

Plataforma Virtual de Emulação de um Sistema de Geração de Energia Eólica Baseado no GSIP Interligado à Rede Elétrica Trifásica

GABRIEL R. PREVIERO*, SERGIO A. O. DA SILVA**, LEONARDO P. SAMPAIO***

Universidade Tecnológica Federal do Paraná,
Departamento de Engenharia Elétrica,
Cornélio Procópio, PR 86.300-000 Brasil,
(e-mails: *gabrielpreviero@alunos.utfpr.edu.br; **augus@utfpr.edu.br; ***sampaio@utfpr.edu.br)

Abstract: This paper presents a study and implementation of an eolic emulator platform for a wind energy generation system (EEP-WEGS), which is based on mathematical models that describe the static and dynamic behaviors of a wind turbine, composed of a permanent magnet synchronous generator. The management of electrical power generated from the mathematical model of the wind generator (MM-WG) is performed by a back-to-back converter (rectifier/inverter), which is responsible for controlling the power drained and injected into the three-phase power grid. The first stage of this converter is composed of a controlled rectifier, that is responsible for draining sinusoidal currents from the grid whose amplitudes are defined by a reference generation system (RGS), based on the MM-WG. Inside the RGS, the maximum power point tracking (MPPT) algorithm is also present. Therefore, MPPT techniques are addressed during the paper for optimizing the performance of the wind system. A three-phase inverter is used in the last stage of the back-to-back converter, which controls the DC bus voltage and the currents injected into the grid calculated by the MM-WG. For evaluation of the proposed EEP-WGS, simulation results are shown, to demonstrate the static and dynamic behaviors of a complete wind system, as well as evaluate the performance in the search for the MPP, allowing the analysis of the MPPT algorithms employed.

Resumo: Este trabalho apresenta a implementação de uma plataforma virtual de emulação de um sistema de geração eólica de energia (PVE-SGEE), o qual é baseado em modelos matemáticos que descrevem os comportamentos estáticos e dinâmicos de um aerogerador, composto por turbina eólica e gerador síncrono de ímã permanente. Um conversor *back-to-back* é empregado para gerenciar a potência indicada pelo modelo matemático do aerogerador (MMA), controlando as correntes drenadas e injetadas na rede elétrica trifásica. O primeiro estágio deste conversor é representado por um retificador trifásico controlado, responsável por drenar da rede correntes senoidais, cujas amplitudes são definidas por um sistema gerador de referências (SGR), fundamentado no MMA. No SGR, também está presente o algoritmo de rastreamento do ponto de máxima potência. Portanto, técnicas de MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*) são abordadas no decorrer do trabalho para otimização do desempenho do sistema eólico. Um inversor trifásico é empregado no estágio de saída do conversor *back-to-back*, o qual tem a função de controlar a tensão do barramento CC e injetar na rede a energia calculada através do MMA. Para avaliação da PVE-SGEE em estudo, resultados de simulação são apresentados para demonstrar os comportamentos estáticos e dinâmicos do sistema, assim como avaliar seu desempenho na busca do MPP, permitindo, desta forma, analisar a eficiência dos algoritmos de MPPT empregados.

Keywords: Wind energy; Eolic emulator; PMSG; Wind turbine; MPPT algorithms.

Palavras-chaves: Energia eólica; Emulador eólico; GSIP; Turbina eólica; Algoritmos de MPPT.

1. INTRODUÇÃO

Impactos ambientais irreparáveis podem ser observados atualmente, decorrentes da utilização das fontes de energia não renováveis, como carvão, petróleo, dentre outros. Aliadas à limitação da disponibilidade das fontes não renováveis para a geração de energia, novas fontes passaram a ter grande relevância no cenário energético mundial [Sahin, 2004]. Portanto, diversos países passaram a estudar e implementar na prática fontes de energias renováveis e limpas, como é o caso da eólica, solar, biomassa, geotérmica, dentre outras [Thakur, 2016]. Dentre as fontes renováveis existentes, a energia eólica vem se destacando e apresentando o maior nível de desenvolvimento no mundo [Chen; Hu; Blaabjerg, 2007].

Nas aplicações da fonte de geração a partir dos ventos, o desempenho é diretamente afetado pelas condições meteorológicas, neste caso, pela direção e velocidade dos ventos [Sahin, 2004]. Sendo assim, atualmente, grandes estudos nessa área são baseados na forma de integração das turbinas eólicas com as máquinas elétricas e conversores de potência, para que o sistema em si possa atuar em diversas faixas de operação, e apesar da dependência associada às condições climáticas, mantenham um desempenho satisfatório [Deng; Chen, 2009].

Os primeiros sistemas eólicos utilizados eram compostos por uma turbina eólica, a qual era conectada a um gerador de indução do tipo gaiola de esquilo (GIGE). Nesta solução, a

velocidade de rotação do gerador é fixa, não permitindo variações de acordo com as faixas de velocidade do vento [Blaabjerg; Ma, 2017]. Esta restrição provoca uma queda muito grande em relação a eficiência e o desempenho das turbinas diante das variações da velocidade do vento.

A inserção dos conversores de potência proporcionou avanços significativos na conversão de energia eólica. Primeiramente, surgiram sistemas de conversão de potência de escala parcial, comumente aliados a um gerador de indução duplamente alimentado (GIDA). Posteriormente, foram desenvolvidos sistemas em que a velocidade é totalmente controlada, proporcionada por uma conversão total de potência, nos quais usualmente é empregado o gerador síncrono de ímã permanente (GSIP). Estes sistemas passaram a ser bastante difundidos, uma vez que, toda a energia processada pelo sistema é controlada, possibilitando maior segurança e desempenho dos mesmos [Blaabjerg; Ma, 2017].

Tendo como base os componentes que compõem um sistema de geração eólica de energia (SGEE), a turbina eólica (TE) e as máquinas elétricas, os quais diferenciam as topologias existentes, podem ser precisamente descritos através de equações e modelos matemáticos. No caso das TEs, a potência mecânica de saída pode ser encontrada em função de parâmetros como velocidade do vento, área de abrangência das pás, densidade do ar, entre outros [Himani; Dahiya, 2016]. Com relação aos geradores, na literatura, podem ser encontrados facilmente modelos matemáticos que descrevem os comportamentos dinâmicos da máquina [Wasynczuk; Krause; Sudhoff; Pekarek, 2002]. Baseado nesses modelos, passaram a ser desenvolvidos equipamentos que podem emular o comportamento dinâmico e estacionário de aerogeradores reais [Garg; Sharma; Dahiya, 2018; Ramanath et al, 2018; Martinez; Herrero; Pablo, 2014].

Com o intuito de contornar a necessidade de manutenção e os altos custos associados à utilização de máquinas elétricas de grande porte, bem como para fins didáticos, tem-se desenvolvido emuladores eletrônicos para este fim [Wollz; Da Silva; Sampaio, 2020]. Nesta direção, este trabalho representa, por meio de uma plataforma virtual de emulação (PVE), os comportamentos de um SGEE, com conversão de potência de escala total, baseado no GSIP, onde um conversor *back-to-back* será empregado para simular estas dinâmicas. A PVE-SGEE proposta, apresentada na Fig 1, é composta por um retificador trifásico controlado, cuja finalidade é drenar correntes senoidais da rede, dividindo seu barramento CC com um inversor trifásico, cujo controle atuará na regulação da tensão deste, bem como injetar na rede elétrica trifásica correntes senoidais, cuja energia elétrica é proporcional àquela gerada matematicamente pelo grupo TE-GSIP.

No sistema gerador de referências (SGR) mostrado na Fig 1 estão embarcadas as equações dinâmicas da TE e do GSIP, as quais geram referências de tensão para o retificador totalmente controlado conectado à máquina (RTCCm). O RTCCm virtual, opera com controle multimalhas atuando no controle de tensão e corrente, de modo que possam ser empregadas técnicas de rastreamento da máxima potência. O SGR gera referência de corrente, a qual é proporcional à potência do sistema. Esta referência é enviada para o sistema de controle do RTC

conectado à rede (RTCCr), que por sua vez drena da rede correntes senoidais.

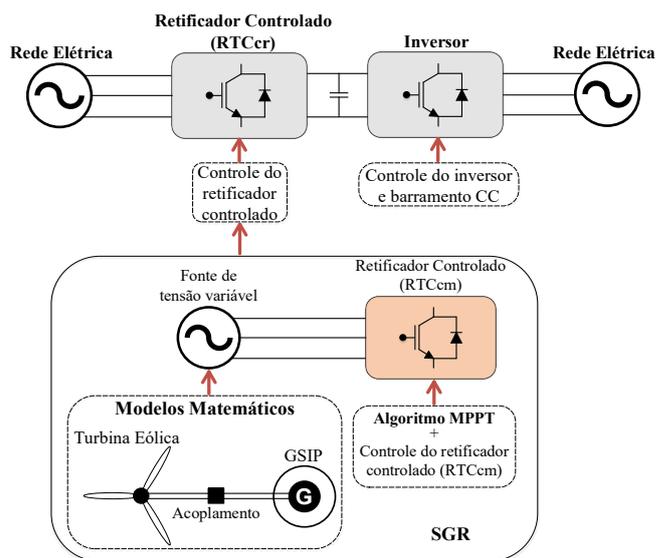


Fig. 1 Estrutura simplificada da PVE-SGEE proposto.

Ressalta-se que com o desenvolvimento dos SGEE de velocidade variável, surgiu a possibilidade da aplicação de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência, ou seja algoritmos de MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*). Estes algoritmos são capazes de controlar 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. Por meio dos métodos de MPPT é possível controlar o retificador de tensão conectado ao GSIP (RTCCm). Neste trabalho a busca do MPPT é implementada por meio de dois algoritmos de MPPT convencionais, ou seja, o Perturba e Observa (P&O) [Abdullah et al., 2012] e o condutância incremental (CI) [Kumar; Chatterjee, 2016], além de um algoritmo metaheurístico denominado arrefecimento simulado (AS) [Goldbarg; Goldbarg; Luna, 2016; Fan et al, 2016].

Resultados de simulações computacionais são apresentados para comprovar o desenvolvimento da PVE-SGEE proposta, e assim observar e compreender os comportamentos dinâmicos e estáticos de um sistema eólico com características comerciais conhecidas. Este estudo se caracteriza como uma etapa inicial que dará suporte ao desenvolvimento de um emulador eólico eletrônico completo envolvendo o aerogerador (TE-GSIP) e o conversor *back-to-back*.

2. MODELAGEM DOS COMPONENTES E CONVERSORES DA PVE-SGEE

A topologia usual de um SGEE de velocidade variável baseado no GSIP, pode ser observada na Fig 2.

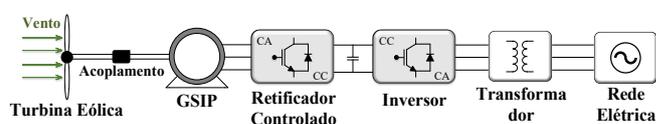


Fig. 2 Topologia de um SGEE equipado com o GSIP.

2.1 Turbina Eólica

As turbinas eólicas são responsáveis 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 (P_{mec}) extraída da TE é dependente dos seus parâmetros construtivos e aspetos climáticos, ou seja:

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

onde A é a área varrida pelas pás da TE e v_{vento} é a velocidade de entrada do vento; C_p , por sua vez, trata-se de uma função dependente da relação entre as velocidades da ponta da pá da TE e do vento (λ), e do ângulo de passo das hélices (β), cujas descrições estão apresentadas em (2) e (3).

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v_{vento}} \quad (2)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = k_1 \left(\frac{k_2}{\lambda_i} - k_3 \beta - k_4 \beta^{k_5} - k_6 \right) e^{-\frac{k_7}{\lambda_i}} \quad (3)$$

onde ω_m é a velocidade mecânica de rotação da TE; R é o raio da TE e k_1 à k_9 são os coeficientes da turbina. O fator λ_i pode ser representado por:

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + k_8 \beta} \frac{k_9}{\beta^3 + 1}} \quad (4)$$

2.2 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 [Heier, 1998; Wasynczuk; Krause; Sudhoff; Pekarek, 2002]. Portanto, as tensões estatóricas nos eixos dq ($v_{d,s}$ e $v_{q,s}$), podem ser observadas, respectivamente, por:

$$v_{d,s} = r_s i_{d,s} - \omega_e L_q i_{q,s} + L_q \frac{di_{d,s}}{dt} \quad (5)$$

$$v_{q,s} = r_s i_{q,s} - \omega_e L_d i_{d,s} + \omega_e \psi_m + L_q \frac{di_{q,s}}{dt} \quad (6)$$

onde r_s é a resistências do estator; $i_{q,s}$ e $i_{d,s}$ são as correntes estatóricas no eixo d e 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.

O torque eletromagnético (T_e), em função das variáveis apresentadas no referencial síncrono, pode ser reescrito conforme:

$$T_e = \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) (\psi_m i_{q,s} + (L_d - L_q) i_{d,s} i_{d,s}) \quad (7)$$

A potência ativa (P_e) e reativa (Q_e) podem ser respectivamente dadas por:

$$P_e = \left(\frac{3}{2} \right) (v_{q,s} i_{q,s} + v_{d,s} i_{d,s}) \quad (8)$$

$$Q_e = \left(\frac{3}{2} \right) (v_{q,s} i_{d,s} - v_{d,s} i_{q,s}) \quad (9)$$

2.3 Acoplamento Mecânico

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

$$J_{ag} \left(\frac{d\omega_m}{dt} \right) = T_m - T_a - T_e \quad (10)$$

onde J_{ag} é o momento de inércia do aerogerador; T_a é o torque gerado pelo atrito de acoplamento e T_m é o torque mecânico. Vale ressaltar que, como não foi considerada a presença de uma caixa de engrenagens, a velocidade de rotação de TE (ω_m) é igual a velocidade de rotação do eixo do GSIP.

2.4 Retificador Trifásico Controlado

Para obtenção das funções de transferência (FT) nos referenciais síncronos, desconsidera-se os distúrbios do sistema, bem como o acoplamento cruzado entre os estados, os quais são inseridos posteriormente no diagrama de controle do conversor.

A FT da planta de tensão do RTCcm, pode ser dada por:

$$G_{v_{i_{dq}} R_{cm}}(s) = \frac{\hat{v}_{cmdq}(s)}{\hat{i}_{L_{cmdq}}(s)} = -\frac{1}{C_{cm}s} \quad (11)$$

onde v_{cmdq} e $i_{L_{cmdq}}$ representam as respectivas tensões lidas no filtro capacitivo e as correntes no filtro indutivo no referencial dq e C_{cm} é a capacitância do filtro capacitivo.

A FT da malha interna de corrente nos referenciais síncronos dq é dada por:

$$G_{i_{d,dq} R_{cm}}(s) = \frac{\hat{i}_{L_{cmdq}}(s)}{\hat{d}_{dqR_{cm}}(s)} = -\frac{V_{CC} C_{cm} s}{C_{cm} L_{cm} s^2 + R_{L_{cm}} C_{cm} s + 1} \quad (12)$$

onde $d_{dqR_{cm}}$ representa as razões cíclicas do retificador no referencial síncrono; V_{CC} é a tensão do barramento CC; L_{cm} é a indutância do filtro e $R_{L_{cm}}$ é a sua resistência interna.

Já a FT do RTCcr, responsável por drenar as correntes da rede elétrica, necessária para a alimentação da PVE, é dada por:

$$G_{i_{d,dq} R_{cr}}(s) = \frac{\hat{i}_{L_{Rcrdq}}(s)}{\hat{d}_{dqR_{cr}}(s)} = \frac{V_{CC}}{L_{Rcr}s + R_{L_{Rcr}}} \quad (13)$$

onde $i_{L_{Rcrdq}}$ e $d_{dqR_{cr}}$ são as correntes lidas no filtro indutivo do RTCcr, bem como as razões cíclicas do retificador, respectivamente, nos eixos dq . L_{Rcr} é a indutância do filtro indutivo e $R_{L_{Rcr}}$ é a sua resistência interna.

2.5 Inversor

O inversor trifásico é conectado à rede elétrica por meio de um filtro indutivo, de forma que as correntes do emulador sejam injetadas na rede. A FT da malha de corrente do inversor nos referenciais síncronos dq é representada por:

$$G_{id_dq_inv}(s) = \frac{\hat{i}_{Lcrdq}(s)}{\hat{d}_{idq}(s)} = \frac{V_{CC}}{L_{Cr}S + R_{Lcr}} \quad (14)$$

onde i_{Lcrdq} e d_{idq} representam, respectivamente, as correntes lidas no filtro indutivo de saída e as razões cíclicas do inversor no referencial dq ; L_{Cr} é a indutância do filtro indutivo e R_{Lcr} é a resistência interna associada aos indutores do filtragem.

2.6 Barramento CC

A modelagem do barramento CC pode ser realizada de diversas maneiras. Neste trabalho é abordado o método de fluxo de potência ativa, com grandezas contínuas no referencial síncrono dq [Campanhol; Da Silva; Goedel, 2014]. Assim, a FT de controle de tensão do barramento CC é dada por:

$$G_{vi_bcc} = \frac{\hat{v}_{cc}(s)}{\hat{i}_{Lcrd}(s)} = \frac{3v_d}{2V_{CC}C_{cc}s} \quad (15)$$

onde C_{cc} é a capacitância do barramento.

3. ESQUEMAS DA PVE-SGEE PROPOSTA

3.1 Estratégia do SGR

O esquema do sistema gerador de referências está apresentado na Fig 3. O SGR possui a função de gerar referências de corrente para o retificador que drenará da rede elétrica correntes senoidais, as quais correspondam à potência ativa instantânea gerada pelo aerogerador. Internamente, este sistema leva em consideração a implementação das equações dinâmicas apresentadas na seção 2, que descrevem o comportamento do GSIP e da TE, de forma a gerar tensões de referência para uma fonte de tensão variável. Os modelos descritos vão atuar de acordo com a velocidade de entrada do sistema. Este algoritmo atua por intermédio dos controladores do RTCcm. O controle deste conversor é capaz de alterar de forma indireta a velocidade de rotação do gerador.

3.2 Esquema Empregado na PVE-SGEE

Na Fig 4 está apresentado o esquema completo da PVE-SGEE proposta. Como descrito, o SGR é responsável por gerar as referências de corrente para o sistema de controle do RTCcr. Este conversor tem como função drenar correntes senoidais e balanceadas da rede elétrica. As variáveis de saída do SGR, necessárias para o cálculo da corrente de referência do retificador (i_{LRcrd}^*), são: corrente e tensão provenientes do gerador (SGR), ambas representadas no eixo q (i_{Lcmq} e v_{Ccmq}). Com base nessas duas variáveis é possível calcular a potência ativa do gerador. Sendo assim, para se encontrar i_{LRcrd}^* , basta que seja realizada uma análise de fluxo de potência, onde a potência que se deseja drenar da rede elétrica deve ser igual à potência extraída do aerogerador, ou seja:

$$i_{LRcrd}^* = \frac{i_{Lcmq} \cdot v_{Ccmq}}{v_{sd}} \quad (19)$$

onde v_{sd} é a tensão da rede elétrica no eixo síncrono direto.

As correntes alternadas drenadas pelo RTCcr, as quais seguem a referência fornecida pelo SGR, são transformadas para os referenciais síncronos dq de acordo com o ângulo de fase detectado por um algoritmo PLL (do inglês, *Phase Locked Loop*). Este algoritmo é responsável pelo sincronismo das correntes com os parâmetros da rede elétrica.

A potência drenada da rede pelo RTCcr, responsável pelo funcionamento do emulador, é transferida para um barramento CC, cuja tensão (v_{CC}) é regulada pelo sistema de controle do inversor trifásico. Este conversor também realiza a injeção da potência ativa drenada pelo retificador novamente na rede elétrica. Vale salientar que, ao se trabalhar no SRF, teoricamente, erros nulos em regime permanente são obtidos pelos controladores PI, uma vez que as variáveis de controle são contínuas. Além disso, a modelagem dinâmica do GSIP se torna mais simples neste referencial, uma vez que os parâmetros da máquina se tornam independentes da posição elétrica angular (θ_e).

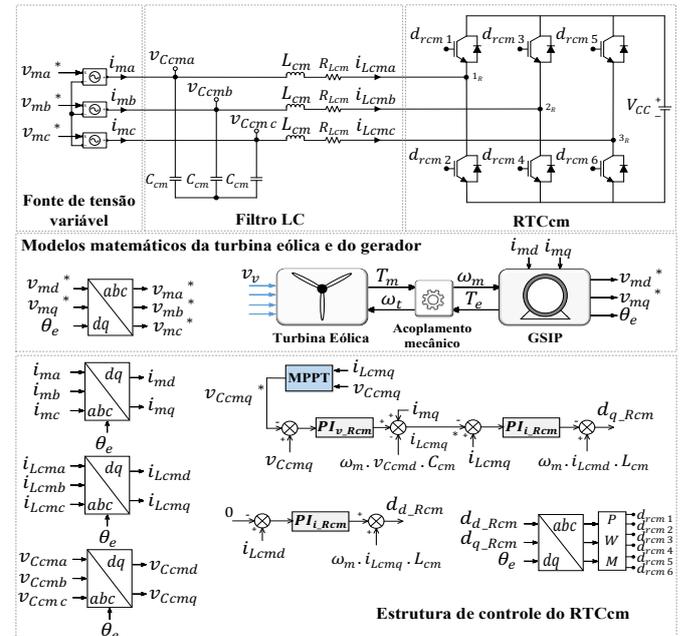


Fig. 3 Esquema de potência e estrutura de controle do SGR.

4. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Os resultados apresentados nesta seção foram obtidos por meio de simulações utilizando a ferramenta computacional Matlab®/Simulink. Neste trabalho, a TE utilizada é de 6kW, cujos parâmetros são encontrados em [Wollz, 2018]. Para a obtenção dos resultados foram utilizados os parâmetros descritos na Tabela 1 considerando o conjunto aerogerador e demais elementos passivos do sistema. Na Tabela 2 são descritos os parâmetros de simulação do conversor *back-to-back*, filtros passivos e dos algoritmos de MPPT. Enquanto na Tabela 3 estão apresentadas todas as especificações de projeto dos controladores e os ganhos empregados.

A potência entregue pelo aerogerador depende diretamente da velocidade do vento. Sendo assim, para cada velocidade do

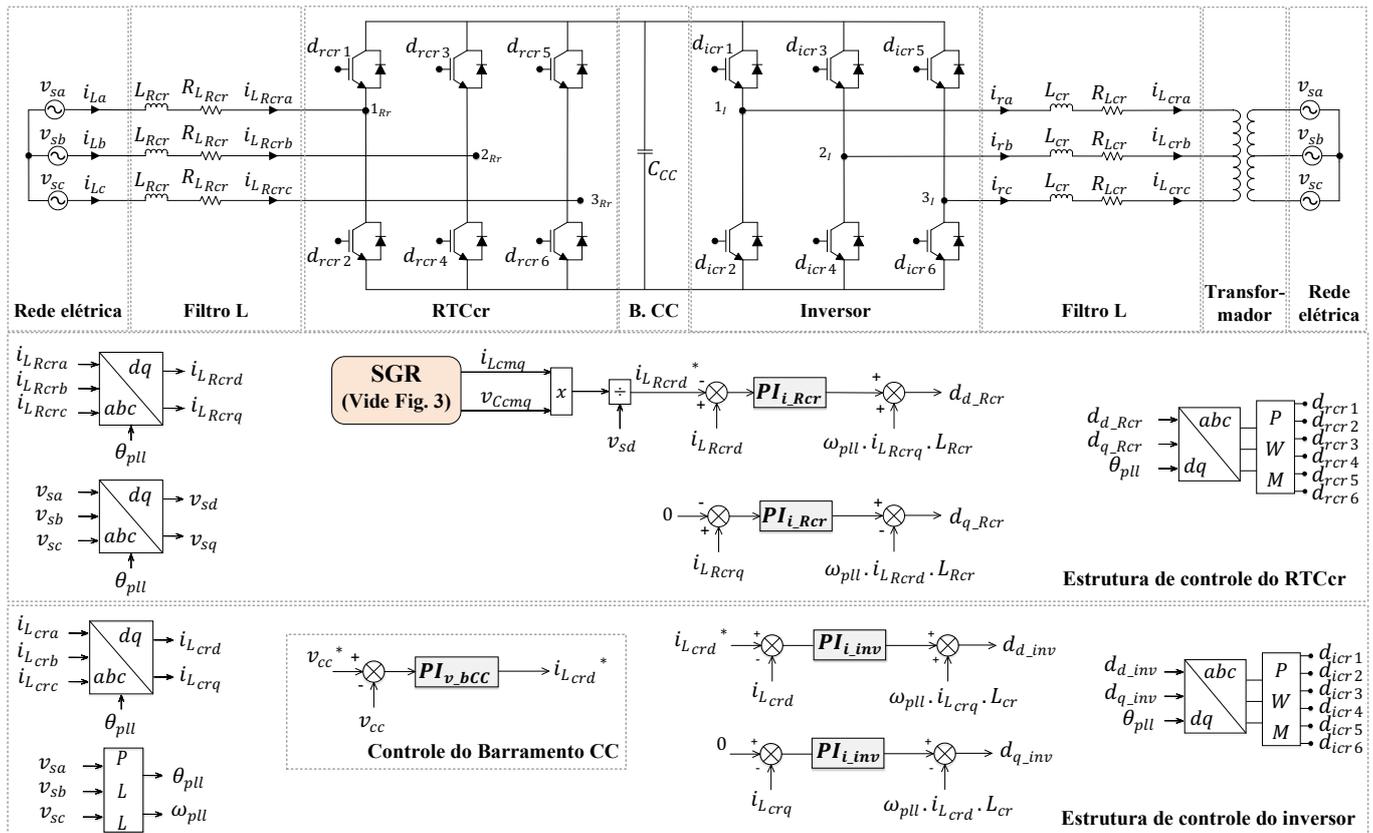


Fig. 4 Esquema de potência e estrutura de controle da PVE-SGEE.

vento existe uma faixa de rotação do eixo do gerador e, conseqüentemente, da TE, em que a potência mecânica é máxima. Este fato pode ser observado pela Fig 5, onde a velocidade do vento é variada, demonstrando as faixas de operação do sistema.

Os resultados serão divididos em duas etapas, sendo a primeira destinada à validação do funcionamento do emulador em condições nominais de operação da TE e do GSIP, e a segunda será destinada aos resultados para condições de degraus na velocidade cinética de entrada do vento, a fim de testar o rastreamento dos algoritmos em condições naturais adversas.

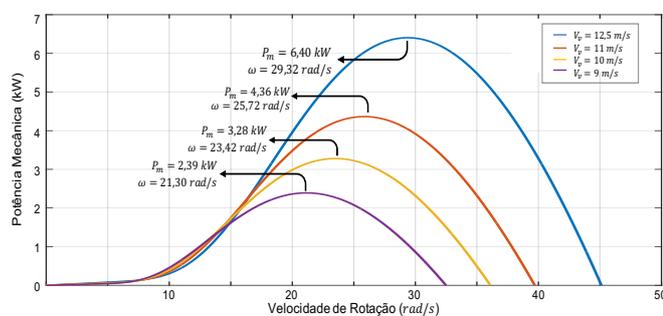


Fig. 5 Curvas de potência da TE.

A Fig 6 demonstra o comportamento dinâmico da potência mecânica transferida pela TE, mediante condições nominais de operação. Percebe-se que em regime permanente existe uma diferença entre a potência mecânica e a elétrica. Isso ocorre, devido às perdas mecânicas e resistências elétricas associadas à não idealidade do modelo do gerador.

É notado que os algoritmos de MPPT P&O e CI, mesmo após

encontrar o ponto de máxima potência, não se estabilizam em um valor de referência fixo, passando a oscilar ao redor do ponto encontrado. Uma das vantagens observadas ao se utilizar o MPPT-AS está no fato de que, após a sua convergência, uma referência de tensão fixa é fornecida à malha de tensão, resultando em uma menor oscilação em regime. Na Tabela 4 estão dispostos os resultados obtidos para cada algoritmo, possibilitando uma análise comparativa entre as técnicas.

A Fig 7 mostra o comportamento dinâmico da velocidade de rotação do eixo da TE (ω_m). No caso da velocidade de rotação da turbina, uma vez que não foi empregada caixa de engrenagem, esta é igual a velocidade mecânica de rotação do rotor do GSIP. Os valores podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 1. Parâmetros para simulação do conjunto Turbina e Gerador.

Velocidade nominal do vento	12,5m/s
Potência mecânica nominal	6kW
Tipo de imã permanente	Neodímio
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

A Fig 8 apresenta o comportamento estático das correntes de fase drenadas da rede elétrica pela PVE e seus valores são apresentados na Tabela 6. Por sua vez, as correntes injetadas na rede pelo inversor estão mostradas na Fig 12, bem como seus valores são apresentados na Tabela 7.

Tabela 2. Parâmetros dos conversores e do MPPT.

Indutores de filtragem	$L_{cm}, L_{RCr}, L_{cr} = 1,5 \text{ mH}$
Resistencia série dos indutores	$R_{Lcm}, R_{LRCr}, R_{Lcr} = 0,22 \Omega$
Capacitor de filtragem	$C_{cm} = 60 \mu\text{F}$
Ganho do modulador PWM	$K_{PWM} = 5,333 \cdot 10^{-4}$
Frequência de chaveamento	$f_s = 20 \text{ kHz}$
Tensão do Barramento CC	$V_{CC} = 530 \text{ V}$
Capacitância do Barramento	$C_{CC} = 9,4 \text{ mF}$
Pico da triangular do PWM	$P_{PWM} = 3750$
Taxa de amostragem da simulação	$T_A = 40 \text{ kHz}$
Passo de incremento MPPT-P&O/CI	2 V
Frequência amostragem MPPT-P&O	8 Hz
Frequência amostragem MPPT-CI	8 Hz
Frequência amostragem MPPT-AS	5 Hz
Temperatura inicial do MPPT-AS	25°
Temperatura final do MPPT-AS	$0,1^\circ$
Parâmetro auxiliar β do MPPT-AS	$0,6$

Tabela 3. Parâmetros de projeto e ganhos dos controladores PI.

Frequência de cruzamento da malha de corrente do RTCcm	$f_{cr,i} = 2.500 \text{ Hz}$
Margem de fase desejada da malha de corrente do RTCcm	$MF_{d,i} = 89^\circ$
Ganho proporcional da malha de corrente do controlador do RTCcm	$K_{Pi,RC} = 83,3348 \Omega$
Ganho integral da malha de corrente do controlador do RTCcm	$K_{Ii,RC} = 3,5077 \cdot 10^4 \Omega/s$
Frequência de cruzamento da malha de tensão do RTCcm	$f_{cr,v} = 800 \text{ Hz}$
Margem de fase desejada da malha de tensão do RTCcm	$MF_{d,v} = 89,6^\circ$
Ganho proporcional da malha de tensão do controlador do RTCcm	$K_{Pv,RC} = 0,3015 \Omega$
Ganho integral da malha de tensão do controlador do RTCcm	$K_{Iv,RC} = 10,5833 \Omega/s$
Frequência de cruzamento da malha de corrente do inversor e do RTCcr	$f_{cr,i} = 2.500 \text{ Hz}$
Margem de fase desejada da malha de corrente do inversor e do RTCcr	$MF_{d,i} = 89^\circ$
Ganho proporcional da malha de corrente inversor e do RTCcr	$K_{Pi,inv} = 83,3348 \Omega$
Ganho integral da malha de corrente do controlador do inversor e do RTCcr	$K_{Ii,inv} = 3,5077 \cdot 10^4 \Omega/s$
Frequência de cruzamento da malha de tensão do barramento CC	$\omega_{cr,v} = 7,5 \text{ Hz}$
Margem de fase desejada da malha de tensão do barramento CC	$MF_{d,v} = 89,7^\circ$
Ganho proporcional da malha de tensão do controlador barramento CC	$K_{Pv,bcc} = 0,7114 \Omega$
Ganho integral da malha de tensão do controlador do barramento CC	$K_{Iv,bcc} = 0,1755 \Omega/s$

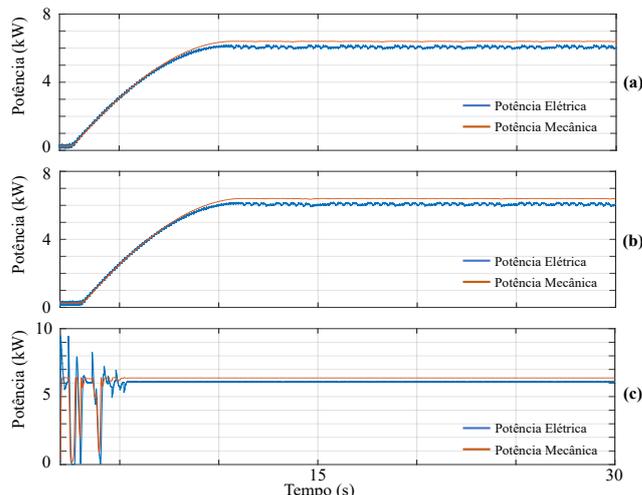


Fig. 6 Comportamento dinâmico da P_{mec} e P_e para $v_v = 12,5 \text{ m/s}$ algoritmo de MPPT: (a) P&O; (b) CI; (c) AS.

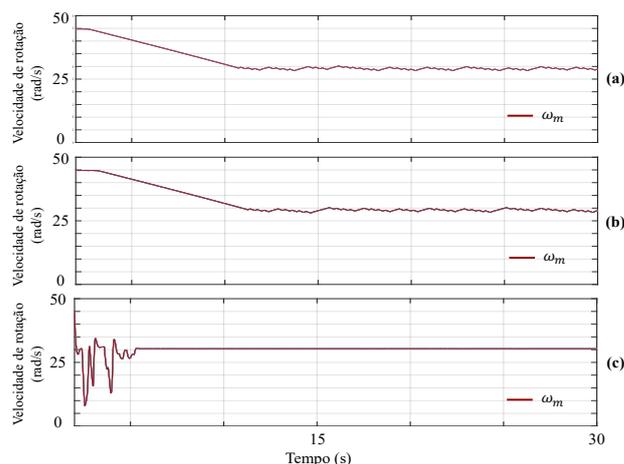


Fig. 7 Comportamento dinâmico de ω_m para $v_v = 12,5 \text{ m/s}$ algoritmo de MPPT: (a) P&O; (b) CI; (c) AS.

Tabela 4. Resultados obtidos em condições nominais de operação para os algoritmos adotados.

Grandeza	P&O	CI	AS
Potência mecânica (W)	6.398	6.395	6.375
Potência elétrica (W)	6.065	6.057	6.071
Oscilação em regime (%)	4,27	4,12	0,82
Tempo de convergência (s)	10,75	11,14	5,59

Tabela 5. Velocidade de rotação em condições nominais de operação para os algoritmos adotados.

Grandeza	P&O	CI	AS
$\omega_m \text{ (rad/s)}$	29,08	28,89	30,35

A fim de se avaliar as respostas dinâmicas do sistema, bem como dos algoritmos, em casos de mudanças na velocidade do vento, foram aplicados múltiplos degraus de entrada com velocidades de 11 m/s , 9 m/s e 10 m/s , sendo analisados os resultados gerados, comprovando a eficácia dos métodos de busca diante de tais transitórios. A potência mecânica da TE e a potência elétrica do GSIP foram analisadas, como pode ser conferido pela Fig 10 e quantitativamente pela Tabela 8.

A Fig 11 mostra o comportamento dinâmico da velocidade de

rotação da turbina, enquanto na Tabela 9 estão apresentados os valores encontrados para cada velocidade de entrada do vento aplicada. Nas Tabelas 10 e 11 estão os resultados das correntes drenadas e injetadas na rede, respectivamente, pela PVE.

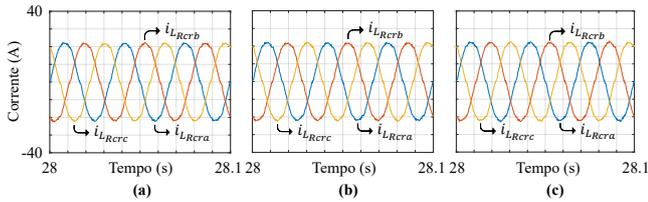


Fig. 8 Comportamento estático das correntes drenadas da rede $v_v = 12,5m/s$ algoritmos de MPPT: (a) P&O; (b) CI; (c) AS.

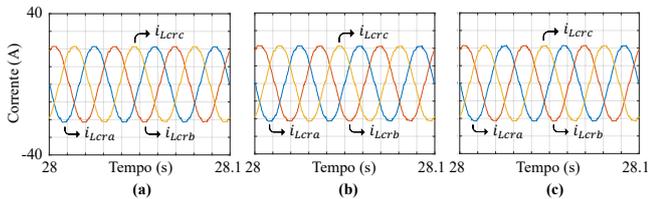


Fig. 9 Comportamento estático das correntes injetadas na rede $v_v = 12,5m/s$ algoritmos de MPPT: (a) P&O; (b) CI; (c) AS.

Tabela 6. Correntes eficazes de fase drenadas da rede em condições nominais para os algoritmos adotados.

Grandeza	P&O	CI	AS
$i_{LRcr_{a,ef}}$ (A)	15,86	15,84	15,88
$i_{LRcr_{b,ef}}$ (A)	15,86	15,84	15,88
$i_{LRcr_{c,ef}}$ (A)	15,86	15,84	15,88

Tabela 7. Correntes eficazes de fase injetadas na rede em condições nominais para os algoritmos adotados.

Grandeza	P&O	CI	AS
$i_{Lcra_{ef}}$ (A)	15,30	15,28	15,32
$i_{Lcra_{b,ef}}$ (A)	15,30	15,28	15,32
$i_{Lcra_{c,ef}}$ (A)	15,30	15,28	15,32

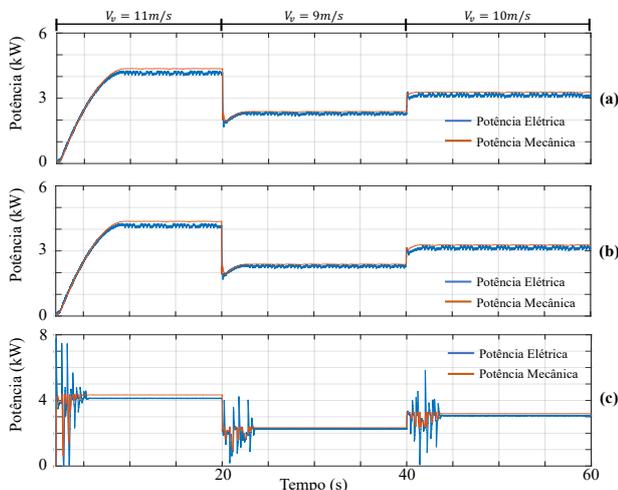


Fig. 10 Comportamento dinâmico da P_{mec} e P_e para condições de degraus no perfil da velocidade dos ventos para os algoritmos de MPPT: (a) P&O; (b) CI; (c) AS.

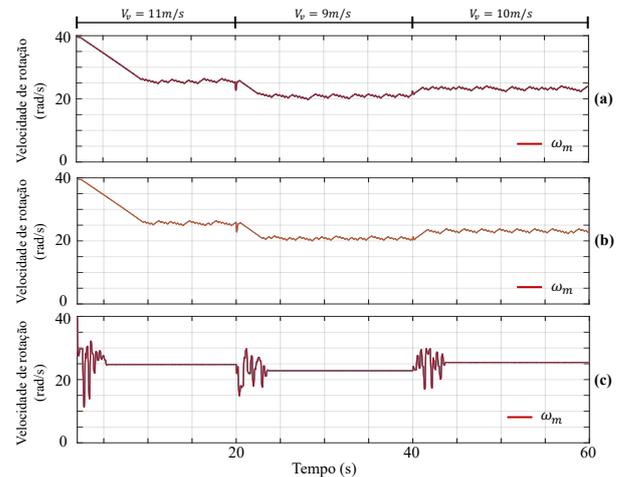


Fig. 11 Comportamento dinâmico de ω_m para condições de degraus no perfil da velocidade do vento para os algoritmos de MPPT: (a) P&O; (b) CI; (c) AS.

Tabela 8. Resultados obtidos para condições de degraus no perfil da velocidade do vento para cada algoritmo.

v_v	Algoritmo	Potência mecânica (W)	Potência elétrica (W)	Oscilação em Regime Permanente (%)
11 m/s	P&O	4.361	4.161	5,17
	CI	4.362	4.172	4,91
	AS	4.333	4.122	0,85
9 m/s	P&O	2.374	2.265	8,52
	CI	2.385	2.295	7,97
	AS	2.331	2.258	2,83
10 m/s	P&O	3.269	3.136	6,88
	CI	3.271	3.134	6,44
	AS	3.190	3.080	1,62

Tabela 9. Velocidade de rotação em condições de degraus no perfil da velocidade do vento para cada algoritmo.

Algoritmo	$v_v = 11 m/s$	$v_v = 9 m/s$	$v_v = 10 m/s$
P&O	26,01	20,46	22,91
CI	25,72	20,81	23,11
AS	24,78	22,81	25,43

Tabela 10. Correntes drenadas da rede em condições de degraus no perfil da velocidade do vento.

Algoritmo	Correntes (A)	$v_v = 11 m/s$	$v_v = 9 m/s$	$v_v = 10 m/s$
P&O	$i_{LRcr_{a,ef}}$	10,89	6,01	8,22
	$i_{LRcr_{b,ef}}$	10,89	6,01	8,22
	$i_{LRcr_{c,ef}}$	10,89	6,01	8,22
CI	$i_{LRcr_{a,ef}}$	10,92	6,03	8,22
	$i_{LRcr_{b,ef}}$	10,92	6,03	8,22
	$i_{LRcr_{c,ef}}$	10,93	6,03	8,22
AS	$i_{LRcr_{a,ef}}$	10,79	5,93	8,07
	$i_{LRcr_{b,ef}}$	10,79	5,92	8,08
	$i_{LRcr_{c,ef}}$	10,79	5,92	8,07

Tabela 11. Correntes injetadas na rede em condições de degraus no perfil da velocidade do vento.

Algoritmo	Correntes (A)	$v_v = 11 \text{ m/s}$	$v_v = 9 \text{ m/s}$	$v_v = 10 \text{ m/s}$
P&O	i_{Lcra_ef}	10,76	5,91	8,17
	i_{Lcrb_ef}	10,76	5,91	8,18
	i_{Lcrc_ef}	10,76	5,91	8,18
CI	i_{Lcra_ef}	10,80	6,01	8,17
	i_{Lcrb_ef}	10,80	6,01	8,17
	i_{Lcrc_ef}	10,80	6,01	8,17
AS	i_{Lcra_ef}	10,68	5,90	8,05
	i_{Lcrb_ef}	10,68	5,90	8,05
	i_{Lcrc_ef}	10,67	5,90	8,05

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo de uma plataforma virtual de emulação, envolvendo um sistema de geração de energia eólica. Este estudo se caracteriza como o passo inicial que visa fundamentar e dar suporte ao desenvolvimento de um emulador eólico eletrônico completo, o qual poderá ser utilizado como uma plataforma versátil no estudo de SGEE envolvendo GSIP com características distintas, uma vez que os modelos matemáticos do gerador e da turbina eólica podem ser adequados para aplicações de interesse. Implementada via software de simulação (Matlab[®]/Simulink), a PVE-SGEE foi capaz de reproduzir fielmente os comportamentos estáticos e dinâmicos de um SGEE baseado no GSIP considerando variações do vento. Além disso, pela estratégia apresentada, algoritmos de MPPT convencionais e metaheurístico puderam ser implementados e testados. Pode-se observar que para condições nominais, o algoritmo metaheurístico MPPT-AS teve melhor desempenho em relação aos algoritmos de MPPT convencionais P&O e IC. Já para condições adversas, o MPPT-CI mostrou-se superior no rastreamento do MPP. Como continuidade do trabalho pretende-se embarcar, em um controlador digital de sinais, os modelos que integram o SGR, de forma a gerar referências de corrente ao RTCcr, o qual compõe o conversor back-to-back conectado à rede elétrica.

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

Abdullah, M.A., Yatim, A.H.M., Tan, C.W., Saidur, R. (2012). A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, Issue 5, pp. 3220-3227.

Blaabjerg, F.; Ma, Ke. (2017). Wind energy systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 105, n. 11, p. 2116-2131.

Chen, Z., Hu, Y., Blaabjerg, F. (2007). Stability improvement of induction generator-based wind turbine systems. *Renewable Power Generation, IET*. Vol. 1, pp.81-93.

Deng, F., Chen, Z. (2009). Power control of permanent magnet generator based variable speed wind turbines. *International Conference on Electrical Machines and Systems*, pp. 1-6.

Fan, Y. et al. (2016). An Improved Simulated Annealing Maximum Power Point Tracking Technique for PV Array Under Partial Shading Conditions", *18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, pp. 1-8, Karlsruhe.

Garg, H.; Sharma, N.; Dahiya, R. (2018). Design and Simulation of Wind Turbine Emulator, *IEEE 8th Power India International Conference (PIICON)*, pp. 1-6.

Goldbarg, M.C.; Goldbarg, E.G.; Luna, H.P.L. (2016). *Otimização combinatória e metaheurísticas: algoritmos e aplicações*. 416p, Gen Ltc, ed. Algoritmos e Aplicações, Rio de Janeiro.

Heier, S. (1998). *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. John Wiley & Sons Ltd, 1a Edição, Nova Jersey, EUA.

Himani, Dahiya, R. (2016). Development of Wind Turbine emulator for standalone wind energy conversion system. *IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS)*, pp. 1-6.

Karakasis, N., Mesemanolis, A., Mademlis, C. (2012). Wind turbine simulator for laboratory testing of a wind energy conversion drive train. *8th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MEDPOWER)*, pp. 1-6.

Kumar, D.; Chatterjee, K. (2016). A review of conventional and advanced MPPT algorithms for wind energy systems. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, v. 55, p. 957-970.

Martinez, F., Herrero, L. Ca., de Pablo, S. (2014). Open loop wind turbine emulator, *Renewable Energy*, Vol. 63, pp. 212-221.

Ramanath, A., Deivanayagam, J. D. M., Raju, S., Mohan, N. (2018) An Extremely Low-Cost Wind Emulator, *IECON 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 1675-1680.

Sahin, A. D. (2004). Progress and recent trends in wind energy. *Progress in Energy Combustion Sci.*, vol. 30, no. 5, pp. 501-543.

Campanhol, L.B.G., Da Silva, S.A.O., Goedtel, A. (2014). Application of shunt active power filter for harmonic reduction and reactive power compensation in three-phase four-wire systems. *IET Power Electronics*, Vol. 7, pp. 2825-2836.

Thakur, Amarnath et al. (2016). A review on wind energy conversion system and enabling technology. *Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), International Conference on IEEE*, p. 527-532.

Wasynczuk, O., Krause, P. C., Sudhoff, S. D., Pekarek, S. D. (2002). *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, John Wiley & Sons, 3a Edição, Nova Jersey, EUA.

Wollz, D.H., Da Silva, S.A.O., Sampaio, L.P. (2020). Real-time monitoring of an electronic wind turbine emulator based on the dynamic PMSG model using a graphical interface, *Renewable Energy*, Vol. 155, pp. 296-308.