

UM SISTEMA PARA A CONEXÃO DE AEROGERADORES DE PEQUENO PORTE À REDE ELÉTRICA

Vanderlei Cardoso, Rafael H. Eckstein, Telles B. Lazzarin
Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis - SC, Brasil
e-mail: vanderlei.cardoso@hotmail.com.br, eckstein.rafael@gmail.com, telles@inep.ufsc.br

Resumo – Este artigo apresenta um sistema para conexão de turbinas eólicas de pequeno porte à rede elétrica, o qual controla a corrente injetada na rede e rastreia a máxima potência elétrica do gerador. O sistema proposto é composto por uma ponte retificadora trifásica do tipo Ponte de *Graetz*, um conversor CC-CC tipo *Forward*, que proporciona isolamento, controle e ganho, e um inversor *Full-Bridge*, que comuta em baixa frequência, com intuito de inverter a corrente do conversor CC-CC e injetá-la na rede elétrica. A solução proposta é baseada em simplicidade, baixo custo, volume reduzido e robustez. O texto apresenta a análise da topologia, princípio de operação, modelos dinâmicos, estrutura de controle e resultados experimentais para um aerogerador de 1 kW conectado à rede elétrica (220 V/60 Hz).

Palavras Chave - Aerogerador de Pequeno Porte, Conexão com a Rede Elétrica, *Forward*, *Full-Bridge*.

A SYSTEM FOR CONNECTION TO THE GRID OF SMALL WIND TURBINES

Abstract – This paper proposes a system to connect a small wind turbine into the electric grid, which controls the current injected into the mains and tracks the maximum power of the generator. The proposed system is based on a three-phase diode bridge rectifier, a DC-DC *Forward* converter that provides electrical isolation, gain and control, and a *Full-Bridge* inverter that is switched at low frequency to invert the current from the DC-DC power converter and inject it into the electrical grid. The solution is based on simplicity, low cost, low size and the potential to be robust. The analysis of the topological states, principle of operation, dynamic models, controller structures, simulation results and experimental results for a 1 kW system connected to the mains (220 V/60 Hz) are presented herein.

Keywords – *Forward*, *Full-Bridge*, Small Wind Turbine, Grid Connection.

NOMENCLATURA

β	Ângulo da pá.
λ	<i>Tip speed ratio</i> .
ω	Velocidade angular.
C_i	Compensador de corrente.
C_v	Compensador de tensão.
C	Capacitância.
CC	Corrente contínua.
C_p	Coefficiente de Potência de <i>Betz</i> .

D_x	Diodos.
D	Razão cíclica.
G_i	Planta de corrente.
G_v	Planta de tensão.
i_L	Corrente no indutor.
i_C	Corrente no capacitor.
I_{LGi}	Corrente da planta.
i_o	Corrente na saída.
I_g	Corrente na saída do gerador.
I_{grid}	Corrente na rede elétrica.
I_{ref}	Corrente de referência.
I_{sense}	Sinal de corrente medido pelo sensor.
k_i	Ganho do sensor de corrente.
k_v	Ganho do sensor de tensão.
L	Indutância.
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> .
n	Relação de transformação.
P_m	Potência Mecânica.
P_o	Potência de saída.
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> .
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i> .
s_x	Interruptores.
SWT	<i>Small Wind Turbine</i> .
t	Tempo.
TEPP	Turbinas eólicas de pequeno porte.
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> .
v	Velocidade linear do vento.
V_{ci}	Sinal de controle de corrente.
V_{cv}	Sinal de controle de tensão.
V_{iGv}	Tensão de entrada da planta.
V_{grid}	Tensão na rede elétrica.
V_i	Tensão de entrada.
V_L	Tensão no indutor.
V_o	Tensão de saída.
V_{qd}	Componentes de eixo direto e quadratura da tensão do estator.
V_{ref}	Tensão de referência.
V_{sense}	Sinal de tensão medido pelo sensor.
w_p	Frequência do polo.
w_z	Frequência do zero.

I. INTRODUÇÃO

O conceito moderno de sistema elétrico considera a geração distribuída, principalmente aquela proveniente de fontes renováveis. Neste panorama, turbinas eólicas de grande e de pequeno porte se apresentaram com uma das opções na geração de energia elétrica. As turbinas de grande porte já se consolidaram como opção no mercado grandes usinas. Já as turbinas eólicas de pequeno porte (TEPP) são opções ainda em desenvolvimento científico e tecnológico, e que ainda estão num processo de consolidação no mercado de energia renovável. Contudo, este processo está ocorrendo num ritmo acelerado, pois dados mostram que este segmento cresce 20% ao ano [1], [2], principalmente em aplicações

Artigo submetido em 15/01/2016. Primeira revisão em 03/05/2016. Aceito para publicação em 05/07/2016 por recomendação do Editor Convidado Leandro Michels.

residenciais, comerciais e em fazendas. Os EUA foi o país que apresentou maior crescimento, em torno de 35% ao ano, tornando-se um mercado considerável e uma vitrine desta tendência para os outros países com características geográficas semelhantes. A expectativa é que esse crescimento de TEPPs continue nos próximos anos, com previsão de 350 MW em novas instalações em 2016 [1], [2]. Considerando o crescimento de 20% ao ano, em 2020 serão aproximadamente 750 MW em novas instalações, sendo que a potência total instalada chegará a valores próximos de 3 GW. A evolução da capacidade instalada e a perspectiva para os próximos anos são ilustradas na Figura 1, sendo a China, Estados Unidos e Inglaterra os líderes na instalação e fabricação de TEPP.

O crescimento da produção de energia a partir de sistemas eólicos fez crescer os investimentos em novas tecnologias, o que vem proporcionando uma redução no custo tanto das turbinas como nos sistemas auxiliares, tornando essa tecnologia mais viável e competitiva. Sistemas que utilizam turbinas eólicas de pequeno porte conectadas à rede são denominados de sistemas *on-grid* e eles são opções para crescimento da microgeração distribuída no Brasil.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através da Resolução Normativa nº687/2015, aprimorou as regras que permitem a instalação de microgeração distribuída conectadas ao sistema de distribuição. A Normativa nº687/2015 considera microgeração potências até 75 kW (valor válido a partir de 1ª de maio de 2016), permite que um consumidor possa produzir energia para uso próprio e vender o excedente à distribuidora local. A Normativa nº687/2015 é uma revisão da Resolução Normativa nº482/2012, que desde 2012 incentiva fontes renováveis, microgeração e a geração distribuída no Brasil, o que fez surgir um emergente mercado no país. Os primeiros sistemas de microgeração instalados no Brasil são de sistemas fotovoltaicos. Contudo, devido à geografia e a característica dos ventos, as TEPPs possuem potencial para ser uma segunda opção neste mercado emergente.

Atualmente, não existem equipamentos nacionais e normas brasileiras para a conexão de TEPP à rede elétrica. Assim, neste cenário, este trabalho propõe, analisa e verifica experimentalmente uma proposta para um sistema de conexão de um aerogerador de 1 kW à rede elétrica. O sistema proposto é baseado num retificador a diodos, um conversor CC-CC do tipo *Forward* e um inversor ponte completa. A proposta é apresentada, analisada e comprovada no decorrer do texto.

II. TURBINAS EÓLICAS DE PEQUENO PORTE

De acordo com a *International Electrotechnical Commission* (IEC) uma turbina eólica é considerada de pequeno porte quando possui uma área de varredura de até 200 m², potência de 1 a 15 kW para uso residencial e potência de 15 a 70 kW para uso comercial [3].

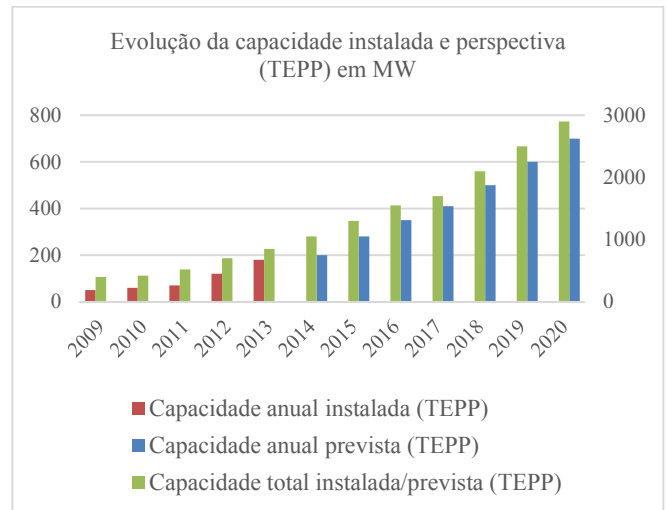


Fig. 1. Potência anual instalada, potência anual prevista e potência total instalada [1].

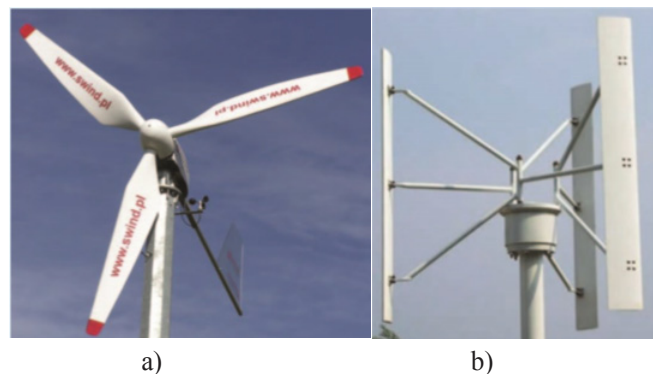


Fig. 2. Turbina de eixo horizontal (a); turbina de eixo vertical (b).

A estrutura de um gerador eólico de baixa potência consiste essencialmente em uma turbina eólica, responsável por captar a energia cinética dos ventos e transformá-la em energia mecânica, e um gerador elétrico que transforma a energia mecânica da turbina, transmitida por um eixo, em energia elétrica. As formas construtivas dos aerogeradores podem ser classificadas em turbinas de eixo vertical e turbina de eixo horizontal.

As turbinas de eixo horizontal são as mais comuns atualmente. Elas atingem uma eficiência de até 45% [4] e apresentam melhor desempenho em áreas abertas, com poucos obstáculos e ventos de fluxo suave. Podem apresentar ruídos audíveis conforme a fabricação e perfil de vento. Sua forma construtiva difere basicamente pelo número de pás e por suas proporções. Um maior número de pás aumenta o torque sobre o eixo do rotor enquanto um menor número de pás faz com que o eixo do rotor gire mais rápido. A Figura 2 (a) mostra um exemplo de turbina de eixo horizontal de 3 pás, a qual é a mais empregada.

As turbinas de eixo vertical são consideravelmente mais silenciosas e possuem um melhor aproveitamento para ventos turbulentos, comparadas as de eixo horizontal, o que contribui para a sua integração com o meio urbano. Atualmente a sua eficiência é menor que as turbinas de eixo

horizontal. A Figura 2 (b) mostra um exemplo de turbina de eixo vertical. Existem diferentes tipos de aerodinâmica para este tipo de turbina.

A capacidade de transformação de energia cinética em energia mecânica de uma turbina eólica é medida pelo coeficiente de potência (C_p), também denominado de coeficiente de Betz. O coeficiente de potência depende da razão entre a velocidade do vento e a velocidade de rotação da turbina (λ), denominado na literatura de *tip-speed ratio*, e do ângulo da pá (β). Em geral, as turbinas de pequeno porte possuem pás fixas, com ângulo entre 0° e 15° , devido a sua proposta de baixo custo e simplicidade. Os valores típicos de C_p são de 0,25 a 0,45 [3], sendo o valor teórico máximo do coeficiente de Betz de 0,5926.

Turbinas de pequeno porte utilizam em sua maioria máquinas síncronas de ímãs permanentes e trabalham com velocidade variável. Elas fornecem tensões com frequência variável, diretamente proporcional à velocidade do vento, pois não empregam caixas multiplicadoras. Portanto, são utilizados conversores para adaptar as tensões e a frequência ao nível da rede elétrica [5]-[9]. A característica de potência mecânica P_m (W) em relação a rotação do eixo (ω) e a velocidade do vento (v) pode ser vista na Figura 3. Nota-se que há uma potência máxima para cada velocidade de vento, assim, os conversores também podem ser a função de extrair a máxima potência disponível no sistema.

Existem duas topologias muito utilizadas para conectar aerogeradores de baixa potência à rede elétrica [10]-[15]. Uma é composta pelo retificador passivo ponte de Graetz, um conversor CC-CC *Boost* e um inversor (monofásico ou trifásico). A segunda substitui o retificador a diodos e o conversor CC-CC pelo retificador controlado trifásico clássico do tipo *Boost* (configuração *Back-to-Back*). A primeira opção possui um custo menor, porém possui maior número de harmônicas na corrente do gerador, aumentando as perdas no ferro e variação do torque. Por outro lado, a estrutura de controle e sua implementação são simples. A segunda opção é caracterizada por sua maior complexidade de controle no estágio retificador e, por isso, maior custo, contudo, proporciona maior eficiência.

III. SISTEMA PROPOSTO

Este trabalho propõe o sistema apresentado na Figura 4 para a conexão TEPP até 1 kW à rede elétrica. Ele consiste de uma TEPP de eixo vertical [16], uma ponte retificadora,

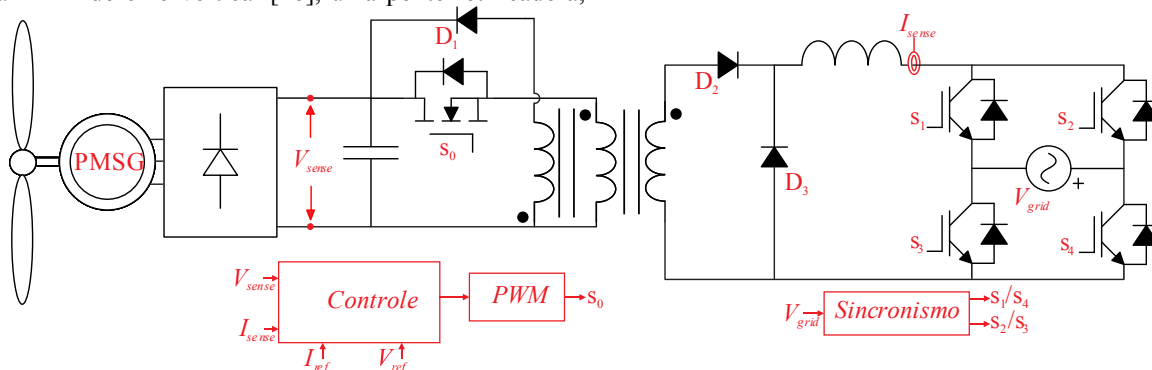


Fig. 4. Sistema proposto com ponte retificadora, conversor CC-CC *Forward* e inversor *Full-Bridge*.

um conversor CC-CC *Forward* e um inversor *Full-Bridge*. O objetivo da estrutura é atender a demanda de baixa potência, assim, a solução busca simplicidade e redução de custos.

O primeiro estágio do sistema é composto pelo retificador ponte de Graetz com filtro capacitivo, que é responsável por gerar um barramento CC. Geradores de baixa potência apresentam valores elevados de impedância de dispersão, o que contribui para diminuir os harmônicos das correntes quando alimentam cargas não lineares. A tensão de saída da ponte retificadora é controlada pelo conversor CC-CC (segundo estágio), pois a curva de potência elétrica da turbina em função da tensão CC na saída do retificador (Figura 5) apresenta uma relação com a máxima potência elétrica do gerador [17], [18]. Este comportamento é verificado na Figura 5 para o gerador de 1 kW da empresa Enersud [16]. Nota-se que tensões em torno de 50 a 80 V na saída do retificador garantem que o gerador estará operando próximo do seu ponto de máxima potência em todas as velocidades de vento.

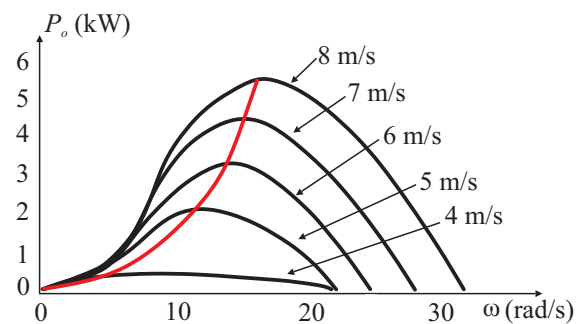


Fig. 3. Relação de potência mecânica, velocidade do rotor e velocidade do vento [1].

O segundo estágio do sistema é o conversor *Forward*, que é a estrutura principal do sistema. Este conversor CC-CC foi escolhido pelos seguintes motivos: (i) apresenta entrada em tensão, o que facilita o controle desta tensão, a qual é a mesma tensão da saída do retificador com filtro capacitivo; (ii) possui a saída em corrente, o que facilita a realização do controle desta corrente. A corrente de saída do conversor CC-CC definirá o formato senoidal da corrente injetada na rede elétrica; (iii) tem isolamento em alta frequência, o que reduz o volume do sistema quando comparado com a solução [18] que utiliza o conversor *Buck* e um transformador de baixa frequência na saída.

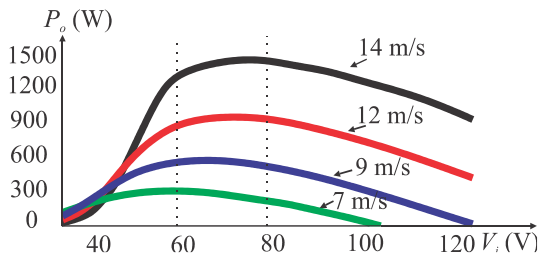


Fig. 5. Curva de potência elétrica do gerador [17] versus tensão CC retificada [18] e [19]. Turbina operando com $\beta = 0$.

Além disto, o transformador presente no conversor *Forward* proporciona o ganho de tensão necessário para adequar a saída do conversor CC-CC com os valores da rede elétrica.

Assim, o conversor *Forward* realiza as seguintes funções no sistema: (i) controla o rastreamento de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking – MPPT*) do gerador a partir da regulação da tensão de saída da ponte retificadora; (ii) faz a isolamento galvânica do sistema; (iii) proporciona ganho na tensão, para adequação com os níveis da rede elétrica e (iv) controla a corrente injetada na rede, a partir do controle da corrente do indutor de saída. A corrente do indutor de saída deverá ser uma senoide retificada sincronizada com a rede elétrica. O sistema de controle proposto irá operar nessa estrutura para garantir esses requisitos.

O terceiro estágio é composto por um inversor alimentado em corrente do tipo *Full-Bridge*, o qual deverá inverter o sentido da corrente fornecida pelo indutor de saída do *Forward* durante meio período da rede e, assim, sincronizar a corrente de saída do estágio CC-CC com a rede elétrica. Este inversor trabalha em malha aberta e suas comutações ocorrem em baixa frequência (60 Hz), o que reduz as perdas. Sua função é inverter a corrente do conversor *Forward* e injetá-la da rede elétrica, sem influenciar no seu formato.

IV. ETAPAS DE OPERAÇÃO

O conversor *Forward* opera em modo de condução contínuo e apresenta três etapas de operação: condução, desmagnetização e roda livre. Durante o período de condução o interruptor s_0 é fechado (Figura 6 (a) e (d)) e a potência é transferida do barramento CC para o indutor. Já o inversor transfere a energia do indutor para a rede elétrica. O primeiro estágio termina com a abertura do interruptor s_0 , quando inicializa as etapas de desmagnetização e roda livre (Figura 6 (b) e (e)). O diodo D_2 é bloqueado e o diodo D_1 é polarizando diretamente, o conversor *Forward* transfere a energia armazenada na indutância magnetizante para o barramento CC. No fim da desmagnetização, o diodo D_1 é bloqueado e apenas o diodo D_3 permanece em condução, mantendo a etapa de roda livre, ou seja, a transferência de energia do indutor para a rede contínua (Figura 6 (c) e (f)). O inversor opera em baixa frequência (60 Hz), portanto opera de forma constante em todas as etapas do conversor. Os interruptores s_2 e s_3 são ligados no semiciclo positivo da rede (Figura 6 (a), (b) e (f)) e os interruptores s_1 e s_4 no semiciclo negativo (Figura 6 (c), (d) e (e)). A estrutura completa apresenta seis etapas de operação, como é ilustrado nas etapas de operação da Figura 6.

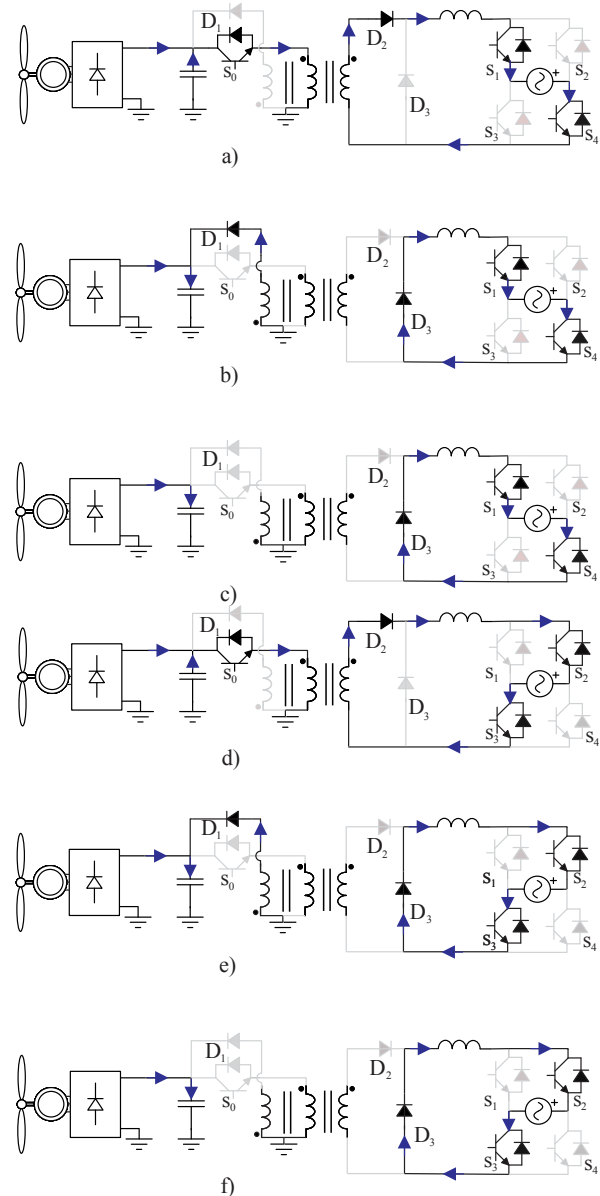


Fig. 6. Etapas de operação do sistema: (a) condução semiciclo positivo; (b) desmagnetização semiciclo positivo; (c) roda livre semiciclo positivo; (d) condução semiciclo negativo; (e) desmagnetização semiciclo negativo e; (f) roda livre semiciclo negativo.

V. SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle é composto por duas malhas (controle multimalhas). A primeira é responsável em impor uma corrente senoidal no indutor do conversor *Forward*. Ao controlar está corrente, o sistema de controle regula a corrente injetada na rede elétrica. A referência de corrente usada é uma amostra da tensão da rede elétrica retificada, assim a tensão e a corrente estarão em fase. A segunda malha de controle regula a tensão da saída de ponte retificadora, ou seja, a tensão de entrada do conversor *Forward*. O objetivo desta malha é impor indiretamente um ponto de operação para o aerogerador, conforme ilustrado na Figura 5, de maneira a extrair dele uma potência próxima a sua máxima capacidade, para cada velocidade de vento. Assim, elimina-se a necessidade de monitorar a velocidade mecânica da

turbina, o que reduz custos e proporciona simplicidade. Este controle é denominado neste trabalho de MPPT por tensão constante e é baseado em [17], [18]. O inversor *Full-Bridge* opera em malha aberta com comandos sincronizados com a frequência da rede. A Figura 7 apresenta as formas de onda controladas em vermelho, as quais são a tensão no barramento CC e a corrente no indutor. A corrente injetada na rede é controlada indiretamente pela corrente no indutor do conversor *Forward*.

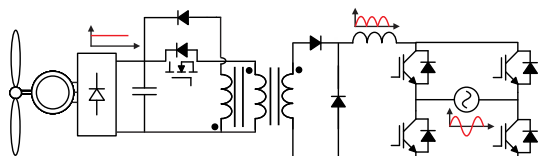


Fig. 7. Sistema eletrônico proposto com as principais formas de ondas.

O diagrama de blocos do sistema de controle de tensão e corrente é mostrado na Figura 8. A malha interna apresenta uma dinâmica rápida e é responsável pelo controle da corrente do indutor do conversor *Forward*. Já a malha externa possui uma dinâmica mais lenta e controla a tensão de entrada do conversor (tensão na saída do retificador passivo) para garantir o rastreamento de máxima potência pelo método de tensão constante.

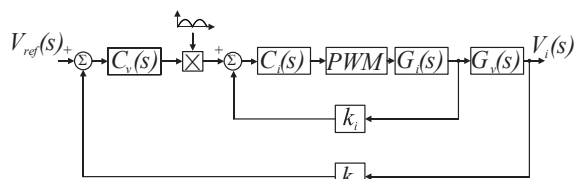


Fig. 8. Diagrama de blocos.

As funções de transferência do conversor *Forward* são obtidas a partir do método de pequenos sinais e relacionam a variação da corrente do indutor com a variação da razão cíclica (G_i) e a variação da tensão de entrada com a corrente do indutor (G_v).

A obtenção da função de transferência da corrente do indutor considera as seguintes condições:

- A frequência de chaveamento é muito maior que a frequência da rede.
- As tensões de entrada e de saída são consideradas constantes durante o período de chaveamento.

Baseado nessas observações, o circuito equivalente da malha que relaciona a corrente do indutor com a razão cíclica é apresentado na Figura 9.

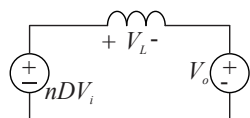


Fig. 9. Circuito equivalente para obtenção da função de transferência da corrente do indutor.

A análise do circuito da Figura 9 mostra que:

$$nV_i D = V_L + V_o \quad (1)$$

e (1) pode ser expresso por:

$$nV_i d(t) = L \frac{d i_L(t)}{dt} + V_o. \quad (2)$$

Aplicando uma pequena perturbação em (2), obtém-se:

$$nV_i [D + d(t)] = \frac{dL[I_L + \Delta i_L(t)]}{dt} + V_o. \quad (3)$$

Aplicando a transformada de Laplace em (3), o modelo de pequenos sinais de i_L em função de d é obtido e definido por:

$$G_i(s) = \frac{\Delta i_L}{\Delta d} = \frac{V_o n}{sL}. \quad (4)$$

A função de transferência da corrente do indutor encontrada em (4) foi validada por simulação e é apresentada na Figura 10. Tanto os valores do modelo como o do circuito do conversor possuem o mesmo comportamento para um degrau de razão cíclica no instante de 1 s (desconsiderando as altas frequências), o que valida o modelo.

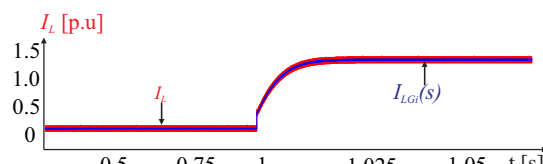


Fig. 10. Validação da função de transferência da corrente do indutor em função da razão cíclica.

Para a obtenção da função de transferência da tensão de saída pela corrente do indutor, utiliza-se o circuito da Figura 11.

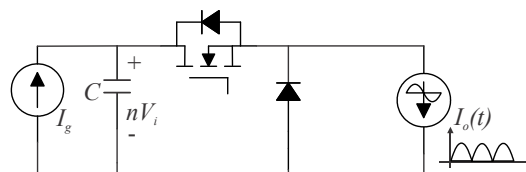


Fig. 11. Circuito equivalente para obter a função de transferência G_v .

Ao analisar o circuito da Figura 11, tem-se que:

$$-C \frac{d(nV_i)}{dt} = i_c(t) \quad (5)$$

Ao considerar o valor médio quase instantâneo, a corrente no capacitor é definida por:

$$-C \frac{d(nV_i)}{dt} = i_L(t) D. \quad (6)$$

Aplicando uma pequena perturbação em (6), tem-se:

$$-C \frac{d(nV_i + \Delta(nv_i(t)))}{dt} = D(I_L + \Delta i_L(t)). \quad (7)$$

Utilizando a transformada de Laplace em (7), o modelo de pequenos sinais de v_i em função de i_L é dado por:

$$G_v(s) = \frac{\Delta v_i(s)}{\Delta i_L(s)} = \frac{-D}{snC}. \quad (8)$$

De (8), pode-se verificar que a função de transferência é inversamente proporcional. Por exemplo, um degrau positivo na corrente gera um degrau negativo na tensão. A validação da função de transferência foi feita por simulação. A resposta do modelo e do circuito do conversor para um degrau de corrente é visto na Figura 12. Tanto o modelo quanto o conversor apresentaram o mesmo comportamento, o que valida a função de transferência.

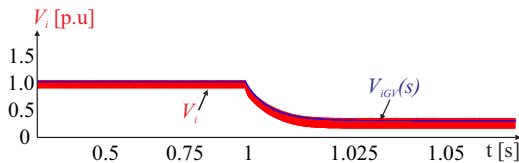


Fig. 12. Validação da função de transferência da malha de tensão.

A implementação do controle de corrente e do modulador *PWM* pode ser realizada a partir do circuito integrado *UC3854*. Um controlador avanço atraso foi escolhido para a malha de corrente. O controle de tensão é pode ser implementado a partir de amplificadores operacionais ligados ao *UC 3854*. Um controlador PI com filtro é sugerido. As funções de transferência dos controladores de corrente (C_i) e tensão (C_v) são dadas, respectivamente, por:

$$C_i(s) = k_i \frac{(s + w_z)}{(s + w_p)^2} \quad (9)$$

$$C_v(s) = k_v \frac{(s + w_z)}{s(s + w_p)}. \quad (10)$$

VI. PROJETO E SIMULAÇÃO

O sistema proposto foi verificado num projeto de 1 kW para o gerador eólico da Enersud [16]. Este gerador é comercializado para operar no modo isolado com banco de baterias de 48 V. Neste projeto, ele adaptado em laboratório para trabalhar com o sistema proposto. As especificações do protótipo estão na Tabela I. Os componentes utilizados estão na Tabela II e os parâmetros dos controladores de corrente e de tensão estão descritos nas Tabelas III e IV.

Inicialmente, o sistema foi verificado por simulação, na qual ele foi submetido a um incremento da velocidade do vento com intuito de validar o projeto de controle. A amplitude da corrente do indutor antes, durante e depois do transitório é vista na Figura 13. Com o aumento da velocidade do vento, o gerador fornece uma potência maior, consequentemente, o controle de corrente aumenta a amplitude da corrente do indutor. Este aumento é controlador pelo sinal de controle de corrente, o qual a sua amplitude é mostrada na Figura 14, que apresenta uma resposta amortecida. A amplitude da corrente injetada na rede elétrica é apresentada na Figura 15, a qual apresenta o mesmo comportamento da corrente do

indutor (Figura 13), apenas com a inversão proporcionada pelo inversor. Detalhes da corrente injetada na rede elétrica são vistos na Figura 15, sendo a sua *THD* de 4%. O mesmo desempenho é encontrado na corrente do indutor do conversor *Forward*, ou seja, na variável de controle.

A outra variável de controle é a tensão de entrada do conversor *Forward* (Figura 17). Ela é mantida em 50 V pelo controlador de tensão (Figura 18), mesmo durante o transitório, o que mantém o gerador sempre próximo do seu ponto de máxima potência. A tensão é mantida constante na Figura 17, contudo a variação aumenta, pois a potência processada também aumenta. Para manter a tensão do barramento CC constante, o controle de tensão aumentou seu valor, como visto na Figura 18, consequentemente, ele aumentou a referência de corrente e proporcionou uma injeção maior de potência na rede elétrica. A resposta do controle foi amortecida, sem causar sobressinais no conversor.

A amplitude da tensão da rede durante todo o transitório pode ser visto na Figura 19 e o seu formato pode ser verificado na Figura 20. O gerador não tem capacidade de alterar a amplitude, o formato ou a frequência da tensão da rede elétrica, ou seja, a rede é uma barra infinita para a TEPP.

Um segundo teste foi realizado com o intuito de verificar a dinâmica de controle para situações de variações crescente e decrescente de vento. As Figuras 21, 22 e 23 apresentam a tensão de entrada, corrente no indutor e a corrente de saída, respectivamente. O sistema foi submetido, primeiramente a variação positiva de vento, o que aumenta a potência disponível e aumenta a variação da tensão no capacitor de entrada. Após a entrada em regime, o sistema foi submetido à variação negativa. Em ambos os casos a tensão controlada foi mantida constante

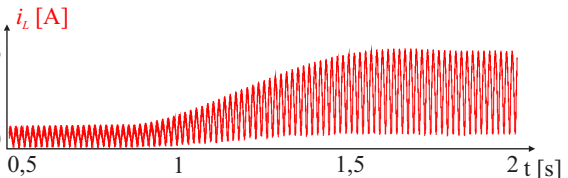


Fig. 13. Corrente do indutor do conversor *Forward*.

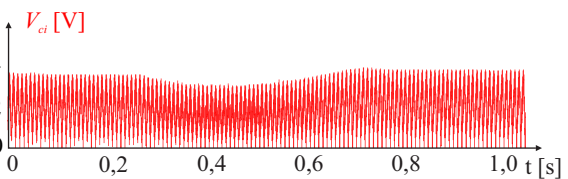


Fig. 14. Sinal de controle da malha de corrente.

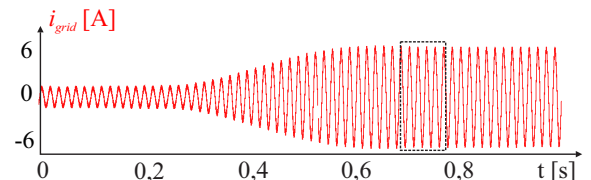


Fig. 15. Corrente injetada na rede elétrica pelo sistema.

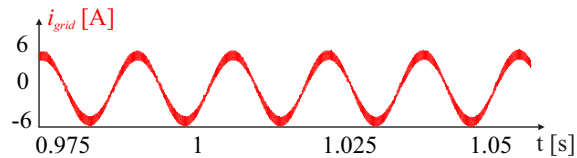


Fig. 16. Detalhe da corrente injetada na rede elétrica.

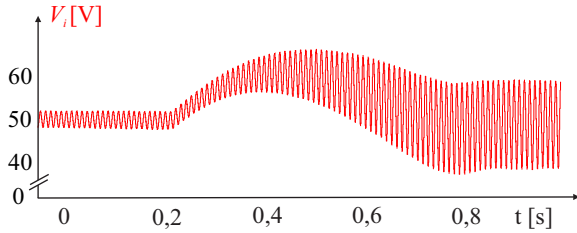


Fig. 17. Tensão de entrada do conversor *Forward*.

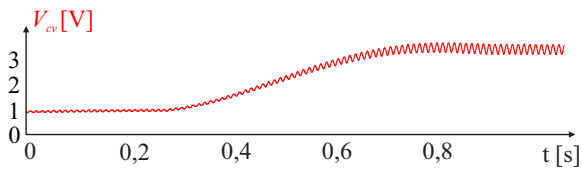


Fig. 18. Sinal de controle da malha de tensão.

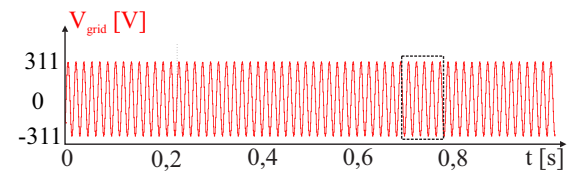


Fig. 19. Tensão da rede elétrica.

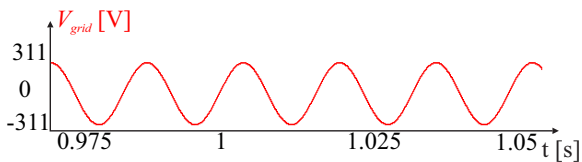


Fig. 20. Detalhe da tensão da rede elétrica.

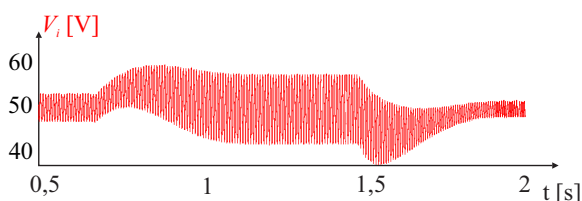


Fig. 21. Dinâmica da tensão controlada na entrada do conversor *Forward* com variações de vento.

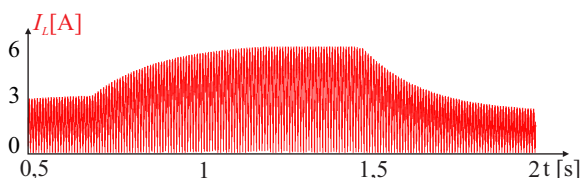


Fig. 22. Dinâmica da corrente controlada no indutor do conversor *Forward* com variações de vento.

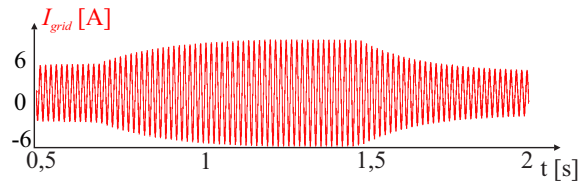


Fig. 23. Dinâmica da corrente injetada na rede elétrica com variações de vento.

TABELA I
Especificações do Protótipo

Parâmetro	Valor
Potência	1 kW
Tensão de saída (<i>rms</i>)	220 V
Tensão de entrada (<i>rms</i>)	50 V
Frequência da rede	60 Hz
Frequência de chaveamento (<i>Forward</i>)	25 kHz
Frequência de chaveamento (<i>Inversor</i>)	60 Hz

TABELA II
Componentes

Parâmetro	Nome/Valor
Interruptores	IXKH70N60C5
Diodos <i>Forward</i>	MUR5150E
Controle	UC3854
Inversor	FNA41060
Indutância	15,6 mH
Capacitância	3000 μ F
Relação de transformação	13.6

TABELA III
Parâmetros do Controle de Tensão

Parâmetro	Valor
Frequência de corte	12 Hz
Margem de fase	60°
Ganho em 120Hz	-4.79 dB

TABELA IV
Parâmetros do Controle de Corrente

Parâmetro	Valor
Frequência de corte	3.9 kHz
Margem de fase	45°
Ganho	81.51 dB
Polo 1	0 Hz
Polo 2	12.5 kHz
Zero	3.98 kHz

VII. PROTÓTIPO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O protótipo desenvolvido (Figura 25) foi testado no gerador da Figura 24. Testes em vários pontos de

operação foram realizados no protótipo, com o intuito de verificar o funcionamento do sistema.

No primeiro teste, o gerador eólico injetou 300 W de potência na rede elétrica. Os resultados de tensão na rede, corrente injetada na rede e corrente no indutor são apresentados na Figura 26. O resultado comprova o funcionamento da proposta, além de mostrar que a corrente injetada na rede é a própria corrente do indutor, apenas invertida pelo inversor (ou seja, o inversor não altera o formato da corrente controlada pelo conversor *Forward*), e que não há problemas na corrente na passagem pelo zero.

No segundo teste o sistema injetou 420 W de potência na rede elétrica. Os resultados da tensão de entrada e da corrente no indutor são apresentados na Figura 27. Essas são as duas variáveis controladas pelo sistema e ambas estão adequadas neste ponto de operação. As formas de onda da tensão da rede elétrica e da corrente injetada pelo sistema são expostas na Figura 28.

No terceiro teste, o sistema injetou 500 W na rede elétrica. Os resultados de tensão de entrada e corrente no indutor são apresentados na Figura 29 e as formas de onda da tensão na rede e corrente na rede são apresentados na Figura 30. Nessas condições o rendimento do sistema foi de 86% sendo (99% no retificador, 88% no conversor CC-CC isolado e 98% no inversor com comutação em baixa frequência).



Fig. 24. Fotografia do aerogerador de 1 kW instalado no INEP/UFSC.

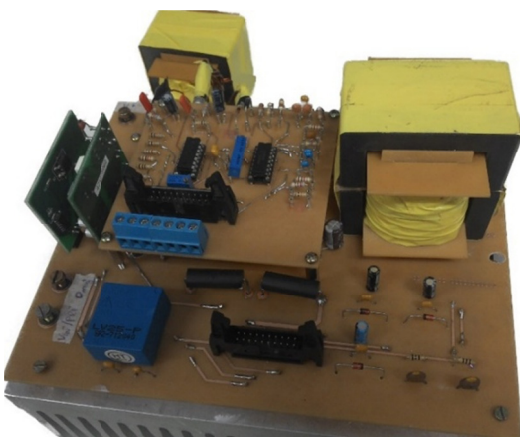


Fig. 25. Fotografia do protótipo de 1kW.

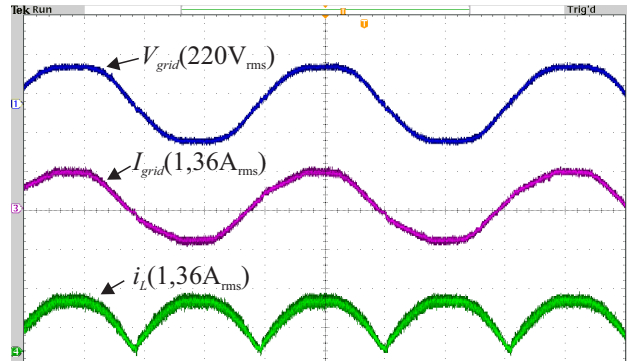


Fig. 26. Teste de 300W, tensão na rede, corrente da rede e corrente no indutor. V_{grid} : 300V/div; I_{grid} : 2A/div; i_L : 2A/div.

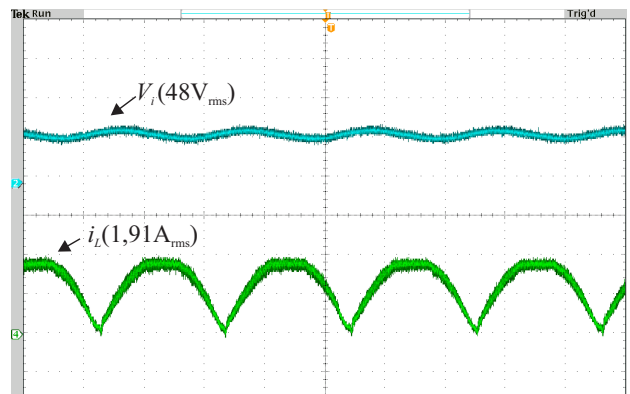


Fig. 27. Teste de 420 W, tensão de entrada e corrente no indutor. V_i : 50V/div; i_L : 2A/div.

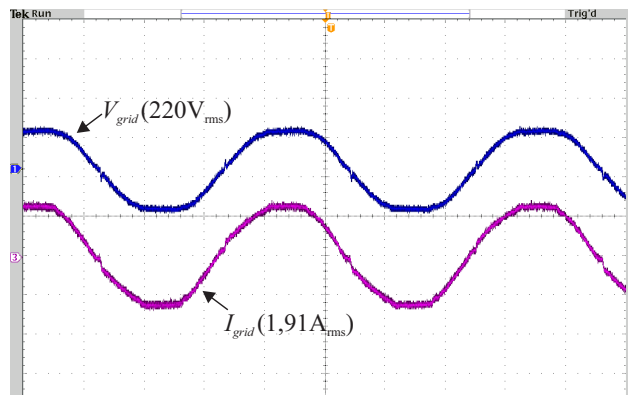


Fig. 28. Teste de 420 W, tensão na rede e corrente da rede. V_{grid} : 300V/div; I_{grid} : 2,5A/div.

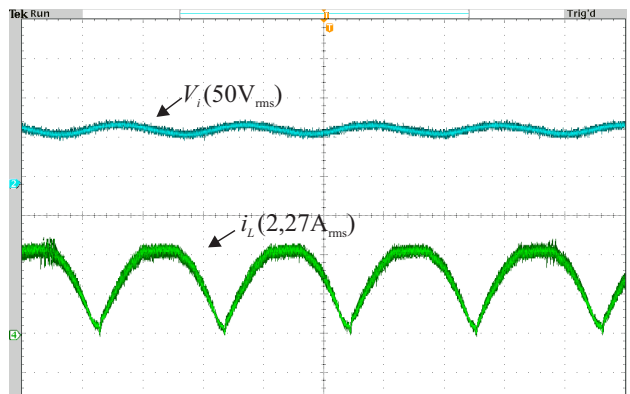


Fig. 29. Teste de 500 W, tensão de entrada e corrente no indutor. V_i : 50V/div; i_L : 2A/div.

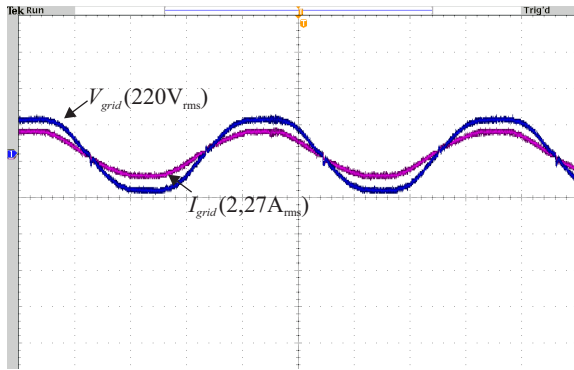


Fig. 30. Teste de 500 W, tensão na rede e corrente injetada na rede. V_{grid} : 300V/div; I_{grid} : 4A/div.

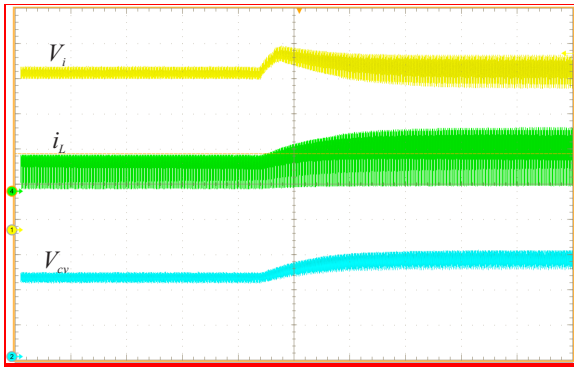


Fig. 31. Tensão de entrada (V_i), corrente do indutor (i_L) e sinal de controle de tensão (V_{cv}). V_i : 10V/div; i_L : 2A/div; V_{cv} : 2V/div.

Um teste dinâmico foi realizado monitorando o sistema diante de um degrau positivo de velocidade no gerador. O evento proporcionou um aumento da potência injetada na rede. As formas de onda da tensão de entrada (V_i), corrente do indutor (i_L) e sinal de controle de tensão (V_{cv}) são mostradas na Figura 31. O resultado do teste dinâmico foi adequado, pois o controlador manteve a tensão de entrada em um valor constante e aumentou a corrente do indutor, possibilitando ao sistema injetar mais potência na rede. A sobretensão que ocorre durante o transitório alcançou picos de 55V. O sinal de controle de tensão (V_{cv}) buscou o seu novo ponto de operação para manter a tensão do barramento em 50 V. Ao aumentar o sinal de controle de tensão, a referência de corrente foi incrementada e, conseqüentemente, o sistema injetou mais potência na rede elétrica. O sistema se manteve estável durante todo o transitório.

VIII. CONCLUSÃO

O artigo define as principais características dos aerogeradores de pequeno porte e propôs um sistema para conexão destes aerogeradores à rede elétrica (configuração *on-grid*). O texto contribuiu com um estudo da estrutura, princípios de operação, análises quantitativas, funções de transferência para plantas de controle de corrente e de tensão, projetos e verificação experimental. O desempenho observado nos resultados experimentais foi adequado e validou a proposta.

O sistema proposto foi projetado com uma ponte retificadora de diodos, um conversor CC-CC que apresenta entrada em tensão e saída em corrente e inversor de corrente. O conversor CC-CC é utilizado para rastrear a máxima potência do gerador (a partir do

controle da tensão de saída da ponte retificadora), para proporcionar ganho (necessário para adequar os níveis de tensão) e, por fim, para controlar a corrente injetada na rede elétrica. O inversor de corrente trabalha em baixa frequência (60Hz) e em malha aberta. Baseado nestas necessidades foram escolhidos o conversor CC-CC do tipo *Forward* e o inversor *Full-Bridge*. Assim, a estrutura proposta também apresenta isolamento em alta frequência no estágio CC-CC. O circuito de controle foi implementado com o circuito integrado *UC3854*, o que simplifica e reduz o custo da estrutura.

O sistema proposto é baseado na integração de conversores consolidados na literatura, oferecendo ao sistema robustez e simplicidade, o que é necessário para pequenos sistemas conectados à rede elétrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro (Processo 405246/2013-7).

REFERÊNCIAS

- [1] M. Malinowski, A. Milczarek, R. Kot, Z. Goryca, J.T. Szuster, "Optimized Energy-Conversion Systems for Small Wind Turbines: Renewable energy sources in modern distributed power generation systems," *Proc. Of Power Electronics Magazine, IEEE*, vol. 2, nº 3, pp.16-30, Setembro. 2015.
- [2] World Wind Energy Association "Small Wind World Report," 2015. [Online]. Disponível em: www.small-wind.org/.
- [3] D. Li, S. Wang, and P. Yuan, "A review of micro wind turbines in the built environment," in *Proc. Asia-Pac. Power Energy Eng. Conf. (APPEEC)*, Mar. 2010, pp. 1–4.
- [4] F. D. Bianchi, H. De Battista, R. J. Mantz, *Wind Turbine Control Systems. Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*, Springer-Verlag London Ltd, 1ª Edição, Londres, 2007.
- [5] N. A. Orlando, M. Liserre, V. G. Monopoli, R. A. Mastromauro, A. Dell'Aquila, "Comparison of power converter topologies for permanent magnet small wind turbine system", in *Proc of. Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE)*, pp.2359 -2364, 2008.
- [6] Y. Wang, C. Nayar, J. Su, M. Ding, "Control and interfacing of a grid-connected small-scale wind turbine generator", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 2, pp.428 – 434, Dezembro 2011.
- [7] I. Kortabarria, E. Ibarra, I.D. Alegria, "Power converters used in grid connected small wind turbines: Analysis of alternatives," in *Proc. of 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010)*, pp.1-6, 2010.
- [8] Y. Wang, S. Hu, "Design and research of an inverter for a small wind power generation system," in *Proc. of Advanced Computational Intelligence (ICACI)*, pp. 937–940, 2012.
- [9] J.L.Li, H.H. Xu, "Power Electronic Converters in Wind Power Technology", in *Proc. of Mechanical industry press*, pp. 61-64, 2008.
- [10] A. Milczarek, M. Malinowski, "Monitoring and control algorithms applied to small wind turbine with

DADOS BIOGRÁFICOS

- grid-connected/stand-alone mode of operation”, *Przeegląd Elektrotechniczny*, vol. 88, nº.12a, pp. 18–22, Janeiro, 2012.
- [11] K. Sunderland, M. F. Conlon, G. Mills, R. Feely, “Observation of the wind resource across the Dublin area”, in *Proc. of Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pp.1-6, 2011.
- [12] A. Stabile, A. J. Marques Cardoso, C. Boccaletti “Efficiency analysis of power converters for urban wind turbine applications”, in *Proc. of IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*. pp.1-6, 2010.
- [13] A. M. De Broe, S. Drouilhet, V. Gevorgian. “A peak Power Tracker for small wind turbines in battery charging applications”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.14, nº4, pp. 1630-1635, Dezembro 1999.
- [14] R. Teodorescu, F. Blaabjerg, “Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in stand-alone and grid-connected mode”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 19, nº5, pp.1323-1332, Setembro 2004.
- [15] Y. Wang, C. Nayar, J. Su, M. Ding, “Control and interfacing of a grid-connected small-scale wind turbine generator”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, nº2, pp.428–434, Junho 2011.
- [16] Enersud, “Gerar 246”, [Online]. Disponível em: <http://www.enersud.com.br/>
- [17] G. Tibola, *Sistema eólico de pequeno porte para geração de energia elétrica com rastreamento de potência máxima*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2009.
- [18] R.H. Eckstein, T.B. Lazzarin, I. Barbi, “Proposed power and control system for small scale wind turbines connected to the grid,” in *Proc. of Renewable Power Generation Conference (RPG 2014)*, pp. 1-6, 2014.

Vanderlei Cardoso, nascido em Itajaí, Santa Catarina, Brasil em 1991. Recebeu o grau de engenheiro eletricitista pela Universidade Federal de Santa Catarina em 2015. Atualmente é aluno do curso de mestrado do departamento de engenharia elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina.

Atua no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP) desde 2014. Seus interesses são: Inversores conectados à rede elétrica, conversores CC-CC, sistemas de conexão com turbinas eólicas de pequeno porte e energia renováveis.

Rafael Henrique Eckstein, nascido em Marechal Cândido Rondon, Paraná, Brasil em 1990. É engenheiro eletricitista (2012), mestre (2014) e atualmente doutorando pela Universidade Federal de Santa Catarina.

Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, conexão de turbinas eólicas na rede elétrica, controle da qualidade de energia e paralelismo de inversores em microrredes.

Telles Brunelli Lazzarin, nascido em Criciúma, Santa Catarina, Brasil, em 1979. Recebeu o grau de Engenheiro eletricitista, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil, em 2004, 2006 e 2010, respectivamente.

Atualmente é professor no Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da UFSC e pesquisador no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP). A área de concentração do prof. Telles é em eletrônica de potência, com ênfase em energias renováveis (principalmente eólica de pequeno porte), inversores de tensão e conversores estáticos a capacitor chaveado.

Prof. Telles é membro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP) e da IEEE Society.