

CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO PARA SISTEMA EÓLICO EMPREGANDO GERADOR DE INDUÇÃO GAIOLA DE ESQUILO

Angelo S. Lunardi^{1,2}, Alfeu J. Sguarezi Filho¹

¹Universidade Federal do ABC, Santo André - SP, Brasil

²Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, Brasil

e-mail: angelo.lunardi@ufabc.edu.br, alfeu.sguarezi@ufabc.edu.br

Resumo – Este artigo propõe um controlador preditivo baseado em um modelo aplicado no gerador de indução de gaiola de esquilo usando um controle direto de torque. O sistema é composto por um gerador, que é conectado à rede de energia através de um conversor *back-to-back*. O conversor conectado à rede emprega a técnica de controle preditivo direto de potência. Sendo assim, é possível controlar a potência ativa e reativa que será injetada na rede. O controlador preditivo não necessita de sintonia e possui menor complexidade de implementação. Em ambos os casos, o controlador preditivo seleciona o vetor ótimo a ser aplicado no conversor do gerador ou no conversor da rede elétrica através da minimização de uma função custo, de forma que as referências sejam atendidas. Os resultados experimentais mostrarão o desempenho do controlador preditivo proposto.

Palavras-chave – Controle Direto de Torque, Controle Preditivo, Energia Eólica, Gerador de Indução Gaiola de Esquilo.

MODEL-BASED PREDICTIVE CONTROL FOR WIND SYSTEM USING SQUIRREL CAGE INDUCTION GENERATOR

Abstract – This article offers a model-based predictive controller applied to the squirrel-cage induction (SCIG) generator using a direct torque control. The system consists of a generator that is connected to the power grid through a back-to-back converter. The converter, connected to the grid, employs the direct predictive power control technique. Thus, it is possible to control the active and reactive power that will be injected into the grid. The predictive controller does not need tuning and has less implementation complexity. In either cases, the predictive controller selects the optimal vector to be applied one in the SCIG or grid converter by minimizing a cost function to reach the reference. The experimental results will show the performance of the proposed predictive controller.

Keywords – Direct Torque Control, Model Predictive Control, Squirrel Cage Induction Generator, Wind Energy.

Artigo submetido em 22/12/2017. Primeira revisão em 05/04/2018. Aceito para publicação em 23/05/2018 por recomendação do Editor Marcello Mezaroba.

I. INTRODUÇÃO

A geração de energia eólica, tem uma participação crescente na matriz energética dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, uma vez que se apresenta uma forma de energia amigável com o meio ambiente, em relação a baixa emissão de gases de efeito estufa, como o CO₂, é também uma fonte adicional de energia elétrica disponível para suprir a demanda energética no horário de pico [1].

Atualmente no mundo todo há uma capacidade energética de aproximadamente 432,9 GW com um aumento de 17,1% em relação ao último ano, com um investimento de aproximadamente US\$ 329 bilhões. A maior parcela do valor total da capacidade instalada no mundo, pertence a China, com uma potência aproximada de 145,4 GW, sendo que em toda a Europa a capacidade instalada é de 147,8 GW, ou seja, somente a China produz quase toda a capacidade da Europa, e em segundo na classificação dos dez países com maior produção de energia eólica está o EUA que tem cerca de 74,5 GW, sendo 48,8% menor em relação a China (dados do final de 2015) [2]. No Brasil a capacidade total instalada é cerca de 8,7 GW, onde a região Nordeste é a que mais contribui neste tipo de geração com 6,75 GW, respondendo a 77,6 % da potência total do país [3], sendo que só no ano de 2015 foi instalada uma potência de 2,75 MW. Hoje o Brasil se encontra na nona posição dentre os dez países com capacidade de energia eólica instalada, mostrando assim que existe um interesse em se investir em tecnologias de geração de energia.

As turbinas eólicas podem empregar máquinas elétricas síncronas, de indução ou de relutância variável [4]–[6], entre outras. Os geradores eólicos podem ser ligados diretamente à rede ou por meio de conversores eletrônicos de potência [7], que aumentam a eficiência do sistema devido à possibilidade de operar com velocidade variável [8]. Os geradores de indução de gaiola de esquilo (GIGE) tem baixo custo de construção e é de fácil manutenção. Uma operação eficaz pode ser obtida por meio de um conversor de potência *back-to-back* que processa a potência entre o GIGE e a potência da rede elétrica [9]. O conversor conectado à rede pode controlar a tensão do elo de corrente contínua (CC) e a potência reativa injetada à rede através de um controle por orientação da tensão [10], [11]. O conversor conectado ao GIGE controla o fluxo e torque por meio do ângulo de carga e módulo do fluxo [12], [13]. Neste caso, o conversor processa a potência total do gerador.

O controle do gerador eólico, pode ser feito por meio de técnicas como o controle direto de torque, por proporcional e integrativo (PI) [14] e controle *fuzzy* [15], [16], controle por redes neurais [17], até o controle preditivo [18], não

sendo eles estratégias de controle específicas para geradores eólicos. Algumas dessas estratégias têm desvantagens como o controlador PI devido ao fato que seus ganhos são calculados para um ponto fixo de operação. O trabalho [19] é uma alternativa que aborda o PI com emprego do *anti-windup* porém utilizando uma topologia diferente do conversor *back-to-back* o qual é usualmente empregado. Foi observado que quando comparado ao tradicional *back-to-back*, usado em aplicações eólicas com geradores gaiola de esquilo, a topologia apresentada emprega apenas uma fração da potência do inversor para o controle da tensão no terminal da máquina. É apresentado, também, em [20] a utilização de um controle vetorial de forma indireta, a fim de reduzir possíveis problemas mecânicos de medição.

Os trabalhos [9] e [21] apresentam controladores inteligentes por meio de rede neurais *fuzzy* e híbrido-fuzzy, respectivamente. Os trabalhos apresentam alternativas ao tradicional controlador PI para atingir a referência, utilizando o aprendizado online da rede neural e, neste sentido, apresentam um menor tempo de acomodação em relação ao PI.

Os controladores preditivos baseados em modelo (MPC do inglês *Model Predictive Control*), são controladores que tem como característica utilizar previsões do comportamento futuro do sistema, para realizar o cálculo da lei ótima de controle com base em um determinado critério de desempenho determinístico ou estocástico. O seu emprego foi iniciado na década de 70 em processos onde a dinâmica era lenta devido a necessidade de muitos cálculos em um curto espaço de tempo, e também devido à baixa velocidade relativa dos processadores existentes [22]. Com a evolução desses processadores tornou-se possível a sua aplicação em acionamentos eletrônicos de potência [23].

Dentre as técnicas existentes de MPC, um tipo é o controle preditivo generalizado (GPC do inglês *Generalized Predictive Control*), o qual usa um modelo de processo CARIMA (do inglês *Controller Auto-Regressive Integrated Moving-Average*) com emprego da função de transferência da planta para realizar as previsões. O artigo [24] apresenta esse controlador aplicado em um motor de indução gaiola de esquilo e sendo capaz de realizar o controle das correntes da planta.

Uma alternativa é o MPC apresentado em [25], que apresenta um algoritmo de controle mais simples com relação ao GPC, porém é limitado em prever apenas um horizonte e trabalha com frequência de chaveamento variável. O artigo [26] apresenta a validação do conceito MPC estabelecido por [25]. Neste sentido foi apresentado um sistema com o gerador de indução gaiola de esquilo conectado à rede elétrica com emprego do conversor *back-to-back* em ambiente de simulação [26].

Os algoritmos para o controle preditivo de corrente em inversores trifásicos de tensão (VSI - *Voltage Source Inverter*), podem ser implementados diretamente em um microprocessador para condições de carga onde a força contra eletromotriz é conhecida e/ou desconhecida, são apresentados na mesma década em [27]. Posteriormente, outros tipos de máquinas foram controladas utilizando controle preditivo para aplicações de energia eólica como visto em [28], [29],

[30], em condições de operação normal ou de falha, tais como afundamentos de tensão. O trabalho [31] propõe um controlador preditivo baseado em modelo, para o controle da potência do Gerador de Indução Duplamente Alimentado (GIDA). A lei de controle é obtida pela otimização de uma função objetivo considerando que o esforço de controle é a diferença entre os resultados de potência ativa e reativa previstos e suas referências.

Este trabalho propõe o controle preditivo para o GIGE conectado à rede elétrica. Neste caso, são utilizados dois controladores preditivos baseados no modelo, de forma desacoplada um para o conversor conectado ao gerador e outro conectado à rede elétrica foram propostos. Para o conversor conectado ao GIGE será realizado o controle preditivo direto de torque, no qual, o torque é estimado a partir do fluxo do rotor e estator como não é realizado no trabalho [26]. Para o conversor conectado à rede será realizado o controle preditivo direto de potência. Em ambos os casos, o controlador preditivo seleciona o vetor ótimo a ser aplicado no conversor ligado ao GIGE ou no conversor da rede a partir do comportamento futuro da planta e da função custo minimizada de forma que as referências sejam atendidas, a Figura 1 apresenta o diagrama em bloco de todo o sistema que será abordado neste artigo. Resultados experimentais são apresentados para validar a proposta na seção de análise dos resultados experimentais.

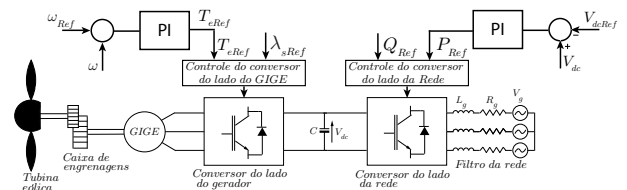


Fig. 1. GIGE conectado à rede elétrica.

II. MODELO DINÂMICO DA MÁQUINA DE INDUÇÃO GAIOLA DE ESQUILO

O modelo dinâmico do GIGE, pode ser descrito por equações diferenciais [32], que representam o comportamento dinâmico, e pode ser expressa em um referencial estacionário, ou seja, em coordenadas $\alpha\beta$ conforme as equações apresentadas abaixo:

$$\vec{v}_{1,\alpha\beta} = R_1 \vec{i}_{1,\alpha\beta} + \frac{d\vec{\lambda}_{1,\alpha\beta}}{dt} \quad (1)$$

$$0 = \vec{v}_{2,\alpha\beta} = R_2 \vec{i}_{2,\alpha\beta} + \frac{d\vec{\lambda}_{2,\alpha\beta}}{dt} - j(N_p \omega_{mec}) \vec{\lambda}_{2,\alpha\beta} \quad (2)$$

$$\vec{\lambda}_{1,\alpha\beta} = L_1 \vec{i}_{1,\alpha\beta} + L_m \vec{i}_{2,\alpha\beta} \quad (3)$$

$$\vec{\lambda}_{2,\alpha\beta} = L_m \vec{i}_{1,\alpha\beta} + L_2 \vec{i}_{2,\alpha\beta} \quad (4)$$

sendo que, os subscritos 1 e 2 representam estator e rotor, respectivamente, \vec{v} vetor tensão, \vec{i} vetor corrente. R são as resistências elétricas, L são as indutâncias e L_m é a indutância de magnetização. N_p número de pares de polos e ω_{mec} a velocidade angular mecânica [32].

O torque eletromagnético pode ser calculado de acordo com

a equação apresentada a seguir:

$$T_e = \frac{3N_p L_m}{\sigma L_1 L_2} |\lambda_{1,\alpha\beta}| |\lambda_{2,\alpha\beta}| \text{sen}(\delta). \quad (5)$$

Existem três equações que relacionam a derivada do fluxo do estator e rotor, com as demais variáveis que compõem o modelo da máquina de indução conforme demonstrado nas equações apresentadas abaixo, que podem ser obtidas a partir de (1)-(4).

$$\frac{d\vec{\lambda}_{1,\alpha\beta}}{dt} = \frac{-R_1}{\sigma L_1} \vec{\lambda}_{1,\alpha\beta} + \frac{R_1 L_m}{\sigma L_1 L_2} \vec{\lambda}_{2,\alpha\beta} + \vec{v}_{1,\alpha\beta} \quad (6)$$

$$\frac{d\vec{\lambda}_{2,\alpha\beta}}{dt} = \frac{R_2 L_m}{\sigma L_1 L_2} \vec{\lambda}_{1,\alpha\beta} + \left(\frac{-R_2}{\sigma L_2} + j\omega_m \right) \vec{\lambda}_{2,\alpha\beta} \quad (7)$$

$$\frac{d\vec{\lambda}_{1,\alpha\beta}}{dt} = R_1 \vec{i}_{1,\alpha\beta} - \vec{v}_{1,\alpha\beta} \quad (8)$$

sendo que:

$$\sigma = 1 - \left(\frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right). \quad (9)$$

A. Controle Preditivo Aplicado ao Controle Direto de Torque da GIGE

O controle de uma máquina de indução pode ser realizado com a escolha apropriada da sequência dos vetores de tensão, em função do acionamento dos comutadores conforme mostrado na Tabela I. Esses vetores são aplicados no estator da máquina, com isso alterando a magnitude do fluxo do estator, e ao mesmo tempo o ângulo entre o rotor e o estator, tal ideia é utilizada para o controle direto de torque [25].

TABELA I
Vetores de Tensão e Estado de Chaveamento

S_a	S_b	S_c	Tensão do vetor $\vec{v}_1(j)$
0	0	0	$\vec{v}_1(1) = 0$
1	0	0	$\vec{v}_1(2) = \frac{2}{3} V_{dc}$
1	1	0	$\vec{v}_1(3) = \frac{1}{3} V_{dc} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
0	1	0	$\vec{v}_1(4) = -\frac{1}{3} V_{dc} + j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
0	1	1	$\vec{v}_1(5) = -\frac{2}{3} V_{dc}$
0	0	1	$\vec{v}_1(6) = -\frac{1}{3} V_{dc} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
1	0	1	$\vec{v}_1(7) = \frac{1}{3} V_{dc} - j \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc}$
1	1	1	$\vec{v}_1(8) = 0$

O controle preditivo de torque usa o mesmo princípio, mas com a ideia de prever o valor futuro do fluxo do estator e do torque gerado. Este tipo de controlador possui um número finito de predição, por tanto tratasse de um controlador MPC similar desenvolvido em [25], utilizando apenas um horizonte de controle e um de predição. A função custo é minimizada com emprego das referências desejadas e os valores de torque e fluxo preditos. Esta minimização possibilita a escolha dos vetores de tensão que devem ser aplicados no estator do gerador. O sistema de controle preditivo pode ser observado no diagrama de blocos na Figura 2 [33].

Para realizar as predições deve se utilizar o modelo matemático do gerador de indução em função da corrente do estator $\vec{i}_1(k)$ amostrada, e discretizar (3), (4), (6) e (8) pelo

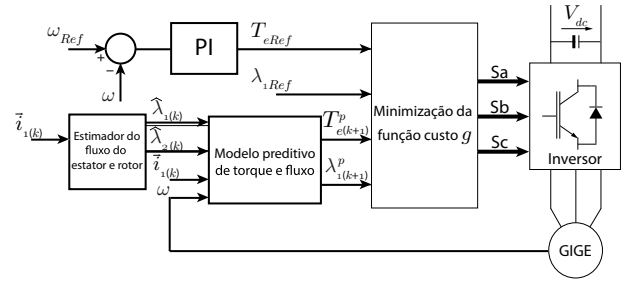


Fig. 2. Diagrama em blocos do sistema de controle preditivo para GIGE.

método de Euler. Neste sentido, é apresentada uma abordagem diferente da apresentada no trabalho [26]. Neste caso, a estimativa do torque é feita por meio dos fluxos do estator e rotor. Assim, após manipulações algébricas pode-se obter as equações que permitem obter o futuro valor do fluxo do estator e do rotor, as quais são dadas por:

$$\hat{\lambda}_1(k) = \hat{\lambda}_1(k-1) + T_s \vec{v}_1(j) - R_1 T_s \vec{i}_1(k) \quad (10)$$

$$\hat{\lambda}_2(k) = \frac{L_2}{L_m} \hat{\lambda}_1(k) + \left(L_m - \frac{L_1 L_2}{L_m} \right) \vec{i}_1(k) \quad (11)$$

$$\lambda_1^p(k+1) = T_s \left[\frac{-R_1}{\sigma L_1} \hat{\lambda}_1(k) + \frac{R_1 L_m}{\sigma L_1 L_2} \hat{\lambda}_2(k) + \vec{v}_1(j) \right] + \hat{\lambda}_1(k) \quad (12)$$

$$\lambda_2^p(k+1) = T_s \left[\frac{R_2 L_m}{\sigma L_1 L_2} \hat{\lambda}_1(k) + \left(\frac{-R_2}{\sigma L_2} + j\omega_m \right) \hat{\lambda}_2(k) \right] + \hat{\lambda}_2(k) \quad (13)$$

onde T_s é o tempo de amostragem, $\hat{\lambda}_1(k)$ e $\hat{\lambda}_2(k)$ representam a estimação do fluxo do estator e fluxo do rotor, respectivamente. Assim, com a predição do fluxo e da corrente do estator, pode-se obter a do torque eletromagnético conforme a equação:

$$T_e^p(k+1) = \frac{3N_p L_m}{\sigma L_1 L_2} [\lambda_{1,\alpha\beta}^p(k+1) \lambda_{2,\alpha\beta}^p(k+1)] \text{sen}(\delta) \quad (14)$$

ou

$$T_e^p(k+1) = \frac{3N_p L_m}{\sigma L_1 L_2} [\lambda_{1,\alpha}^p(k+1) \lambda_{2,\beta}^p(k+1) - \lambda_{2,\alpha}^p(k+1) \lambda_{1,\beta}^p(k+1)]. \quad (15)$$

Uma vez feita a predição do fluxo do estator e torque eletromagnético, ambos expressos em função do vetor de tensão gerado pelo inversor é desenvolvida uma função custo contendo a lei de controle, sendo basicamente uma comparação entre fluxo e torque de referência e seus valores previstos, dada por:

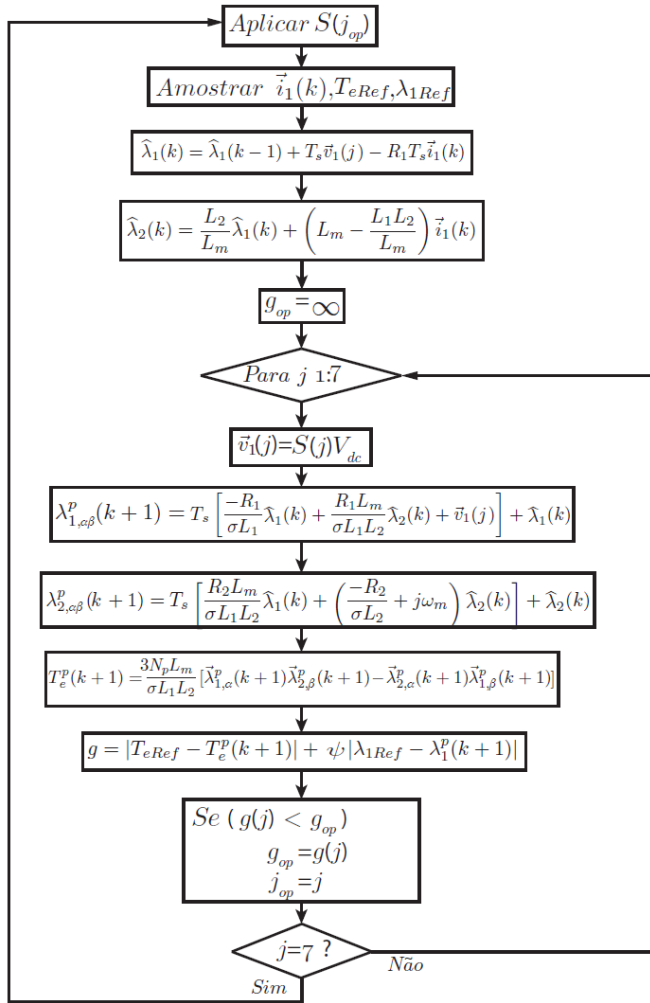


Fig. 3. Fluxograma para o controle preditivo do GIGE.

$$g = |T_{eRef} - T_e^p(k+1)| + \psi |\lambda_{1Ref} - \lambda_1^p(k+1)|. \quad (16)$$

A função é resolvida para cada valor do vetor de tensão $\vec{v}_1(j)$ e é escolhido o que gera o menor custo, o termo ψ é um fator que pondera a importância do controle do fluxo versus do torque, sendo ele o único parâmetro de ajuste para o controle preditivo de torque.

Após ser aplicado o vetor tensão, em cada passo de amostragem são medidas as correntes do estator e os valores de referência. Assim, a partir de (10) e (11) são estimados o fluxo do estator e rotor. Os valores calculados são utilizados na predição do comportamento futuro do torque (15) e dos fluxos do estator e rotor (12) com cada possível vetor tensão que pode ser aplicado pelo inversor. Cada resultado é aplicado na função custo e minimizada. O vetor com o menor valor de g (16) é escolhido pelo controlador e aplicado no conversor.

O fluxograma apresentado na Figura 3 representa o algoritmo utilizado para o controle preditivo para o GIGE.

B. Modelo Matemático do Conversor Conectado a Rede

O conversor conectado a rede foi modelado em função da tensão da rede, do inversor e o filtro indutivo (RL). O filtro indutivo foi aplicado entre o conversor e a rede, como pode ser

observado na Figura 4. A equação a seguir pode ser empregada para representar o sistema e tornando possível analisar o fluxo de potência injetada na rede:

$$\vec{v}_{inv,\alpha\beta} = R_g \vec{i}_{g,\alpha\beta} + L_g \frac{d\vec{i}_{g,\alpha\beta}}{dt} + \vec{v}_{g,\alpha\beta} \quad (17)$$

sendo que, $\vec{v}_{inv,\alpha\beta}$ e $\vec{v}_{g,\alpha\beta}$ são os vetores de tensão do conversor e da rede, respectivamente. $\vec{i}_{g,\alpha\beta}$ é o vetor de corrente da rede e L_g e R_g são as indutâncias e resistência do filtro, respectivamente.

A potência ativa (P) e reativa (Q) são expressas por:

$$P = \frac{3}{2} \Re[\vec{v}_g \cdot \vec{i}_g^*] \quad (18)$$

$$Q = \frac{3}{2} \Im[\vec{v}_g \cdot \vec{i}_g^*]. \quad (19)$$

C. Controle Preditivo Aplicado no Conversor do Lado da Rede

O controle preditivo é baseado no modelo para obter o comportamento futuro do sistema e então por meio de uma função custo minimizar o erro [31]. O controle tem como objetivo controlar a potência ativa e reativa injetada na rede, através dos vetores de tensão do inversor de acordo com a Tabela I.

A Figura 4 apresenta o diagrama em blocos do sistema de controle para a rede.

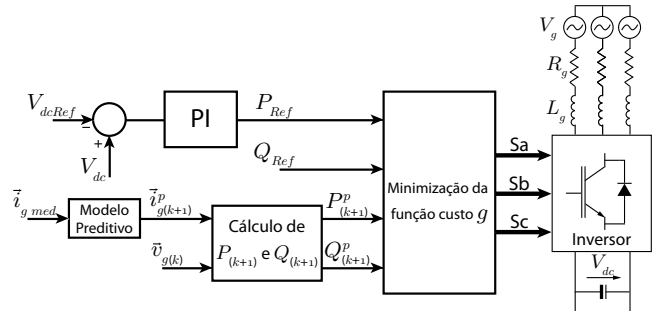


Fig. 4. Diagrama em blocos do sistema de controle preditivo para o conversor conectado a rede.

Para a predição da potência é necessário primeiramente prever a corrente da rede, a partir da corrente da rede $\vec{i}_g(k)$ e dos vetores de tensão $\vec{v}_{inv}(j)$ discretizados utilizando a derivada de Euler, tal como:

$$\vec{i}_g^p(k+1) = \left(1 - \frac{T_s R_g}{L_g}\right) \vec{i}_g(k) + \frac{T_s}{L_g} (\vec{v}_{inv}(j) - \vec{v}_g) \quad (20)$$

sendo T_s o tempo de amostragem. Após realizar a predição da corrente, é possível obter os valores futuros de P e Q por meio de:

$$P^p(k+1) = \frac{3}{2} \Re[\vec{v}_g(k+1) \cdot \vec{i}_g^{p*}(k+1)] \quad (21)$$

$$Q^p(k+1) = \frac{3}{2} \Im[\vec{v}_g(k+1) \cdot \vec{i}_g^{p*}(k+1)] \quad (22)$$

sendo * a representação do complexo conjugado, e uma vez que a referência de potência ativa é gerada pelo controlador

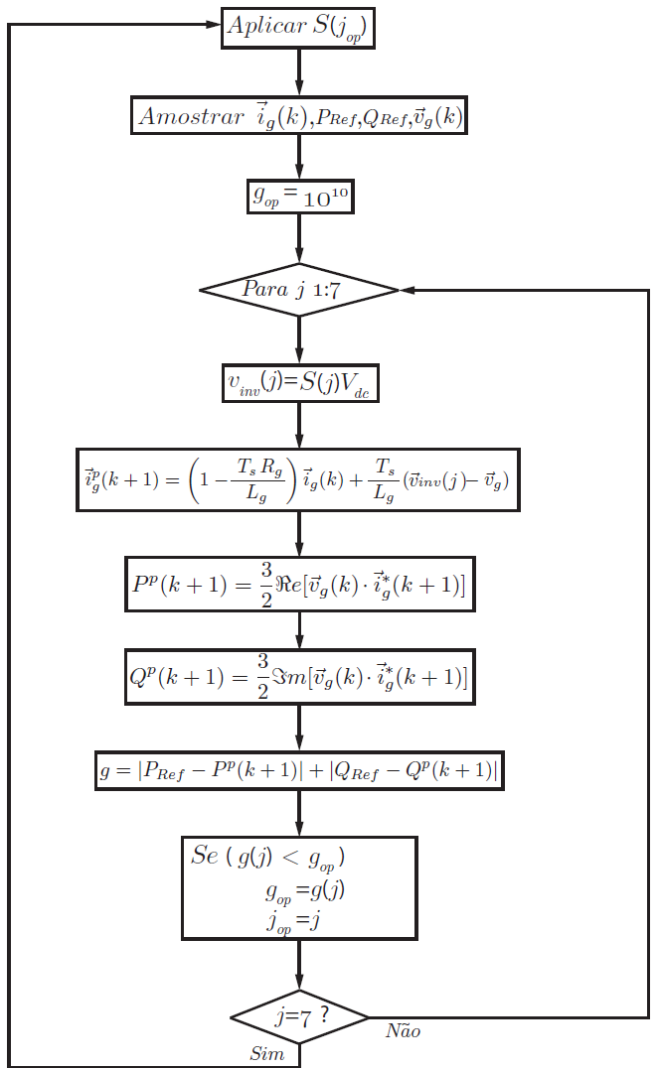


Fig. 5. Fluxograma para o controle preditivo da rede.

PI que processa o erro da tensão do barramento CC e sua referência de forma que o controle direto de potência mantém a tensão do barramento constante.

Para um pequeno tempo de amostragem, devido a dinâmica da tensão da rede pode-se considerar $v_g(k+1) \approx v_g(k)$. Por fim, a equação custo possui a lei de controle do sistema e quando minimizada se obtém a solução ótima:

$$g = |P_{Ref} - P^p(k+1)| + |Q_{Ref} - Q^p(k+1)|. \quad (23)$$

Após ser aplicado o vetor tensão, em cada passo de amostragem são medidas as correntes, as tensões da rede e os valores de potência ativa e reativa de referência. Os valores medidos são utilizados na predição do comportamento futuro da corrente (20), e conseqüentemente obtendo os valores futuros das potências ativas e reativas por meio de (21) e (22). Cada resultado é aplicado na função custo e minimizado. O vetor com o menor valor de g (23) é escolhido pelo controlador e aplicado no conversor.

O fluxograma apresentado na Figura 5 representa o algoritmo utilizado para o controle preditivo aplicado no controle direto de potência do conversor conectado à rede elétrica.

III. ANÁLISE DE VARIAÇÃO DE PARÂMETROS

Para a análise do comportamento do controlador com variação dos parâmetros da máquina, foi realizado no ambiente de simulação onde foi possível variar a resistência e a indutância do rotor e estator, acrescentando 30% do valor real. Na Figura 6 pode se ver o resultado da simulação.

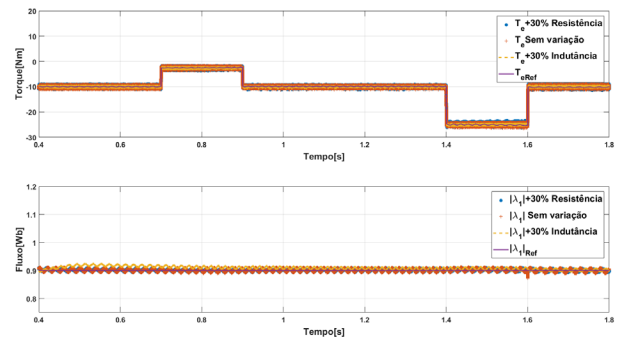


Fig. 6. Resposta de torque e fluxo do controlador com variação de parâmetros.

Nota se que quando existe um aumento na resistência, o sistema se mantém estável porém há um aumento na oscilação do ruído no torque. No entanto quando existe o aumento na indutância, o sistema continua estável e diminui o ruído no torque, entre tanto existe maior variação no valor do módulo do fluxo.

IV. ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A proposta do controle preditivo para o sistema de geração de energia eólica, foi implementado utilizando um conversor *back-to-back* para processar a energia gerada pelo gerador de indução gaiola acionado por um motor CC. Para realizar o cálculo dos controladores e o processamento dos sinais de tensões e correntes medidas, utilizou-se um processador digital de sinais da Texas Instruments modelo TMS320F28335, também foi utilizados placas eletrônicas desenvolvidas no laboratório, para condicionar os sinais que são aquisitados pelo DPS, por meio de um conversor analógico digital. A Figura 7 apresenta os equipamentos utilizados no testes realizados.

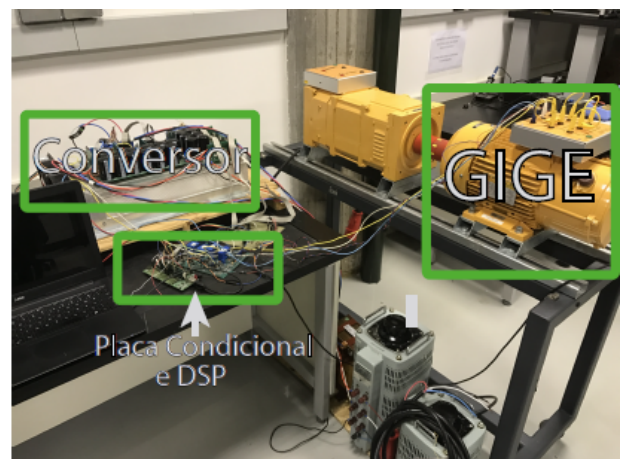


Fig. 7. Foto da bancada de teste.

A. Testes do Conversor do Lado da Rede

O primeiro teste realizado foi para validar o controlador PI da tensão do barramento CC. Nesse sentido, sua sintonia foi feita por meio de método de simulação no matlab/simulink, de forma heurística até ser capaz de seguir a referência com erro nulo. Os valores obtidos para o ganho proporcional foi de 50 e para o ganho integral foi de 100. Existe também o filtro RL conectado a rede, o qual foi dimensionado em função da tensão do barramento, variação da corrente e frequência de chaveamento e assim buscando menor distorção na corrente por meio de (1) vista em [34]. Mesmo que a frequência de chaveamento para esse sistema seja variável, existe um valor médio como apresentado na Figura 8, e visto em [35], e também comentado em [26].

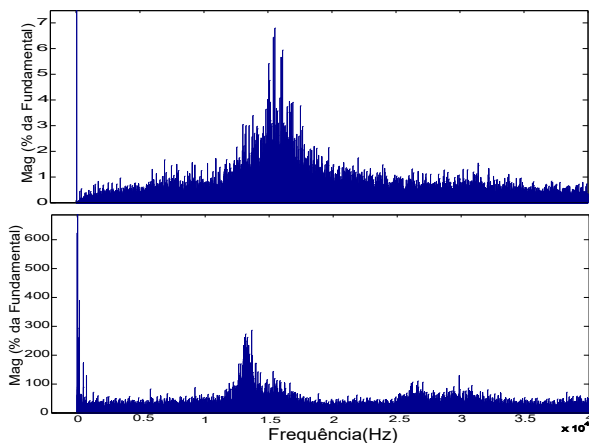


Fig. 8. FFT do sinal de chaveamento, o gráfico superior é referente ao lado da rede e o gráfico inferior ao lado do gerador.

Neste caso, foi possível verificar a atuação do controlador devido o aumento de potência ativa injetada na rede quando a tensão do barramento ultrapassa o valor de referência. Isto acontece devido variação da velocidade do gerador, consequentemente variando a potência gerada por parte do GIGE. O resultado do teste está mostrado na Figura 9.

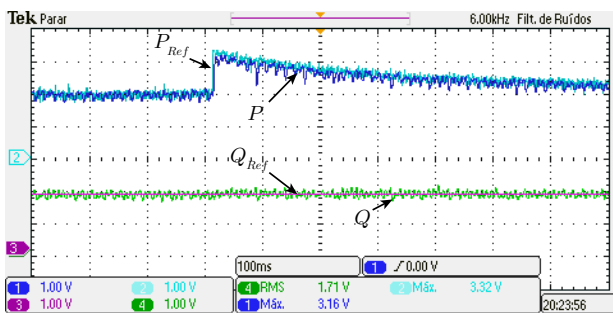


Fig. 9. Resposta dinâmica das potências ativas e reativas com ação do controlador PI. Azul escuro é a potência ativa medida, azul claro é a potência ativa de referência. Rosa é a potência reativa medida, verde é a potência reativa de referência.

É possível observar que quando o controlador identifica uma sobre-tensão no capacitor, injeta-se um valor extra de potência na rede até que valor de referência do barramento seja atendido.

A Figura 10 apresenta os resultados para teste de entrada

ao degrau de referência para as potência ativa e reativa para o controle direto de potência apresentado neste trabalho. Neste caso, as referências da potência ativa são de 0 W a 500 W e as referências das potências reativa são de -300 var a 300 var. Também pode ser observado na Figura 10 em que o controlador atende às referências das potências sem sobressinal.

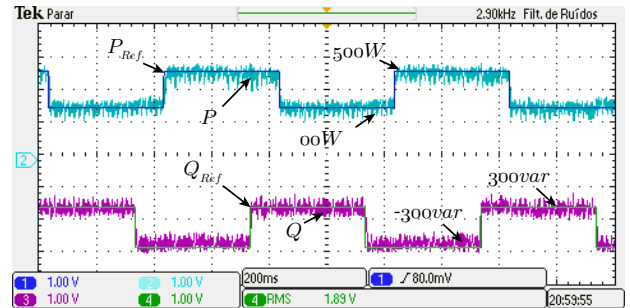


Fig. 10. Resposta dinâmica das potências ativas e reativas seguindo a referência.

O detalhe da resposta dinâmica do controlador preditivo apresentado neste trabalho para as entradas ao degrau mencionadas podem ser observadas nas Figuras 11 e 12. Também, é possível visualizar a dinâmica da tensão e corrente da rede quando as referências das potências ativa e reativa são alteradas. Neste caso, o controlador possui um tempo de acomodação de 7,2 ms para ambos os testes.

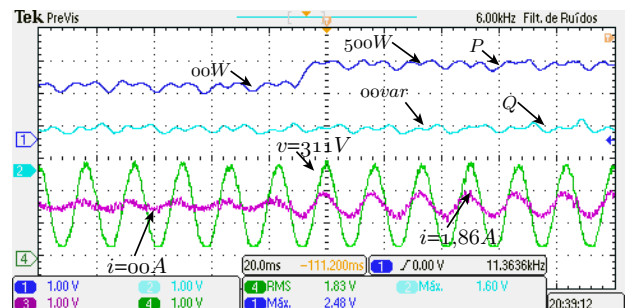


Fig. 11. Tensão e corrente para o degrau de potência ativa.

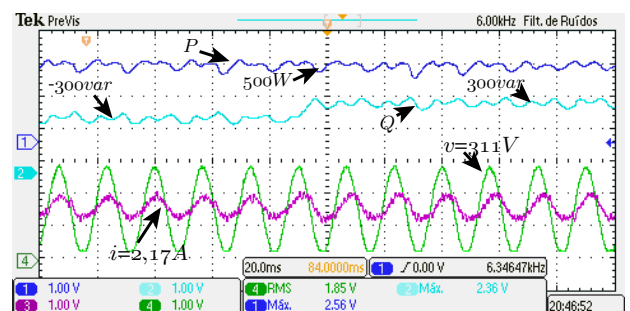


Fig. 12. Tensão e corrente para o degrau de potência reativa.

B. Testes do Conversor Conectado ao GIGE

Nos testes do lado do gerador de indução, o controlador preditivo direto de torque utilizando um fator de ponderação na equação de custo de $\psi = 20$, e o controlador PI tem os ganhos proporcional igual a 30 e integral igual a 10. Sendo que os ganhos foram ajustado da mesma forma que o PI do lado do conversor. Os experimentos utilizaram como entrada

uma variação de torque eletromagnético entre -1 Nm e -5 Nm e fluxo em um valor constante de 0,8 Wb, conforme apresentado na Figura 13.

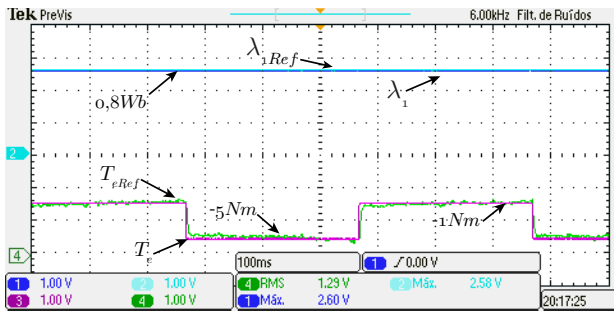


Fig. 13. Resposta dinâmica torque e fluxo.

Como visto, o controlador é capaz de acompanhar o sinal de referência com erro de regime nulo, sem sobre-sinal e com tempo de acomodação de 7,6 ms.

O teste seguinte apresentado na Figura 14 foi realizado com a entrada ao degrau de fluxo variando entre 0,7 Wb a 0,8 Wb e com torque constante em -5 Nm e com velocidade variável na faixa de 1600 rpm até 1800 rpm. Novamente é possível observar a ação do controle em acompanhar o sinal de referência de forma eficaz.

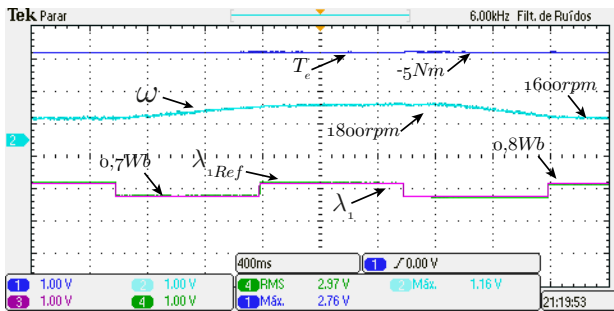


Fig. 14. Resposta do controlador preditivo com o gerador operando com velocidade variável

C. Testes do Sistema Completo

Com intenção de validar todo o sistema de geração conectado à rede elétrica, foi realizado um teste no qual se varia a velocidade do gerador de indução com torque constante, por consequência, a potência gerada é aumentada. Sendo assim, o sistema de controle preditivo do conversor conectado à rede injetará mais potência na rede elétrica de forma que mantenha a tensão do barramento no seu valor de referências como pode ser visto na Figura 15.

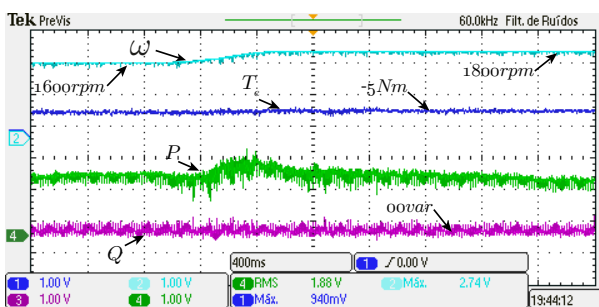


Fig. 15. Resposta do controlador com torque constante e velocidade variável

V. CONCLUSÃO

Este artigo abordou uma proposta de controle preditivo para o GIGE conectado à rede elétrica com emprego de um conversor *back-to-back*, a fim de demonstrar as vantagens em prever os valores de correntes, fluxos e torque em um sistema de energia eólica em cenários diferentes, com perfil de velocidade constante e variável.

Os resultados apresentados mostram que o controle preditivo é capaz de regular o sistema em ambos os cenários, mesmo com uma variação na velocidade, mantendo o fluxo constante e atendendo o torque requisitado. Da mesma maneira o controle direto das potências ativa e reativa do conversor conectado à rede elétrica também atende às referências. A estratégia se mostrou capaz de seguir as referências com erro estacionário nulo, sem sobressinal e tempo de acomodação menor que 8 ms. A estratégia proposta não necessita de algoritmos complexos para sua implementação, e também existem poucos parâmetros a serem ajustados, tornando assim um controlador de baixa complexidade de implementação.

Entretanto, o sistema trabalha com uma frequência de chaveamento variável, por efeito do cálculo da sequência de chaves a serem acionadas. Sendo assim, pode-se concluir que em função das vantagens o controle preditivo é viável para aplicação em sistema de geração eólicas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP, pelo suporte financeiro neste trabalho e a LEPS/UFABC pela infraestrutura oferecida.

APÊNDICE

As Tabelas II e III são os parâmetros do gerador de indução gaiola de esquilo e da rede a qual o gerador esta conectado.

TABELA II
Parâmetros do Gerador

Parâmetros	Valor	Unidade
P	3000	[W]
V	460	[V]
Velocidade	1750	[rpm]
Torque Nominal	16	[Nm]
Fluxo nominal	0,99	[Wb/esp]
Número de Polos	4	[-]
ψ	20	[-]
f	60	[Hz]
R_s	1,115	[Ω]
L_s	209,7	[mH]
R_r	1,083	[Ω]
L_r	209,7	[mH]
L_m	203,7	[mH]
J	0,05	[kgm ²]
f_o	≈ 16	[kHz]

TABELA III
Parâmetros da Rede

Parâmetro	Valor	Unidade
P_{rated}	3000	[W]
V_{RMS}	220	[V]
L_g	22	[mH]
C	2,4	[mF]
f_o	≈ 16	[kHz]

REFERÊNCIAS

- [1] B. H. Chowdhury, S. Chellapilla, “Double-fed induction generator control for variable speed wind power generation”, *Electric Power Systems Research*, vol. 76, no. 9, pp. 786–800, jun 2006.
- [2] Global Wind Energy Council (GWEC), “Global wind statistics 2015”, Web, [Online]. Disponível: <http://www.gwec.net>, 2015.
- [3] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Banco de Informações de Geração, Capacidade de Geração Eólica do Brasil”, [Online]. Disponível: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=7&fase=3>, 2016.
- [4] L. Harnefors, H.-P. Nee, “Model-based current control of AC machines using the internal model control method”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 1, pp. 133–141, Feb 1998.
- [5] H. Nian, T. Wang, Z. Zhu, “Voltage imbalance compensation for doubly fed induction generator using direct resonant feedback regulator”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 31, no. 2, pp. 614–626, Feb 2016.
- [6] C. E. Capovilla, I. R. S. Casella, A. J. S. Filho, T. A. dos Santos Barros, E. R. Filho, “Performance of a Direct Power Control System Using Coded Wireless OFDM Power Reference Transmissions for Switched Reluctance Aerogenerators in a Smart Grid Scenario”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 1, pp. 52–61, jan 2015.
- [7] J. A. Baroudi, V. Dinavahi, A. M. Knight, “A review of power converter topologies for wind generators”, *Renewable Energy*, vol. 32, no. 14, pp. 2369–2385, nov 2007.
- [8] F. Blaabjerg, K. Ma, “Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, pp. 139–152, Sept 2013.
- [9] K. H. Tan, “Squirrel-Cage Induction Generator System Using Wavelet Petri Fuzzy Neural Network Control for Wind Power Applications”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 7, pp. 5242–5254, jul 2016.
- [10] J. R. Rodríguez, J. W. Dixon, J. R. Espinoza, J. Pontt, P. Lezana, “PWM regenerative rectifiers: state of the art”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, no. 1, pp. 5–22, 2005.
- [11] M. E. de Oliveira Filho, J. R. Gazoli, A. J. Sguarezi Filho, E. Ruppert Filho, “A control method for voltage source inverter without dc link capacitor”, in *Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, pp. 4432–4437, 2008.
- [12] “SCIG wind turbine wireless controlled using morphological filtering for power quality enhancement”, *Renewable Energy*, vol. 92, pp. 303 – 311, jul.
- [13] R. N. Beres, X. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg, C. L. Bak, “A Review of Passive Power Filters for Three-Phase Grid-Connected Voltage-Source Converters”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 54–69, mar 2016.
- [14] M. A. Hernandez Navas, J. L. Azcue Puma, A. J. Sguarezi Filho, “Direct torque control for squirrel cage induction generator based on wind energy conversion system with battery energy storage system”, in *IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [15] C. S. Kumar, A. Sarma, P. Prasad, “Fuzzy logic based control of wind turbine driven squirrel cage induction generator connected to grid”, in *International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, pp. 1–6, IEEE, 2006.
- [16] C. Capovilla, I. R. Casella, A. J. Sguarezi Filho, J. Azcue-Puma, R. Jacomini, E. Ruppert, “A wind energy generator for smart grid applications using wireless-coded neuro-fuzzy power control”, *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 68, no. 12, pp. 2112–2123, dec 2014.
- [17] F.-J. Lin, K.-H. Tan, D.-Y. Fang, Y.-D. Lee, “Intelligent controlled three-phase squirrel-cage induction generator system using wavelet fuzzy neural network for wind power”, *IET Renewable Power Generation*, vol. 7, no. 5, pp. 552–564, 2013.
- [18] S. Meddouri, L. Dao, L. Ferrarini, “Performance analysis of an autonomous induction generator under different operating conditions using predictive control”, in *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, pp. 1118–1124, IEEE, 2015.
- [19] V. R. Chowdhury, D. Kastha, “Control of a self-excited squirrel cage induction machine based wind energy conversion system operating in both stand alone and grid connected modes”, *Energy Procedia*, vol. 54, pp. 35–46, aug 2014.
- [20] J. L. Domínguez-García, O. Gomis-Bellmunt, L. Trilla-Romero, A. Junyent-Ferré, “Indirect vector control of a squirrel cage induction generator wind turbine”, *Computers & Mathematics with Applications*, vol. 64, no. 2, pp. 102–114, mar 2012.
- [21] M. Q. Duong, F. Grimaccia, S. Leva, M. Mussetta, K. H. Le, “Improving transient stability in a grid-connected squirrel-cage induction generator wind turbine system using a fuzzy logic controller”, *Energies*, vol. 8, no. 7, pp. 6328–6349, 2015.
- [22] A. J. S. Filho, A. L. Oliveira, L. L. Rodrigues, E. C. M. Costa, R. V. Jacomini, “A robust finite control set applied to the DFIG power control”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, pp. 1–1, may 2018.
- [23] Y. Zhang, H. Yang, “Two-vector-based model predictive torque control without weighting factors for induction motor drives”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 2, pp. 1381–1390, 2016.
- [24] P. Alkorta, O. Barambones, J. A. Cortajarena, A. Zubizarreta, “Efficient multivariable generalized predictive control for sensorless induction motor drives”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 9, pp. 5126–5134, sep 2014.

- [25] J. Rodriguez, P. Cortes, *Predictive control of power converters and electrical drives*, vol. 40, John Wiley & Sons, 2012.
- [26] A. S. Lunardi, J. S. S. Chaves, A. J. Sguarezi Filho, “Predictive Direct Torque Control for a Squirrel Cage Induction Generator Grid Connected for Wind Energy Applications”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 11, pp. 4454–4461, dec 2016.
- [27] D. Holmes, D. Martin, “Implementation of a direct digital predictive current controller for single and three phase voltage source inverters”, in *Industry Applications Conference (IAS)*, vol. 2, pp. 906–913, IEEE, 1996.
- [28] A. Khatamianfar, M. Khalid, A. V. Savkin, V. G. Agelidis, “Wind power dispatch control with battery energy storage using model predictive control”, in *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, pp. 733–738, IEEE, jan 2012.
- [29] M. Khalid, A. Savkin, “A model predictive control approach to the problem of wind power smoothing with controlled battery storage”, *Renewable Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 1520–1526, may 2010.
- [30] I. M.-B. Hassine, M. Naouar, N. Mrabet-Bellaaj, “Model based predictive control strategies for wind turbine system based on PMSG”, in *International Renewable Energy Congress (IREC)*, pp. 1–6, IEEE, 2015.
- [31] A. J. Sguarezi Filho, E. Ruppert Filho, “Model-based predictive control applied to the doubly-fed induction generator direct power control”, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 3, no. 3, pp. 398–406, 2012.
- [32] G. Abad, J. Lopez, M. Rodríguez, L. Marroyo, G. Iwanski, *Doubly fed induction machine: modeling and control for wind energy generation*, vol. 85, John Wiley & Sons, 2011.
- [33] H. Gaziolla, *Controle Direto de Torque Baseado no Controle do Ângulo da Carga Utilizando Controladores PIs*, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do ABC Faculdade de Engenharia Elétrica, 2014.
- [34] R. N. Beres, X. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg, C. L. Bak, “A review of passive power filters for three-phase grid-connected voltage-source converters”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 4, no. 1, pp. 54–69, dec 2016.
- [35] J. Rodriguez, J. Pontt, C. A. Silva, P. Correa, P. Lezana, P. Cortés, U. Ammann, “Predictive current control of a voltage source inverter”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 495–503, 2007.

DADOS BIOGRÁFICOS

Angelo dos Santo Lunardi, nascido em 28/07/1991 em Santo André-São Paulo. Recebeu seu Bacharel em engenharia Eletrônica em 2015 pelo Instituto Mauá de Tecnologia, onde durante o curso realizou trabalhos científicos inclusive uma iniciação científica em 2013 com foco em simulação computacional e controle multivariável, recebeu em 2017 o título de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do ABC. Atualmente bolsista pela CAPES e estudante no Doutorado em Engenharia elétrica pela Universidade de São paulo, com pesquisa aplicada à geração de energia eólica com máquinas de indução gaiola de esquilo e técnicas de controle aplicado.

Alfeu J. Sguarezi Filho, Recebeu seu mestrado e seu Doutorado pela Universidade de Campinas no Brasil, respectivamente em 2007 e 2010. É professor da Universidade Federal do ABC - UFABC, em Santo André, Brasil, lecionando nas áreas de Máquinas Elétricas, Eletrônica de Potência e Acionamentos Elétricos. Membro Sênior da IEEE. Seus interesses de pesquisa são acionamentos de máquinas, energia eólica e fotovoltaica, geradores de indução alimentados duplamente, controle de energia e sistemas de energia elétrica.