conversores estáticos e transformadores de estado sólido. É membro da SOBRAEP.