

# Rastreamento do ponto de máxima potência para o controle do retificador trifásico duplo boost intercalado em modo de condução descontínua com aplicação em gerador eólico de pequeno porte

Luís P. Custódio<sup>1</sup> Daniel F. Cortez<sup>2</sup> Amauri A. Assef<sup>3</sup>  
Roger Gules<sup>4</sup> Alceu A. Badin<sup>5</sup> Eduardo F. R. Romanelli<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, PPGSE, Av. Sete de Setembro, 3165 – Rebouças, 80230-901, Curitiba, Paraná, Brasil (e-mail: luiscustodio@alunos.utfpr.edu.br).

<sup>2</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, PPGSE/DAELT, Av. Sete de Setembro, 3165 – Rebouças, 80230-901, Curitiba, Paraná, Brasil (e-mail: danielcortez@utfpr.edu.br).

<sup>3</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, PPGSE/CPGEI/DAELT, Av. Sete de Setembro, 3165 – Rebouças, 80230-901, Curitiba, Paraná, Brasil (e-mail: amauriassef@utfpr.edu.br).

<sup>4</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, PPGSE/CPGEI/DAELT, Av. Sete de Setembro, 3165 – Rebouças, 80230-901, Curitiba, Paraná, Brasil (e-mail: rgules@utfpr.edu.br).

<sup>5</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, CPGEI/DAELT, Av. Sete de Setembro, 3165 – Rebouças, 80230-901, Curitiba, Paraná, Brasil (e-mail: badin@utfpr.edu.br).

<sup>6</sup>Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, PPGSE/DAELT, Av. Sete de Setembro, 3165 – Rebouças, 80230-901, Curitiba, Paraná, Brasil (e-mail: felix@utfpr.edu.br).

---

**Abstract:** This paper proposes the control of a double three-phase interleaved boost rectifier, operating in discontinuous conduction mode applied to a wind generator with 2 kW power rating, using the maximum power point tracking based on the perturb and observe method. In this study, the method uses a perturbation in the switching frequency and thus evaluates the power variation so that the rectifier operates at the maximum power point. The simulation was performed using the PSIM software with variations in the wind speed, showing that the method is functional and applicable for this topology.

**Resumo:** Este artigo propõe o controle de um retificador trifásico duplo *boost* intercalado operando em modo de condução descontínua aplicado em um gerador eólico com potência nominal de 2 kW, utilizando o rastreamento do ponto de máxima potência baseado no método de perturbar e observar. Neste estudo, o método usa uma perturbação na frequência de comutação e desta maneira, avalia a variação de potência para que o retificador opere no ponto de máxima potência. A simulação foi realizada através do *software* PSIM, com variações na velocidade do vento, demonstrando que o método é funcional e aplicável para esta topologia.

**Keywords:** Double three-phase interleaved *boost* rectifier; discontinuous conduction mode; wind turbine model; maximum power point tracking.

**Palavras-chaves:** Retificador trifásico duplo *boost* intercalado; modo de condução descontínua; modelo de turbina eólica; rastreamento do ponto de máxima potência.

---

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas houve um crescimento representativo nos estudos de energia eólica, abrangendo várias áreas do conhecimento, como, por exemplo: mecânica, elétrica, civil, ambiental, administração e gestão. Mais especificamente na área de eletrônica de potência, novas topologias de conversores têm sido propostas com a finalidade de otimizar a eficiência, rendimento e controle empregados em geradores eólicos (aerogeradores). Estes estudos abrem duas principais frentes de pesquisas no ramo de processamento de energia elétrica: desenvolvimentos de novos conversores que se adequem aos propósitos e ao comportamento da conversão de energia eólica (mecânica) em energia elétrica, sendo que esta

energia é dependente das características dos ventos no local, ou seja, é um sistema com alimentação intermitente. Outro ramo de estudo se concentra no controle destes conversores, objetivando extrair a máxima potência que o sistema pode proporcionar, trazendo outras vantagens, minimizando as quantidades e custos dos componentes, empregando diversas estratégias de controle.

As aplicações em aerogeradores têm uma gama variada de potência, de centenas de Watts à megawatts, sendo que sistemas de pequeno porte são destinados principalmente a aplicações de carregamento de baterias (Koutroulis e Kalaitzakis, 2006), alimentando pequenas cargas e locais isolados. Também podem ser conectados à rede elétrica, para geração de energia em residências e estabelecimentos com

possibilidade de operar com outras fontes de energia, como a solar, célula combustível, elementos armazenadores de energia, etc. As pesquisas envolvendo geradores eólicos de pequeno porte vêm ganhando influência principalmente em aplicações em ambientes urbanos e locais com velocidades de ventos menores (Dalala et al. 2013).

Neste contexto, é apresentada uma simulação do sistema com rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT) aplicado em um retificador trifásico *boost* intercalado em modo de condução descontínua, MCD, sendo alimentado por um gerador eólico de pequeno porte, composto por um gerador síncrono de ímãs permanentes, GSIP. A topologia do retificador utilizado neste trabalho foi baseada em Granza (2020), em sua versão não isolada e dimensionado para atender a potência deste gerador eólico.

Uma modelagem da turbina eólica foi utilizada para a simulação conjunta do gerador e do retificador, a qual demonstra o comportamento de uma turbina eólica de 3 pás com eixo horizontal, em função da variação da velocidade do vento e do ângulo de passo como variáveis de entrada.

## 2. MODELO DA TURBINA EÓLICA

A modelagem utilizada para representar a turbina eólica, possui referências em Heier e Waddington (2006) e Pinto (2014). Ela parte do cálculo da potência, existente da energia cinética do vento captada pela área varrida das pás da turbina,  $A_{pás}$ , por um período de tempo ( $J/s = W$ ). Sendo o ar um fluido, a massa específica do ar ( $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ , ao nível do mar) também influencia a potência do vento. A potência do vento é representada em (1). Observa-se que a velocidade do vento é uma grandeza elevada ao cubo, indicando que pequenas variações na velocidade do vento,  $v_{vento}$ , modifica consideravelmente a potência disponível.

$$P_{vento} = \frac{1}{2} \rho A_{pás} v_{vento}^3 [W] \quad (1)$$

Existe um limite teórico aerodinâmico para estas turbinas, que deve ser aplicado em (1). O termo  $C_p$  (coeficiente de potência) depende basicamente dos parâmetros construtivos de cada turbina, ou também, como a razão entre a potência mecânica desenvolvida pela turbina, pela potência do vento disponível. Este limite foi estudado pelo físico alemão Albert Johann Betz (1885-1968) em seu artigo: “*Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren*”. Contudo, outros pesquisadores estudaram esta limitação, sendo reconhecida também como limite de Lanchester-Betz-Joukowski (Pinto, 2014), na qual é encontrado na situação em que a razão entre as velocidades do vento a jusante e a montante da turbina é de 1/3, resultando em um valor de  $C_p$  igual a 0,5925. Ou seja, no máximo, 59,25% da potência do vento pode ser convertida em potência mecânica (este valor não considera as perdas dos componentes mecânicos e elétricos do sistema, assim como este é um coeficiente de potência e não de eficiência).

O desenvolvimento das equações utilizadas nesse trabalho pode ser acompanhado em Tibola (2009). O valor de  $C_p$ , em (2), é função dos seguintes parâmetros: ângulo de passo,  $\beta$  (*pitch angle*), em graus;  $\lambda$ , equacionado em (4), sendo a razão

entre a velocidade tangencial da ponta da pá e a velocidade do vento incidente (*Tip-Speed Ratio* - TSR), que depende da velocidade angular,  $\omega_t$ , em rad/s; raio da turbina,  $R$ , em metros; velocidade do vento, em m/s;  $x$  é um coeficiente de ajuste; e os coeficientes que compõe a equação, os quais estão dispostos na Tabela 1. Alguns autores propõem outros coeficientes, sendo que em Schmidlin e Lima (2016), são citados trabalhos com outros coeficientes que podem ter um ajuste melhor, dependendo da turbina analisada.

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 (C_2 \lambda' - C_3 \beta - C_4 \beta^x - C_5) e^{-C_6 \lambda'} + C_7 \lambda \quad (2)$$

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

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v_{vento}} \quad (4)$$

**Tabela 1. Coeficientes de Cp**

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	x
0,5	116	0,4	0	5	21	0,01	1,5

A Fig. 1 mostra curvas de  $C_p$  em função de  $\beta$ , variando o parâmetro  $\lambda$ , conforme (2). Observa-se que o maior valor de  $C_p$  é na curva em que  $\beta$  é igual a zero. De fato, este ângulo é modificado quando se deseja alterar o ângulo de ataque do vento, por consequência, modificando a potência absorvida pela turbina, sendo que este controle do ângulo de passo é mais utilizado em aerogeradores de maior porte (Danidhariya e Shah, 2013). Outra questão a ser observada, é que cada curva possui um valor máximo com seu respectivo valor de  $\lambda$ .

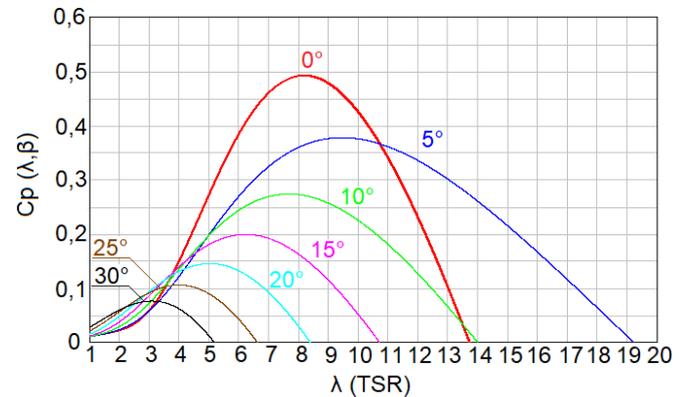


Fig. 1 Curvas de  $C_p$  em função de  $\beta$ , variando  $\lambda$ .

Neste estudo, o ângulo  $\beta$  será fixo e considerado zero (usual em turbinas de pequeno porte), utilizando o maior coeficiente de potência apresentado. Os máximos valores de cada curva podem ser obtidos pela derivada da função de  $C_p$  em relação à  $\lambda$  e igualada a zero. Desta maneira, para um ângulo  $\beta = 0^\circ$  e  $R = 1,6 \text{ m}$ :  $C_{p_{máx}} = 0,4916$  e  $\lambda_{ótimo} = 8,177$ .

Utilizando os dados da turbina deste estudo, conforme a Tabela 2, é possível plotar as curvas de potência [W] em função da velocidade do vento [m/s], variando a velocidade angular,  $\omega_{rotor}$  [rad/s], utilizando (5), como mostra a Fig. 2. Na mesma figura, foi plotada a curva de pontos máximos de cada curva, que tem como constantes  $C_{p_{máx}}$  e  $\lambda_{ótimo}$ , dada por

(6), representando a máxima potência que o sistema poderá fornecer, em função da velocidade do vento.

Para representar o torque envolvido, basta dividir a potência mecânica (5) pela velocidade angular, resultando em (7). A Fig. 3 mostra as curvas de torque em função da velocidade do vento, variando a velocidade angular.

Observa-se que a curva que representa o torque no ponto ótimo para  $C_{p_{m\acute{a}x}}$  e  $\lambda_{\acute{o}timo}$  é indicada por (8), a qual difere da curva de torque máximo que não produz a potência mecânica máxima.

**Tabela 2. Dados da turbina eólica**

Parâmetro	Valor	Unidade
Potência mec. (nominal)	2,422	kW
Raio da turbina	1,6	m
Área varrida pelas pás da turbina	8,042	m <sup>2</sup>
Velocidade do vento (p/ Pot. nominal)	10	m/s

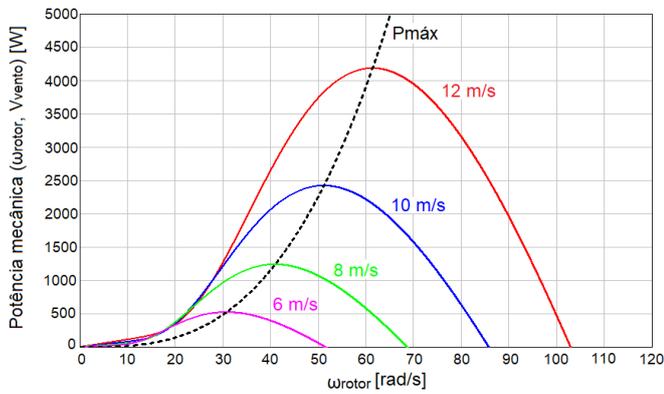


Fig. 2 Curvas de potência em função da velocidade do vento, variando  $\lambda$ .

$$P_{mec}(\omega_{rotor}, v_{vento}) = \frac{1}{2} \rho A v_{vento}^3 C_p(\omega_{rotor}, v_{vento}) \quad (5)$$

$$P_{mec_{m\acute{a}x}}(\omega_{rotor}) = \frac{1}{2} \rho A C_{p_{m\acute{a}x}} \left( \frac{R^3 \omega_{rotor}^3}{\lambda_{\acute{o}timo}^3} \right) \quad (6)$$

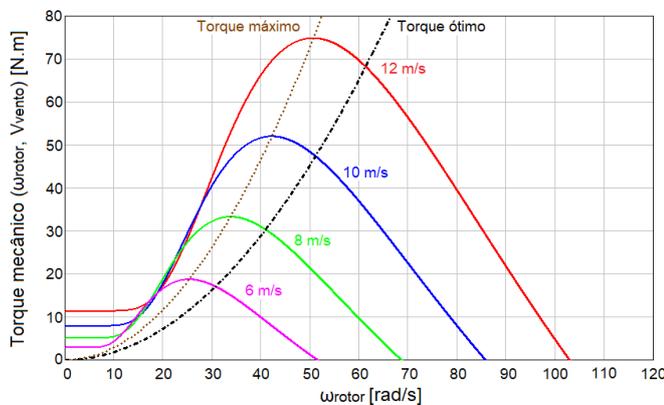


Fig. 3 Torque mecânico em função da velocidade do vento variando  $\omega_{rotor}$ .

$$T_{mec}(\omega_{rotor}, v_{vento}) = \frac{P_{mec}}{\omega_{rotor}} = \frac{\frac{1}{2} \rho A v_{vento}^3 C_p(\omega_{rotor}, v_{vento})}{\omega_{rotor}} \quad (7)$$

$$T_{mec_{\acute{o}timo}}(\omega_{rotor}, v_{vento}) = \frac{P_{mec_{m\acute{a}x}}}{\omega_{rotor}} = \frac{\frac{1}{2} \rho A C_{p_{m\acute{a}x}} \left( \frac{R^3 \omega_{rotor}^3}{\lambda_{\acute{o}timo}^3} \right)}{\omega_{rotor}} \quad (8)$$

### 3. DESCRIÇÃO DA TOPOLOGIA DO RETIFICADOR

O retificador de estudo possui uma topologia baseada no trabalho de Nabae, Nakano e Arai (1994), em que fora proposto um retificador de alto fator de potência (fornecendo assim a máxima potência ativa e reduzindo as perdas no gerador), na configuração trifásica, possuindo um divisor capacitivo na entrada, formando um neutro virtual, conectado a dois interruptores comutando de forma complementar entre si, obtendo assim, dois *boost* intercalados, como mostra a Fig. 4(a). Possui como principais características, menores esforços de corrente nos interruptores, eliminação do filtro de entrada, baixa geração de EMI (*Electromagnetic Interference*), comutação suave, menor distorção de baixa frequência na corrente de entrada e menores esforços de tensão. Além destas características, a integração de um conversor isolado, em uma estrutura de estágio único é possível, originando outras topologias (como o retificador Tapei) com o aproveitamento do braço de comutação para estruturas *Half-Bridge*, *Full-Bridge* ou também multiníveis.

Desta forma, o retificador de estudo tem como base principal este retificador Nabae, como é conhecido na literatura, com a substituição do capacitor de saída por dois capacitores e dois diodos, conforme a Fig. 4(b). Isso permite que trabalhe em 3 níveis, obtendo também, dois *boosts*, operando de forma intercalada, mantendo as mesmas vantagens do retificador original, além de reduzir os esforços de tensão nos interruptores para a metade do barramento de saída, permitindo saída simétrica e maior flexibilidade na parte de modulação. Essa topologia possibilita o uso do PWM (*Pulse Width Modulation*) convencional (razão cíclica igual, dentro dos limites do *boost*, com comando defasado de 180°), e PWM assimétrico (razão cíclica entre 0 e 0,5 em um interruptor e no outro, o complemento), ou também, como é usado neste trabalho, a modulação por frequência (variando a frequência de comutação), com razão cíclica fixa em 0,5.

A escolha pela modulação na frequência se deve ao propósito da aplicação deste retificador, pois tendo como fonte de entrada um aerogerador, a tensão de entrada é proporcional à velocidade do vento incidente, e para os momentos de baixa incidência de ventos, a rotação da máquina, tensão e potência diminuem, fazendo com que a frequência de comutação não tenha grandes variações. Além disso, o circuito mantém uma característica mais simétrica, com as mesmas tensões nos capacitores de saída e esforços nos componentes.

A célula de comutação, neste caso, foi substituída pela associação série *Full-Bridge* de interruptores, como indicada na Fig. 4(c), escolha esta que permite uma operação mais simétrica e completa.

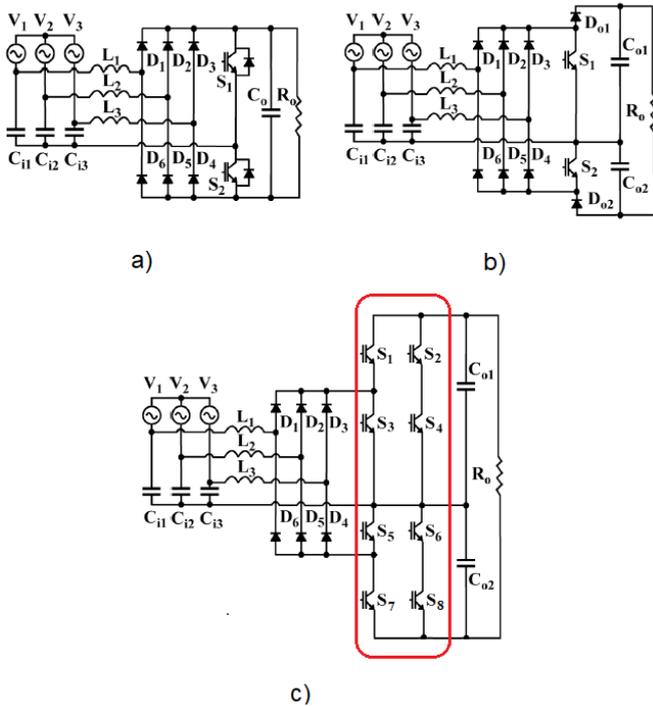


Fig. 4 (a) Retificador trifásico Nabae original, (b) modificado para operar em 3 níveis e (c) associação série Full-Bridge.

A condução em modo descontínuo foi escolhida para este retificador também devido ao seu propósito, por ser uma geração de energia por meio de um gerador eólico de pequeno porte, obtendo elevado fator de potência, controlando com apenas uma malha de frequência e tornando o controle mais simplificado. O uso do retificador duplo na entrada diminui os esforços de corrente, sendo que as correntes elevadas são vistas como um limitante para este modo de condução, e desta maneira, permite elevar a potência do retificador sem comprometer o rendimento.

Foi adicionada uma segunda ponte retificadora trifásica na entrada, de modo que as correntes nos indutores de entrada apresentam uma defasagem de  $180^\circ$  entre as pontes retificadoras. Embora haja aumento do número de componentes, seus esforços são divididos, reduzindo perdas e ondulação na entrada. O circuito completo utilizado para a simulação é mostrado na Fig. 5.

#### 4. DESCRIÇÃO DO CIRCUITO

Um circuito protótipo baseado na Fig. 5, foi desenvolvido no software Altium v.19 (Apêndice A) e está em fase de montagem para os testes em bancada, para a implementação e comparação de outros métodos de MPPT. Nesta simulação, a modelagem do aerogerador é traduzida em blocos, que podem ser vistos na Fig. 6, nos quais foram implementados (2) e (3).

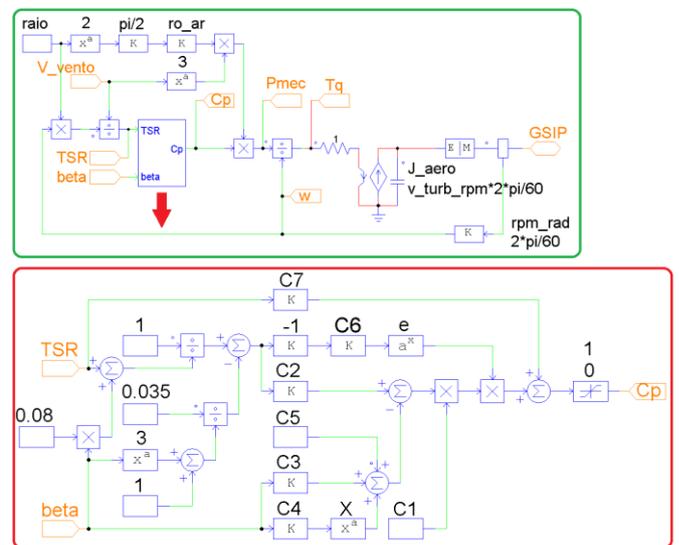


Fig. 6 Blocos do PSIM para o modelo de turbina eólica.

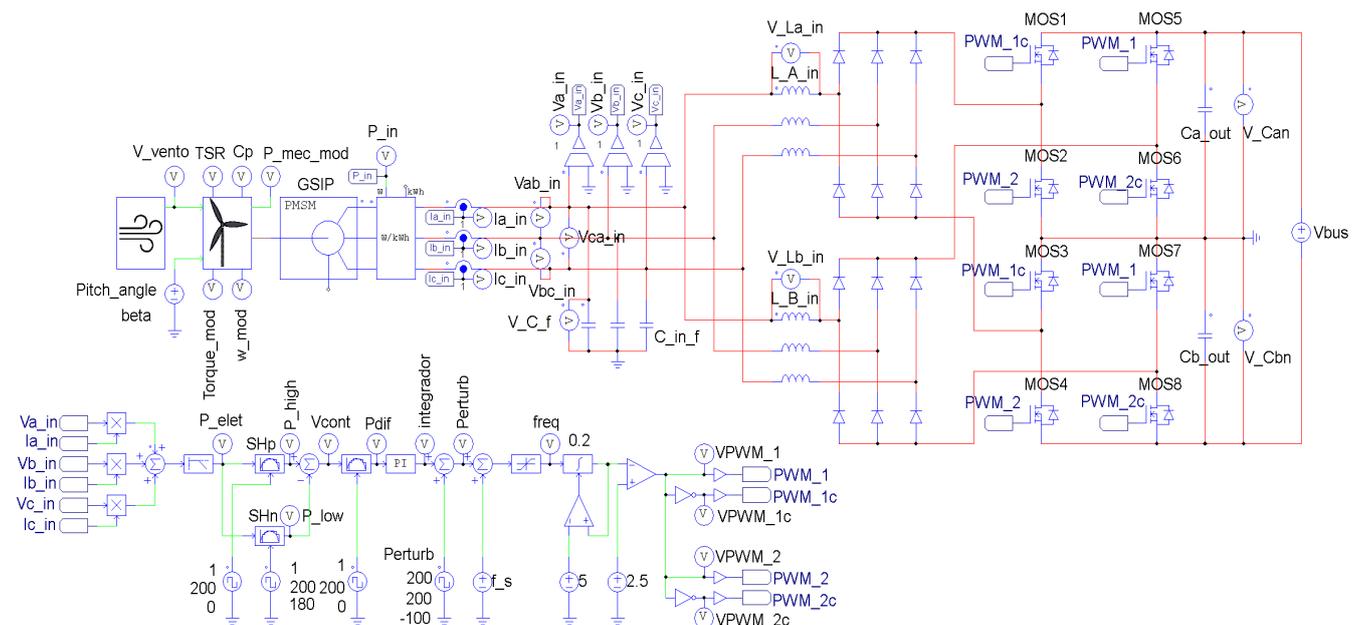


Fig. 5 Circuito de simulação no PSIM.

Para que houvesse a realimentação da velocidade angular do rotor, utilizou-se um circuito equivalente, apresentado por Tibola (2009) (modelo de corrente no capacitor para o torque utilizado pelo PSIM) com a fonte de corrente e um capacitor de valor igual ao momento de inércia do GSIP, com um valor inicial para que o sistema consiga inicializar, e a saída é conectada ao GSIP. As especificações utilizadas para a simulação do GSIP e do retificador estão dispostas na Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente.

**Tabela 3. Especificação do GSIP**

Tensão ef. de linha (terminais)	$V_{lef}$	100	V
Número de polos	$n_{polos}$	14	polos
Frequência da tensão (nominal)	$f_g$	56,94	Hz
Potência elétrica (nominal)	$P_{elet}$	2	kW
Vel. ang. mec. (nominal)	$\omega_m$	51,11	rad/s
Vel. mec. (nominal)	$v_m$	488	rpm
Torque (nominal)	$T_g$	47,38	N.m
Resistência do estator	$R_s$	1,05	$\Omega$
Indutância (direta=quadrat.)	$L_d=L_q$	2	mH

**Tabela 4. Especificação do retificador**

Tensão eficaz de linha na entrada	$V_{lef}$	100	V
Tensão eficaz de fase na entrada	$V_{fef}$	57,74	V
Tensão de saída (barramento)	$V_{bus}$	400	V
Frequência de comutação (nom.)	$f_s$	21	kHz
Indutância de entrada (indiv.)	$L_{in}$	83	$\mu$ H
Capacitância de entrada (indiv.)	$C_{in}$	2	$\mu$ F
Capacitância de saída 2x (indiv.)	$C_{out}$	470	$\mu$ F

O GSIP é conveniente para esta aplicação, pois é capaz de operar com velocidades mais baixas sem grandes perdas em sua eficiência, evitando o uso de caixa de engrenagens (gear-box), adaptando-se bem as variações de frequência induzidas pela velocidade dos ventos (Mirecki, Roboam e Richardeau, 2007).

## 5. MÉTODO DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Existem diversos métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (PMP), sendo que as principais características de implementação são: custos, complexidade, velocidade de convergência e estabilidade no rastreamento. O método utilizado é baseado no algoritmo conhecido na literatura como Perturba e Observa (P&O) comumente utilizado em sistemas fotovoltaicos. Porém, quando aplicado em sistemas eólicos é conhecido como método de busca por escalada (*Hill Climbing Searching method* - HCS), sendo basicamente o mesmo princípio de rastreamento do ponto de máxima potência (de certa maneira, “escalando” a curva de potência) utilizando apenas informações de grandezas elétricas do sistema (tensões e correntes).

A Fig. 7 mostra que a curva de potência possui um ponto máximo e para alcançá-lo, é verificado, por meio de uma perturbação, se o sistema alcançou ou não o PMP. A derivada

então é positiva se o ponto estiver na parte esquerda da curva; negativa na parte direita; e zero, no PMP.

Este método é considerado simples e flexível, não necessitando de informações prévias das características mecânicas do aerogerador (como a velocidade ou torque da máquina, curvas de potência e  $\lambda_{ótimo}$ ) ou de medições de vento. Esta técnica pode ser implementada, por exemplo, variando a velocidade rotacional e verificando a potência mecânica; a tensão de entrada e potência de saída, ou também; a razão cíclica e a potência de saída (Grisales, Lemus e Serna, 2014).

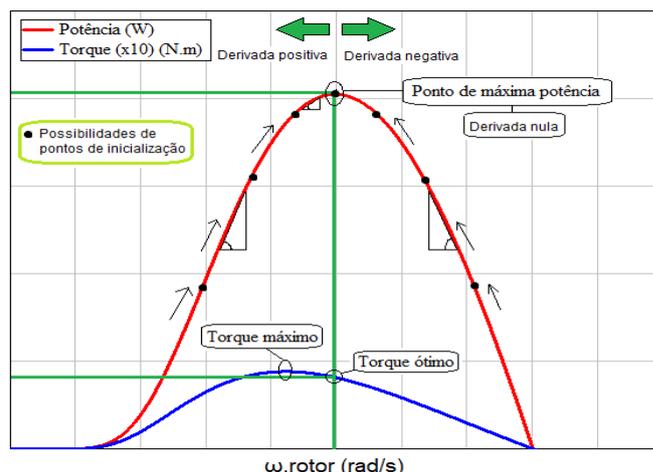


Fig. 7 Localização do ponto de operação em relação ao ponto de máxima potência.

O sistema mecânico pode ser representado de maneira simplificada (desconsiderando atritos) por (9), em que  $T_m$  e  $T_e$  são os torques mecânico e elétrico, respectivamente,  $J$  é o momento de inércia do sistema (turbina e gerador) e  $\omega$  é a velocidade angular.

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} \quad (9)$$

Percebe-se que quando o torque elétrico for maior que o mecânico, a derivada da velocidade se torna negativa, ou seja, a velocidade do sistema diminui, ao passo que, se o torque mecânico for maior que o elétrico, a derivada é positiva, e então o sistema acelera. Este efeito pode ser utilizado para a perturbação do sistema, de modo que para variar a velocidade, o controle pode aumentar ou diminuir a tensão/corrente do circuito pela razão cíclica (Dalala et al. 2013).

Uma frequência alta de amostragem pode ter um efeito errôneo na direção do rastreamento, pois depende da inércia (dinâmica) do sistema frente às variações rápidas de velocidade do vento, de modo que a frequência de amostragem deve ser relativamente mais baixa para um rastreamento mais estável. Entretanto, frequências baixas de amostragem podem não rastrear corretamente as variações mais bruscas de velocidade, diminuindo assim, a eficiência do sistema (Kot, Rolak e Malinowski, 2013). O método tradicional de perturbar e observar possui esta desvantagem na velocidade de convergência, que depende do tamanho do passo determinado: passos largos tornam o sistema mais

rápido, porém oscilatório no ponto de máxima potência (PMP), diminuindo a eficiência do sistema, como na Fig. 8(a). Por outro lado, passos menores, diminuem a velocidade de conversão, porém aumenta a eficiência do sistema, diminuindo a oscilação em torno do PMP, como na Fig. 8(b).

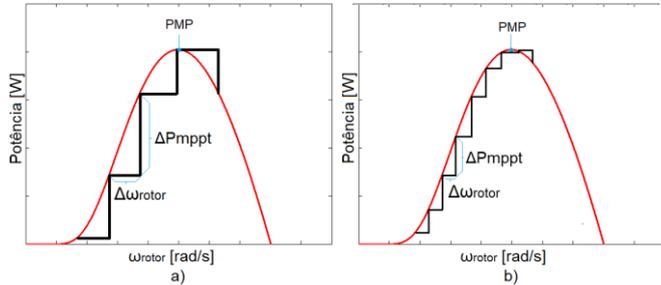


Fig. 8 Efeito do passo realizado pelo algoritmo: (a) passos mais largos; (b) passos mais curtos.

Uma das maneiras de aperfeiçoar o método é ajustando o tamanho do passo de perturbação em função da derivada (taxa de variação entre uma amostra e outra do parâmetro analisado), sendo que quanto menor a derivada, menor o passo; e se a derivada for maior; o passo será proporcional a esta variação. Outras alternativas de controle como em Dalala et al. (2013) e Mirecki, Roboam e Richardeau (2007), propõem técnicas para o ajuste do tamanho destes passos usando também redes neurais e lógica *Fuzzy*, sendo abordado por Abdullah et al. (2012). Desta forma, quando a derivada for igual a zero, o sistema alcançou o ponto de máxima potência.

### 5.1 Método de MPPT utilizado

O método para o rastreamento do PMP é baseado no trabalho de Tibola (2009), sendo basicamente, o algoritmo da técnica de perturbar e observar. Seguindo o fluxograma do algoritmo mostrado na Fig. 9, foi implementado o circuito de controle mostrado também na Fig. 5

Desta forma, é realizada uma leitura da potência (tensões e correntes dos sensores de entrada) no primeiro momento. Esta potência é amostrada na mesma frequência e fase da perturbação quadrada inserida na leitura. Assim, o bloco de amostragem e retenção (*Sample and Hold - SH*)  $SH_{high}$  armazena o valor da potência quando a perturbação é positiva, e o  $SH_{low}$  armazena o valor da potência quando a perturbação é negativa. O bloco somador faz o cálculo da diferença entre estes valores amostrados (podendo ser positivo, negativo ou zero) e então, passa pelo bloco integrador, que produz uma rampa crescente (se o sinal resultante for positivo), uma rampa decrescente (se o sinal for negativo) ou uma reta (para a diferença nula entre as potências, indicando que o sistema está operando na máxima potência). Este sinal do integrador é usado como referência para o valor médio do sinal da frequência que será enviada para o comando dos interruptores. Um sinal de onda quadrada é inserido como uma perturbação e assim o ciclo se reinicia. Este sinal é somado com o valor de frequência que o circuito foi projetado no seu valor nominal, neste caso de 21 kHz, e então, inserido em um circuito comparador, com

um integrador para gerar uma rampa que produza um sinal com razão cíclica fixa de 0,5, e assim, ajustando somente a frequência de operação. Por fim, um sinal com razão cíclica fixa de 0,5, e frequência variável pela perturbação conforme o ponto de operação do sistema, é enviado para os interruptores, com sinais PWM\_1 e PWM\_2 em fase, e seus complementares PWM\_1c e PWM\_2c, respectivamente.

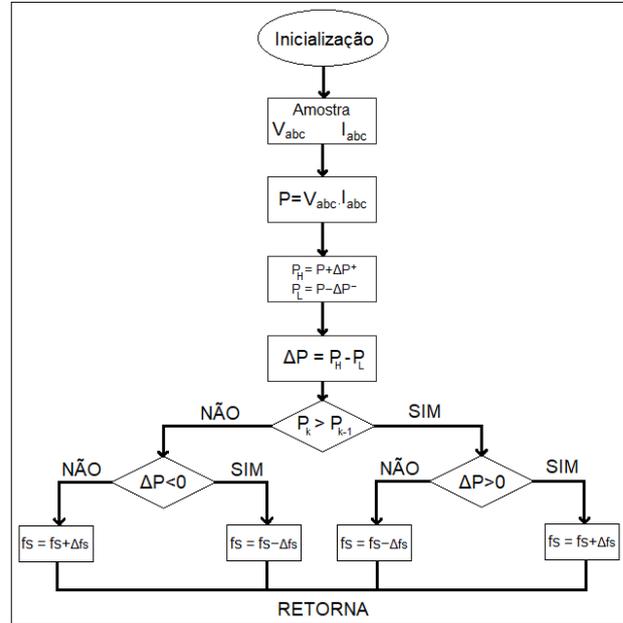


Fig. 9 Fluxograma do método de rastreamento do ponto de máxima potência.

## 6. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A simulação foi realizada com a estrutura e o circuito de controle e comando dos sinais para os interruptores da Fig. 5. e com os dados da Tabela 3 e Tabela 4. Para efeito de simulação, o momento de inércia do GSIP, foi ajustado para um valor menor ( $J = 0,02 \text{ kg.m}^2$ ), cerca de 100 vezes o valor de um sistema real deste porte. Este ajuste foi feito devido ao processamento utilizado pelo PSIM, que demanda um tempo muito maior de simulação, para verificar a atuação do método frente às variações de vento (grandeza de entrada) e o sistema atingir o regime.

A frequência de perturbação é inversamente proporcional com a inércia mecânica do sistema. Para um valor maior de inércia, a perturbação poderá ter um valor menor, encontrando assim um novo ponto de operação. Para frequências mais altas, pode ocorrer da potência mecânica não variar, pois não terá tempo de encontrar um novo ponto de operação estável antes da próxima perturbação. Para frequências muito baixas, a dinâmica do sistema pode se tornar mais lenta (Tibola, 2009). Assim, foi arbitrado o valor de 200 Hz tanto para a frequência de amostragem quanto para frequência de perturbação.

As velocidades de vento na entrada do bloco da turbina eólica foram simuladas em um período total de 2 s, conforme mostra a Fig. 10. Embora não existam degraus na velocidade do vento, tal como dificilmente os ventos mantenham valores

constantes, foram simuladas estas situações para observar a dinâmica do controle de MPPT. Optou-se por verificar, em simulação, o comportamento do sistema, com variações do vento para mais 2 m/s e para menos 2 m/s, em torno da velocidade nominal do gerador eólico (10 m/s).

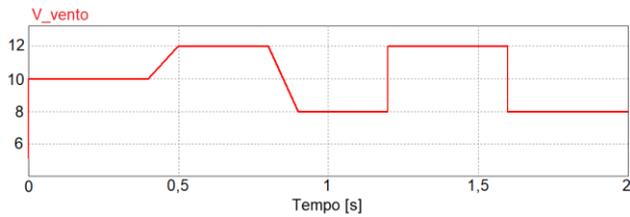


Fig. 10 Variação da velocidade do vento.

Na Fig. 11(a) é mostrada a corrente e tensão na fase A dos terminais do GSIP em função da mudança na velocidade do vento, observando também a variação da frequência, mantendo um fator de potência praticamente unitário (0,99). Na mesma figura, em (b), verifica-se que o retificador opera em MCD, visto em detalhe a corrente nos indutores de entrada, assim como, a defasagem em 180° entre as correntes de cada ponte retificadora. Na Fig. 12 são mostradas as tensões nos capacitores as quais se mantêm equilibradas, verificando a simetria dos sinais.

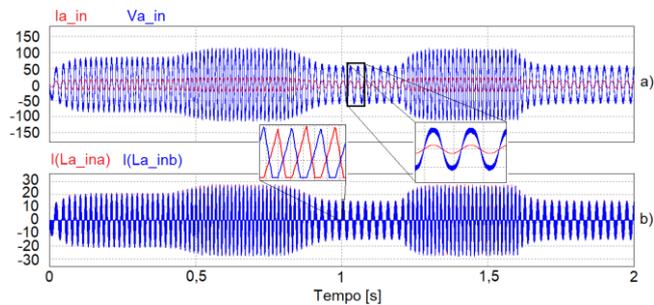


Fig. 11 (a) Corrente e tensão de entrada na fase A e (b) corrente nos indutores de entrada.

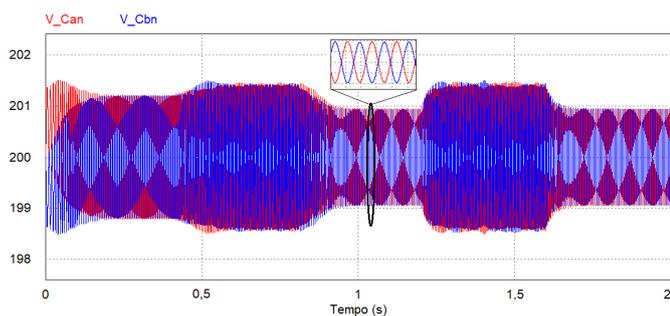


Fig. 12 Tensão nos capacitores de saída.

Observando o torque e a velocidade angular na Fig. 13, sendo que a potência mecânica ( $P_{mec\_mod}$ ) é o produto destas duas grandezas, verifica-se que existe uma semelhança no comportamento da potência, como é possível analisar pela Fig. 14. Esta figura mostra também a potência elétrica ( $P_{elet}$ ) e os detalhes das perturbações positivas ( $P_{high}$ ) e negativas ( $P_{low}$ ) que o circuito de MPPT produz para alcançar o PMP em cada variação de velocidade do vento. Os pontos em que o sistema recebe um degrau de velocidade

mostram um comportamento mais brusco nessa mudança, como é visto também na Fig. 15, na qual o  $C_p$  varia pouco nas outras mudanças mais suaves de velocidade. Porém, como já foi mencionado, este degrau na velocidade do vento foi realizado apenas para analisar o comportamento do sistema.

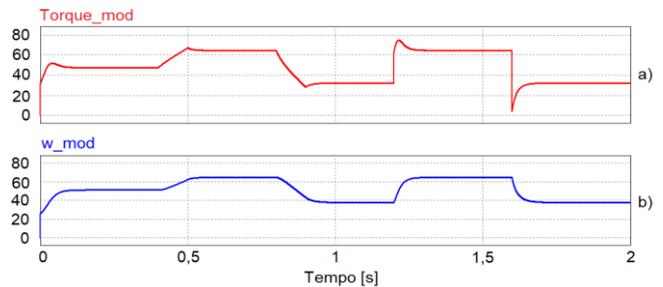


Fig. 13 (a) Torque e (b) velocidade angular.

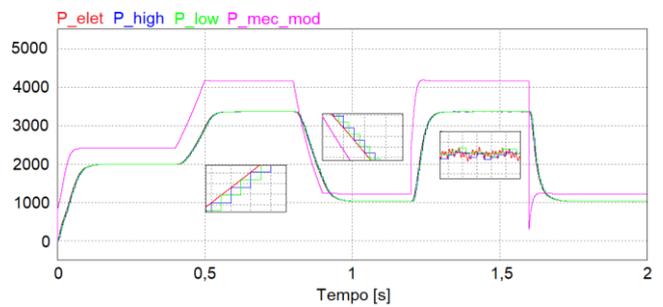


Fig. 14 Potência mecânica, elétrica e detalhes dos passos de potência.

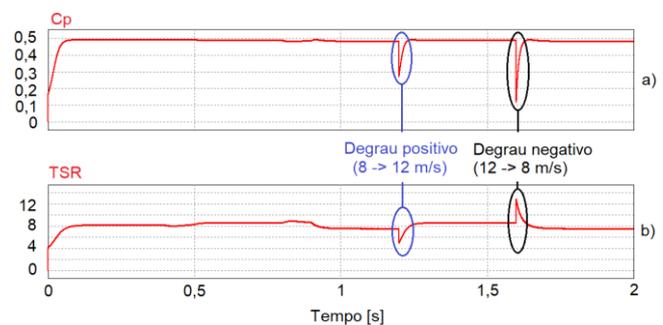


Fig. 15 (a) Coeficiente de potência e (b) TSR.

A Fig. 16 (a) apresenta a variação da frequência de comutação que varia entre 21 a 22,8 kHz, e em (b), os sinais de controle do integrador e da perturbação em detalhes.

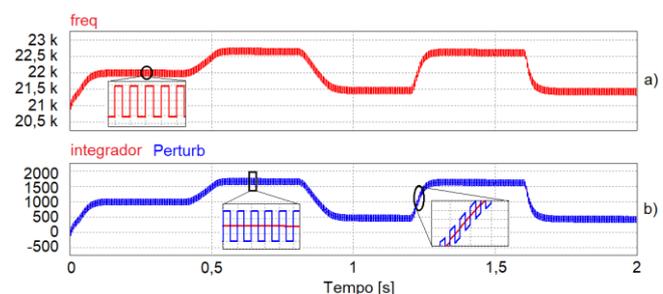


Fig. 16 (a) Frequência de comutação e (b) sinais do integrador e da perturbação.

A Tabela 5 traz o resumo dos valores calculados e simulados, conforme a variação da velocidade do vento.

**Tabela 5. Comparação dos resultados teóricos e simulados**

Parâmetros	Calculado (teórico)			Simulação		
	Velocidade (m/s)			Velocidade (m/s)		
	8	10	12	8	10	12
Pot. Mec. (W)	1240	2422	4185	1217	2422	4155
Pot. Elét. (W)	1024	2000	3456	1023	2000	3364
Vel. Ang. (rad/s)	40,89	51,11	61,33	37,73	51,11	64,34
Torque (N.m)	30,33	47,38	68,23	32,26	47,39	64,57
FP	1	1	1	0,992	0,993	0,993
$C_p$	0,492	0,492	0,492	0,483	0,492	0,488
TSR ( $\lambda$ )	8,177	8,177	8,177	7,547	8,177	8,579

## 7. CONCLUSÕES

A proposta de rastrear o ponto de máxima potência para esta topologia deste retificador se mostrou satisfatória pela utilização do circuito de MPPT indicado, ao perturbar a frequência de comutação e verificar em qual ponto da curva de potência o sistema está operando, e então, levá-lo ao ponto de máxima potência disponível. O modelo de blocos utilizado para a simulação da turbina eólica se ajustou ao propósito, embora com pequenas divergências para as potências diferentes da nominal que não prejudicaram a análise do rastreamento do PMP. Outro método poderia ser utilizado em conjunto para controlar a velocidade e assim, manter o TSR mais constante.

Verificou-se que existe uma diferença entre as potências mecânica e elétrica, obtendo uma eficiência média de conversão em torno de 83%. Este valor está relacionado com os parâmetros utilizados para simular o GSIP, já que existem perdas no modelo do gerador utilizado (como a resistência do estator), e não propriamente com o método utilizado. A modulação por frequência, neste caso, mostrou uma variação reduzida da frequência de comutação (21 a 22,8 kHz) mantendo o modo de condução descontínua. A operação com razão cíclica fixa em 0,5 permite o comando de todos os interruptores com um único transformador de pulso. Este retificador opera com fator de potência (FP) próximo do unitário (0,99) e corrente de entrada com baixa ondulação sem utilização de filtros adicionais, apresentando comutação suave e isolamento galvânica em uma estrutura de estágio único.

De todo o modo, o circuito apresentado conseguiu rastrear os pontos de máxima potência em função da variação da velocidade do vento, mostrando-se um método simples e flexível de ser aplicado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa NHS Sistemas Eletrônicos pelo apoio financeiro ao projeto através do Termo de Cooperação Técnica 13/2018.

## 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. *Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3220-3228.
- Dalala, Z. M., Zahid, Z. U., Yu, W., Cho, Y., Lai, J. (2013). Design and Analysis of an MPPT Technique for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 3, pp.756-767.
- Granza, M. (2020). Conversores CA-CC multiníveis do tipo boost com elevado fator de potência e operação em condução descontínua: estudo de topologias monofásicas, trifásicas, não isolados e isoladas. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, PR.
- Grisales, L. T., Lemus, C. G., Serna, S. (2014). Overall Description of Wind Power Systems. *Ingeniería y Ciencia*, vol. 10, no. 19, pp. 99–126.
- Heier, S., Waddington, R. (2006). *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*. 2 ed., Wiley, Chichester, West Sussex, Hoboken, New Jersey.
- Kot, R., Rolak, M., Malinowski, M. (2013). Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine. *Mathematics and Computers in Simulation*, Warsaw University of Technology, Warsaw, Poland.
- Koutroulis, E., Kalaitzakis, K. (2006). Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 2, pp. 486-494.
- Mirecki, A., Roboam, X., Richardeau, F. (2007). Architecture Complexity and Energy Efficiency of Small Wind Turbines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 660-670.
- Nabae, A., Nakano, H., Araki, S. (1994). Novel sinusoidal converters with high power factor. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 2, pp. 775-780.
- Pinto, M. O. (2014). *Fundamentos de Energia Eólica*. 1. ed., LTC, Rio de Janeiro.
- Schmidlin Jr, C. R., Lima, F. K. A. (2016). Wind Turbine and PMSG Dynamic Modelling in PSIM. *IEEE Latin America Transactions*. vol. 14, no. 9, pp. 4115-4120.
- Tibola, G. (2009). Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de máxima potência. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

## Apêndice A. Layout 3D do protótipo do retificador

