

UM NOVO SISTEMA PARA CONTROLE DE VELOCIDADE EM AEROGERADORES UTILIZANDO O REGULADOR ELETROMAGNÉTICO DE FREQUÊNCIA

Paulo Vitor Silva¹, Ricardo Ferreira Pinheiro², Andrés Ortiz Salazar², Luciano Pereira dos Santos Júnior¹, Jefferson Doolan Fernandes¹

¹Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Natal – RN, Brasil

²Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal – RN, Brasil

e-mail: paulo.silva@ifrn.edu.br

Resumo – Um dos dispositivos mais utilizados em algumas topologias de aerogeradores são as caixas de engrenagens mecânicas que, além de uma vida útil curta representam, frequentemente, fontes de ruído e defeitos. Este trabalho apresenta um novo sistema para controle de velocidade em aerogeradores, o Regulador Eletromagnético de Frequência (REF). O REF dispensa caixas de transmissão, representa uma inovação tecnológica, e utiliza, para exercer a regulação de velocidade, uma máquina de indução adaptada, na qual o estator passa a ser girante, solidariamente ao eixo da turbina. A modelagem matemática do REF é apresentada, e, através de resultados de simulação e práticos em diferentes condições de vento, a eficiência do sistema é validada no objetivo de controlar a velocidade do eixo de saída do REF, que movimenta o eixo do gerador, à velocidade síncrona.

Palavras-Chave – Aerogerador, Controle de Velocidade, Regulador Eletromagnético de Frequência.

A NEW SYSTEM FOR SPEED CONTROL IN WIND TURBINES USING THE ELECTROMAGNETIC FREQUENCY REGULATOR

Abstract – One of the most used devices in some topologies are the mechanical gearboxes which, along with a short service life, often represent sources of noise and defects. This work presents a new system for speed control in wind turbines, the Electromagnetic Frequency Regulator – EFR. The EFR does not need these transmission boxes, representing a technological innovation, using for that an adapted induction machine, in which the stator becomes mobile, supportive to the axis of the turbine. The mathematical modeling of the EFR is shown, and, through simulation and practical results in different wind conditions, the system efficiency is validated in order to control the speed of the output shaft of the EFR, that moves the generator shaft, at the synchronous speed.

Keywords – Electromagnetic Frequency Regulator, Speed Control, Wind Turbine.

I. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de novas fontes de energias renováveis cada vez mais impulsiona investimentos nessa área. Dentre essas fontes, a energia eólica está com grande destaque. Torna-se importante aprimorar as tecnologias envolvidas, inclusive com relação às topologias de aerogeradores, na busca de alternativas que aumentem o rendimento obtido, apesar da irregularidade inerente à velocidade do vento [1].

Dentre as tecnologias mais comumente encontradas atualmente, dois grupos se destacam: o dos aerogeradores de “velocidade variável” e os de “velocidade constante”. Os primeiros utilizam sistemas de conversão eletroeletrônicos para acoplar o aerogerador à rede elétrica, o que causa limitações operacionais devido às oscilações do vento e à qualidade da energia no ponto de conexão (PC) com a rede. O controle do conversor ligado à rede precisa ser sincronizado com as tensões do PC. A interação parque eólico/rede elétrica necessita de uma boa qualidade da tensão no PC, ocorrendo casos de desligamento do parque quando da ocorrência de distorções ou flutuações nessas tensões que ultrapassem limites fixados pelas normas técnicas. No caso do Sistema Interligado Nacional brasileiro, é a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) o órgão normatizador [2], [3]. Como exemplo dessas configurações há os geradores de indução duplamente excitados (DFIG) e os geradores síncronos multipolos.

Os aerogeradores de velocidade constante, com maior razão, necessitam de um sistema mecânico (multiplicador de velocidade) para compatibilização da velocidade da turbina com a exigida para garantir a frequência da tensão gerada compatível com a da rede elétrica. Como exemplo, temos o gerador de indução em gaiola [4]. Nele, o estator é conectado diretamente à rede elétrica e, entre os eixos da turbina e do gerador, é necessária uma caixa multiplicadora de velocidade. A frequência das tensões geradas é imposta pela frequência das tensões do PC.

Nas configurações citadas, portanto, a necessidade de sincronização com a rede em tensão e frequência, exige altos níveis de qualidade da energia no PC, o que impõe limites, estabelecidos pelos órgãos de normatização, aos níveis de potência dos parques eólicos acessantes à rede elétrica, com relação ao nível de curto-circuito do barramento de acesso.

¹Artigo submetido em 11/01/2015. Primeira revisão em 27/04/2015, segunda revisão em 22/07/2015. Aceito para publicação em 23/09/2015, por recomendação do Editor Cassiano Rech.

Da mesma forma, na operação isolada da rede elétrica, não é possível garantir os mais elevados graus de qualidade da energia produzida, o que pode dificultar a conexão de algumas cargas. Desta forma, pode-se notar que o controle de velocidade é muito importante para os sistemas de conversão da energia eólica em energia elétrica [5]-[7].

Os multiplicadores de velocidade mecânicos, que procuram garantir em sua saída a velocidade síncrona exigida pelo gerador, envolvem tecnologia muito sofisticada, de difícil acesso a informação, têm vida útil mais curta que os demais componentes do aerogerador e representam, frequentemente, fontes de ruídos e defeitos [8].

É natural, portanto, que diversos trabalhos tenham por objetivo aumentar a eficiência, a vida útil e aperfeiçoar a tecnologia desses multiplicadores. Em [9]-[17], a caixa de transmissão é constituída por um multiplicador dinâmico, formado por uma caixa de engrenagens com uma razão fixa e uma segunda caixa de engrenagens composta por um sistema hidrodinâmico. Em [10], são analisados os efeitos do sistema mais tradicional de engrenagens, conhecido como sistema de engrenagens epicicloidais ou sistema de engrenagens planetárias. Outra tecnologia, abordada em [11], trabalha com um algoritmo de rastreamento de máxima potência em um sistema de transmissão variável de energia elétrica.

Na área automobilística, encontram-se trabalhos relacionados à Continuously Variable Transmissions (CVTs), que é capaz de variar continuamente a velocidade através de um número "infinito" de proporções de engrenagens [5].

Este artigo apresenta como contribuição o REF, um novo sistema de controle de velocidade para aerogeradores, cuja validação é feita a partir de simulações e testes experimentais. Baseia-se em uma máquina que se assemelha a uma máquina de indução, a qual permite ao sistema trabalhar com velocidade variável de vento, mantendo constante a velocidade de saída. Derivado de um motor elétrico, o REF é um acoplador eletromagnético de eixos mecânicos girantes em diferentes velocidades. Na aplicação em energia eólica, dispensa o uso de caixa de transmissão mecânica e de conversores CA/CC/CA para desacoplar as tensões geradas das tensões da rede. Para realizar o controle de velocidade, o REF é associado a um inversor de frequência conectado a sua armadura, injetando correntes que produzem um campo girante, principal responsável pelo controle de velocidade. Ao dispensar o conversor eletrônico, substituído por um sistema que envolve massas girantes, o REF acrescenta uma inércia ao sistema de geração. Além disso, ao proporcionar a conexão direta do gerador síncrono à rede elétrica, introduz a possibilidade de contribuir para o nível de curto-circuito no PC. Estas duas características podem ser importantes em várias situações, a depender de uma análise preliminar dos impactos causados pela inserção do parque eólico na rede elétrica.

A organização deste trabalho segue a seguinte ordem: na Seção II será descrita a topologia proposta; a Seção III inclui as modelagens aerodinâmicas da turbina e do REF; na Seção IV é apresentada a estratégia de controle de velocidade e, na Seção V são apresentados os resultados de simulação e experimentais; na Seção VI, estão as conclusões.

II. DESCRIÇÃO DA TOPOLOGIA

A. Princípio de Funcionamento

A Figura 1 ilustra a topologia proposta. O Regulador Eletromagnético de Frequência (REF) [6], diferencia-se de uma máquina de indução com rotor em gaiola de esquilo, em dois detalhes. Primeiro, seu estator é apoiado em mancais que o permitem girar, movimentado pelo eixo da turbina eólica. Por isso, é denominado "rotor assíncrono". Segundo, conforme se vê na fotografia da Figura 2 na qual se visualiza a estrutura principal completa, anéis coletores são colocados no eixo do rotor assíncrono para permitir o contato elétrico do inversor de frequência com os enrolamentos de armadura do REF, situados no rotor assíncrono. O diagrama da Figura 3 destaca apenas o REF para apresentar seus detalhes construtivos. Para o dimensionamento do protótipo, o primeiro critério para a escolha do REF foi a seleção de uma máquina de indução com potência de até 5 cv com carcaça cilíndrica. Dentre três máquinas obtidas, foi escolhida a máquina de 3 cv por estar com potência superior e mais próxima dos demais componentes (motor de CC, gerador síncrono e inversor), assim como por ter sido verificado um bom nível de balanceamento (momento de inércia) com o estator posto a girar.

O inversor de frequência alimenta a armadura, na qual produz um campo girante. A energia utilizada pelo conversor é oriunda da bateria que armazena energia obtida de qualquer outra fonte disponível, como, por exemplo, painéis fotovoltaicos, outros aerogeradores menores ou outras fontes primárias, conforme ilustrado na Figura 1. Nos testes apresentados neste trabalho, a bateria foi carregada a partir de uma fonte de CC disponível no laboratório.

No diagrama da Figura 4, os vetores da velocidade do campo do rotor assíncrono ($\overrightarrow{W}_{c_RAS}^F$) e da velocidade final do rotor síncrono ($\overrightarrow{W}_{c_RS}$) estão referenciados ao eixo de referência fixo "F" e a velocidade do campo girante das correntes do rotor assíncrono ($\overrightarrow{W}_{CG_RAS}^{RA}$), ao referencial do rotor assíncrono. A armadura do rotor assíncrono é alimentada eletricamente através do inversor de frequência que injeta correntes à frequência necessária para o campo girante. A velocidade do campo girante ($\overrightarrow{W}_{CG_RAS}^{RA}$), acrescida da velocidade da turbina (WV), resulta na velocidade síncrona (WRM), do denominado rotor síncrono, somando-se a ela ainda o escorregamento, como ilustrado no diagrama da Figura 4 e de acordo com:

$$\overrightarrow{W}_{c_RAS}^F = \overrightarrow{W}_{CG_RAS}^{RA} + \overrightarrow{W}_V^F. \quad (1)$$

Analisando (1), percebe-se que, para velocidade de vento nula, a velocidade do campo do rotor torna-se igual à velocidade síncrona.

O deslocamento relativo do rotor síncrono em relação ao rotor assíncrono permanece equivalente ao de uma máquina de indução convencional. Contudo, a velocidade relativa entre o rotor síncrono e o eixo de referência fixo passa a ser diferente pois é a velocidade síncrona. Assim, os campos girantes dos dois rotores permanecem estacionários,

condição essencial para que seja mantido o torque eletromagnético que move o rotor síncrono.

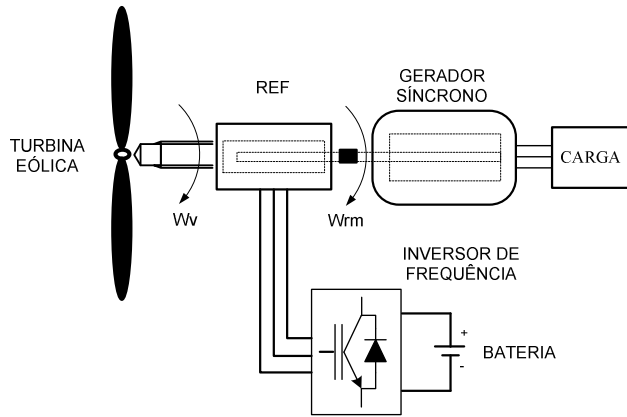


Fig. 1. Diagrama esquemático ilustrando a topologia proposta.

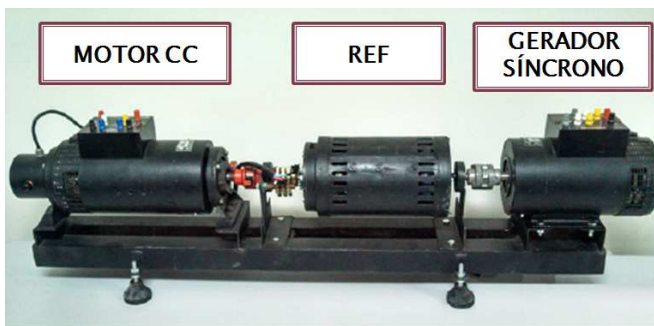


Fig. 2. Foto do protótipo da topologia proposta.

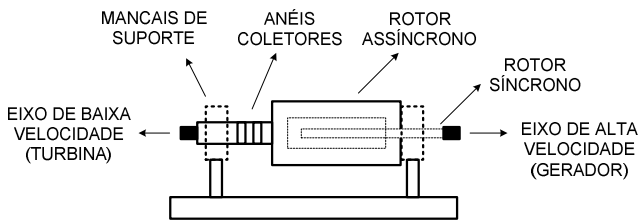


Fig. 3. Diagrama esquemático ilustrando a topologia proposta.

B. Detalhamento Físico

O rotor assíncrono acomoda o enrolamento de armadura tal qual o estator em uma máquina de indução convencional. No seu interior, separado da armadura pelo entreferro, encontra-se o rotor síncrono, do tipo gaiola de esquilo. Este rotor síncrono girará solidariamente ao eixo rotórico do gerador síncrono. Com isso, o REF realiza a função de controle de velocidade, constituindo o regulador eletromagnético de frequência.

Os parâmetros do REF são apresentados na Tabela I, sendo os mesmos utilizados na fase de simulação. A estrutura física do protótipo do REF é apresentada esquematicamente na Figura 3. Um motor CC realiza a função da turbina eólica.

Apesar do gerador síncrono ainda não ser utilizado nessa etapa do projeto, os parâmetros são apresentados na Tabela

II. É importante destacar o número de polos do gerador, o que justifica o valor de velocidade de referência escolhida para o sistema.

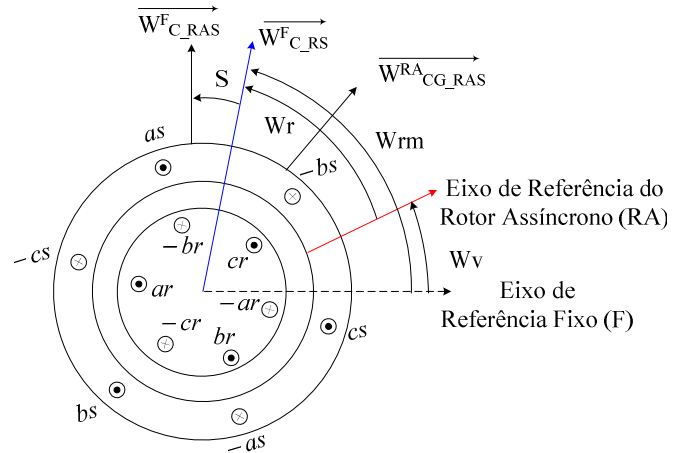


Fig. 4. Diagrama esquemático ilustrando os referenciais fixo, de campos nos rotores síncrono e assíncrono e velocidades envolvidas.

TABELA I
Parâmetros do REF

Variáveis	Valor
Tensão Nominal	380 v
Potência Nominal	3 cv
Velocidade Nominal	3400 rpm
Pares de polo	1
Resistência do Rotor Síncrono	2,3 Ω
Resistência do Rotor Assíncrono	2,8 Ω
Reatância do Rotor Síncrono	3,7 Ω
Reatância do Rotor Assíncrono	3,9 Ω
Indutância Mútua	220 mH

TABELA II
Parâmetros do Gerador Síncrono

Variáveis	Valor
Potência Nominal	1 cv
Velocidade Nominal	1800 rpm
Pares de polos	2
Resistência Síncrona	1,7 Ω
Resistência de Campo	1,1 Ω
Reatância Síncrona	4,1 Ω
Reatância de Campo	2,8 Ω
Indutância Mútua	300 mH

C. Bancada Experimental

A experimentação prática tem o objetivo de confrontar os resultados obtidos na simulação. A bancada de ensaios é composta por um sensor de condicionamento de sinais de tensão contínua do barramento do inversor, três sensores de corrente alternada, dois sensores ópticos de velocidade e uma placa de condicionamento dos pulsos de acionamento dos drivers do inversor.

O DSP utilizado é o DSP TMS320F2812 da *Texas Instrument*. Para obtenção dos sinais de velocidade é utilizada a placa NI USB-6008 da *National Instrument*, realizando a aquisição dos sinais na saída dos sensores de velocidade. Os dados adquiridos são formatados para representação gráfica.

Após montagem e aferição do seu funcionamento, foi iniciada a etapa de testes para validação experimental proposta neste trabalho.

III. MODELAGEM DO SISTEMA

Nesta seção são apresentadas as modelagens do modelo aerodinâmico da turbina e do REF.

A. Modelo Aerodinâmico da Turbina

A potência mecânica obtida no eixo de uma turbina eólica é dada por [12]:

$$P_V = \frac{\rho}{2} \pi R^2 c_p(\lambda, \beta) v_W^3 \quad (2)$$

onde:

ρ - Densidade do ar.

R - Comprimento das pás da hélice.

c_p - Coeficiente de potência da turbina eólica.

O coeficiente de potência é dado em função de λ e β , de acordo com:

$$c_p(\lambda, \beta) = 0,22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12,5}{\lambda_i}} \quad (3)$$

sendo λ_i é obtido por:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

e λ é a razão entre a velocidade linear das pontas das pás da hélice e a velocidade do vento, sendo obtida por:

$$\lambda = \frac{WV}{v_W} R \quad (5)$$

onde:

WV - Velocidade angular de saída da turbina.

v_W - Velocidade do vento.

β - Ângulo de passo das pás.

B. REF

As tensões e fluxos de armadura da máquina de indução trifásica equilibrada convencional podem ser representados, em componentes $\alpha\beta$, com o referencial no estator [13], segundo as equações:

$$\begin{aligned} u_{S\alpha} &= R_S i_{S\alpha} + \frac{d}{dt} \psi_{S\alpha} \\ u_{S\beta} &= R_S i_{S\beta} + \frac{d}{dt} \psi_{S\beta} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \psi_{S\alpha} &= L_S i_{S\alpha} + L_m i_{R\alpha} \\ \psi_{S\beta} &= L_S i_{S\beta} + L_m i_{R\beta} \end{aligned} \quad (7)$$

Para o rotor, também em componentes $\alpha\beta$:

$$\begin{aligned} u_{R\alpha} &= 0 = R_R i_{R\alpha} + \frac{d}{dt} \psi_{R\alpha} + \omega_r \psi_{R\alpha} \\ u_{R\beta} &= 0 = R_R i_{R\beta} + \frac{d}{dt} \psi_{R\beta} + \omega_r \psi_{R\beta} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \psi_{R\alpha} &= L_R i_{R\alpha} + L_m i_{S\alpha} \\ \psi_{R\beta} &= L_R i_{R\beta} + L_m i_{S\beta} \end{aligned} \quad (9)$$

onde:

R_S e R_R - Resistências do estator e rotor, respectivamente.

L_S e L_R - Indutâncias do estator e rotor, respectivamente.

L_M - Indutância mútua.

$u_{S\alpha}, u_{S\beta}, u_{R\alpha}$ e $u_{R\beta}$ - Componentes $\alpha\beta$ das tensões do estator e do rotor, respectivamente.

$i_{S\alpha}, i_{S\beta}, i_{R\alpha}$ e $i_{R\beta}$ - Componentes $\alpha\beta$ das correntes do estator e do rotor, respectivamente.

$\psi_{S\alpha}, \psi_{S\beta}, \psi_{R\alpha}$ e $\psi_{R\beta}$ - Componentes $\alpha\beta$ dos fluxos do estator e do rotor, respectivamente.

ω_r - Velocidade de rotação do rotor.

Transformando em um sistema bifásico com eixos girantes (transformada de Park), as tensões e fluxos no estator no estator, no referencial do estator, tornam-se:

$$\begin{aligned} u_{Rd} &= 0 = R_R i_{Rd} + \frac{d}{dt} \psi_{Rd} - (\omega_S - \omega_r) \psi_{Rr} \\ u_{Rq} &= 0 = R_R i_{Rq} + \frac{d}{dt} \psi_{Rq} + (\omega_S - \omega_r) \psi_{Ra} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \psi_{Rd} &= L_R i_{Rd} + L_m i_{Sd} \\ \psi_{Rq} &= L_R i_{Rq} + L_m i_{Sq} \end{aligned} \quad (11)$$

onde:

u_{Sd}, u_{Sq}, u_{Rd} e u_{Rq} - Componentes dq das tensões do estator e do rotor, respectivamente.

i_{Sd}, i_{Sq}, i_{Rd} e i_{Rq} - Componentes dq das correntes do estator e do rotor, respectivamente.

$\psi_{Sd}, \psi_{Sq}, \psi_{Rd}$ e ψ_{Rq} - Componentes dq dos fluxos do estator e do rotor, respectivamente.

ω_S - Velocidade de rotação do campo girante das correntes injetadas no estator.

O torque eletromagnético produzido na máquina de indução convencional pode ser definido por:

$$T_{mi} = p(\psi_{Sd} i_{Sq} - \psi_{Sq} i_{Sd}) \quad (12)$$

onde:

p - Pares de polo.

C. Balanço Energético

A equação principal do balanço energético do sistema é definida por:

$$H \frac{2}{P} \frac{d(w_r)}{dt} + J w_r = T_{REF} - T_e \quad (13)$$

onde:

H - Momento de inércia do conjunto.

P - Número de polos.

J - Coeficiente de atrito.

T_{REF} - Torque mecânico de saída do REF.

T_e - Resultante do torque elétrico do gerador conectado

ao eixo do rotor.

O torque mecânico de saída do REF é dado pelo somatório do torque eletromagnético produzido pela máquina de indução adaptada com o torque mecânico produzido pela turbina, sendo definido por:

$$T_{REF} = T_v + T_{mi} \quad (14)$$

onde:

T_v - Resultante do torque mecânico de saída da turbina.

IV. ACIONAMENTO E ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Os inversores estáticos de frequência tem se estabelecido como dispositivos de acionamento eficientes para controlar a velocidade de motores de indução. Sobre os tipos de métodos de controle utilizados, existem basicamente dois: controle escalar e o controle vetorial [14], [15].

Foi adotada a estratégia de controle vetorial, pela qual a corrente estatórica (neste caso, do rotor assíncrono) é decomposta em dois vetores: um que produz o fluxo magnetizante e outro que produz o torque, regulando-os separadamente. Essa estratégia permite atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controle do torque e velocidade.

Dentre as técnicas de controle vetorial para máquinas assíncronas encontradas na literatura, foi utilizada a técnica de controle em quadratura com referencial no fluxo rotórico [16].

Utilizando (10) e (11), pode-se escrever a seguinte equação dinâmica, em um referencial genérico, indicado pelo sobrescrito "g", relacionando-se o fluxo rotórico e a corrente estatórica:

$$\frac{L_m R_R}{L_R} i_s^g = \frac{\psi_r^g R_R}{L_R} + \frac{d\psi_r^g}{dt} + (w_g - w_r) \psi_r^g \quad (15)$$

Considerando o referencial no fluxo rotórico, a partir de (15) e considerando que: $\psi_{rd}^r = \psi_r^r$, $\psi_{rq}^r = 0$ e $w_s = w_r$, tem-se o modelo das correntes estatóricas em função do fluxo rotórico no referencial fluxo rotórico expresso pelas seguintes equações:

$$\frac{L_m R_R}{L_R} i_{sd}^r = \frac{\psi_r R_R}{L_R} + \frac{d\psi_r}{dt} \quad (16)$$

$$\frac{L_m R_R}{L_R} i_{sq}^r = w_r \psi_r \quad (17)$$

Com isso, o conjugado eletromagnético de (14) passa a ser definido pela seguinte equação:

$$T_{mi} = \frac{PL_m}{L_R} \psi_r i_{sq}^r \quad (18)$$

onde:

i_{sd}^r e i_{sq}^r - Correntes de referência do estator no referencial do fluxo rotórico.

Em (18), observa-se que o conjugado eletromagnético pode ser controlado através de i_{sq}^r e, por (16), o fluxo rotórico pode ser controlado através de i_{sd}^r , independente de i_{sq}^r , caracterizando o desacoplamento no controle fluxo x conjugado.

O fluxo rotórico neste trabalho é estimado, de acordo com (19), sendo calculado a partir da obtenção da corrente i_{sd} e da indutância mútua L_m [19].

$$\hat{\lambda}_{r_{est}} = L_m i_{sd} \quad (19)$$

A. Bloco de Controle

O objetivo do sistema de controle de velocidade é manter a velocidade do rotor síncrono constante e em um valor de 377 rad/s. Como o gerador síncrono utilizado no protótipo possui 2 pares de polos e o REF possui 1 par de polos, a velocidade de referência adotada foi de 188,5 rad/s, correspondendo aos 377 rad/s no eixo do gerador síncrono.

Diante do presente objetivo que foi demonstrar a viabilidade de uso do REF, preferiu-se adotar como estratégia de controle digital o clássico algoritmo do tipo proporcional integral (PI) [18]. Os controladores PI, são normalmente empregados no controle dos conversores CC-CA, quando se utilizam referências em degrau, por permitirem obter erro nulo em regime permanente devido a sua ação integral. Possui dois parâmetros a serem ajustados, que são os ganhos proporcional e integral.

A Figura 5 apresenta em diagrama de blocos a estratégia de controle do sistema. Procurou-se neste diagrama, simplificar a visualização da estrutura funcional de cada rotina implementada. O diagrama apresenta quatro controladores, utilizados para ajustar as correntes, o fluxo do rotor e a velocidade. Seus parâmetros foram determinados matematicamente de acordo com [18], que aborda de forma detalhada o projeto dos ganhos desses controladores nos eixos d e q .

Conforme pode ser observado no diagrama esquemático, o conjugado eletromagnético de referência (T_e^*) é calculado a partir de um controlador PI resultante do sinal de erro entre a velocidade de referência e velocidade de rotação do rotor síncrono.

Observa-se, através do diagrama esquemático que o sistema de controle realiza as leituras dos sinais de corrente de armadura e de velocidade do rotor síncrono do REF. Na seqüência, são realizadas transformações de variáveis nas

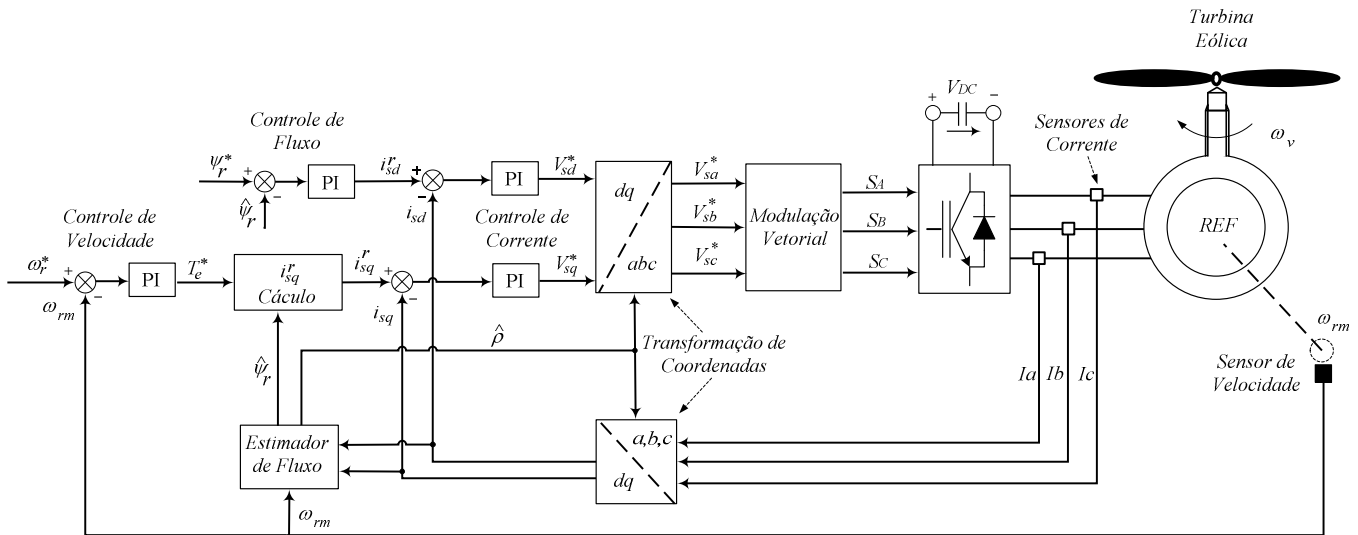


Fig. 5. Diagrama de Blocos de Controle.

correntes de entrada, necessárias para a estratégia de modulação PWM do conversor e para a obtenção das correntes no referencial dq . Em seguida realizam-se os cálculos para obtenção da estimativa do fluxo rotórico. Também foram utilizados controladores PI para os sinais de erro das correntes dq de referência.

Uma vez iniciada a fase de realização dos testes, os parâmetros receberam ajuste fino através de tentativas. Em seguida, testes de variações de carga e “vento” foram realizados, verificando-se que os parâmetros começavam a reduzir o desempenho em variações de 20% ou mais em relação ao ponto de operação escolhido. Este teste delimitou as faixas de variações apresentadas nos resultados.

As chaves de potência são comandadas através de sinais (SA – SB – SC) modulados por largura de pulso (PWM), gerados pelo algoritmo de modulação vetorial.

V. RESULTADOS SIMULADOS E EXPERIMENTAIS

Esta seção tem como objetivo apresentar os resultados de simulações e experimentais, além do desempenho do sistema quanto ao controle de velocidade do rotor síncrono para ventos contantes e para variações de vento. Todos os gráficos apresentados em relação ao tempo.

A. Resultados Simulados

Inicialmente, o sistema foi simulado para ventos com velocidade constante e em seguida, para ventos com velocidades variáveis, com o objetivo de validar a estratégia de controle de velocidade.

1) *Velocidade de vento constante* – O gráfico da curva de velocidade da turbina, a mesma do rotor assíncrono do REF, é apresentado na Figura 6. Foi escolhido o valor de 37,7 rad/s, ou 360 rpm, representando cerca de 20% da velocidade final desejada do rotor síncrono de 188,5 rad/s ou 1800 rpm.

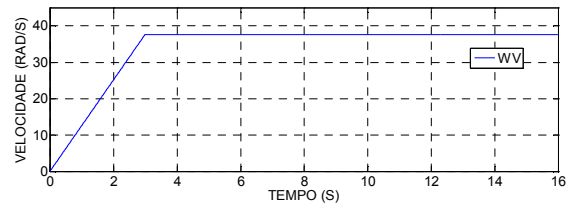


Fig. 6. Velocidade WV da turbina.

A Figura 7 apresenta o gráfico da velocidade de rotação do rotor síncrono em relação à referência, atingindo o valor esperado de 188,5 rad/seg. Como observado, o sistema apresenta erro praticamente nulo em regime permanente a partir de aproximadamente 3.5s.

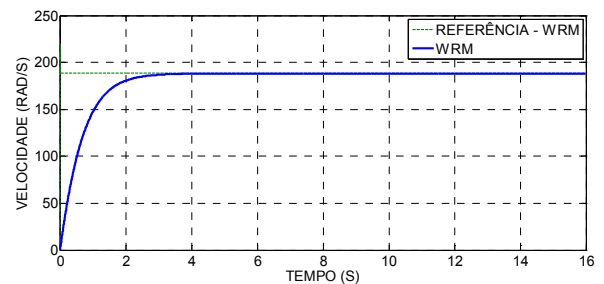


Fig. 7. Velocidade WRM e Velocidade de Referência.

2) *Vento Variável* – Adotou-se como velocidade inicial imposta pela turbina 200 rpm (20,94 rad/s). Sob forma de degraus, nos instantes de 8s e 11s esta velocidade variou para 300 rpm (31,42 rad/s) e 400 rpm (41,89 rad/s), respectivamente, conforme ilustrado na Figura 8.

A Figura 9 apresenta o gráfico do comportamento da velocidade de rotação do rotor síncrono em relação à referência fixa. São observadas pequenas variações nos instantes em que ocorrem variações do vento. O sistema apresenta erro praticamente nulo em regime permanente.

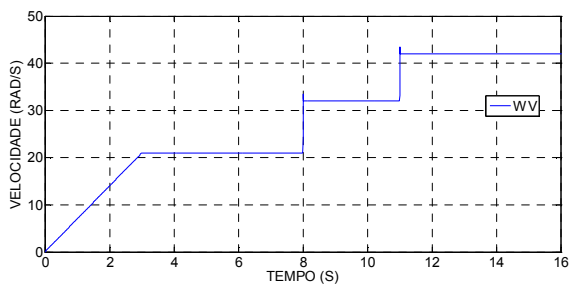


Fig. 8. Velocidade WV da turbina.

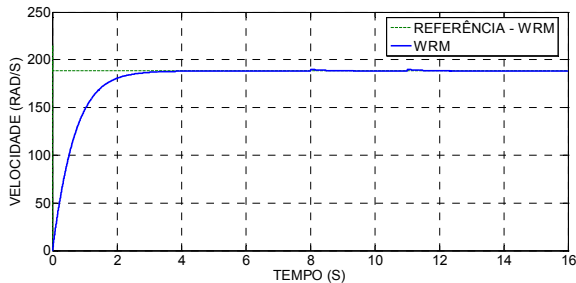


Fig. 9. Velocidade WRM e Velocidade de Referência.

B. Resultados Experimentais

As velocidades do eixo do rotor síncrono e da turbina são medidas por meio de um *encoder* óptico. Na realização destes testes, pelo lado de CC do inversor de frequência foi utilizada uma fonte de tensão de CC associada aos capacitores no barramento de 400V.

1) *Vento Constante* – Similar à etapa dos resultados simulados, foi imposto ao rotor externo do REF, através do motor cc, uma velocidade de 37,7 rad/s ou 360 rpm, como apresentado na Figura 10.

A Figura 11 apresenta o gráfico da velocidade final de rotação do rotor síncrono em relação à referência, atingindo novamente o valor de 188,5 rad/seg. O sistema apresenta erro praticamente nulo em regime permanente a partir de aproximadamente 7s, conforme se vê no gráfico da Figura 12.

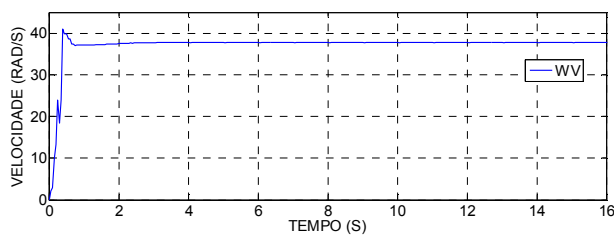


Fig. 10. Velocidade WV da turbina.

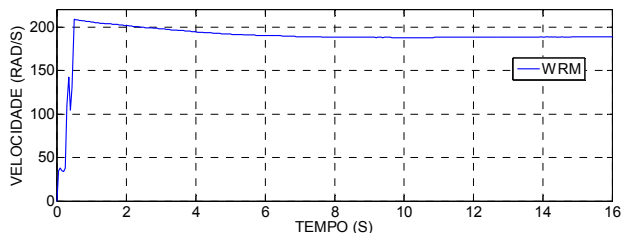


Fig. 11. Velocidade WRM.

2) *Vento Variável* – Aplicando a mesma variação utilizada na fase de simulação (velocidade da turbina de 200 rpm, 300 rpm e 400 rpm aproximadamente), foi obtida a curva de velocidade do rotor externo do REF apresentada no gráfico da Figura 13.

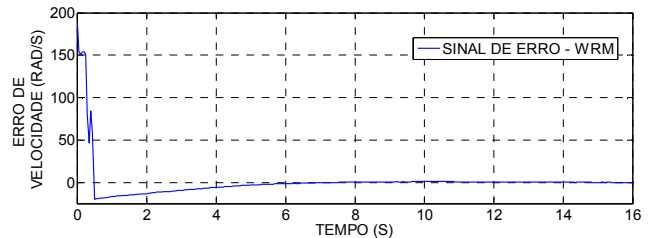


Fig. 12. Comportamento do sinal de erro de WRM.

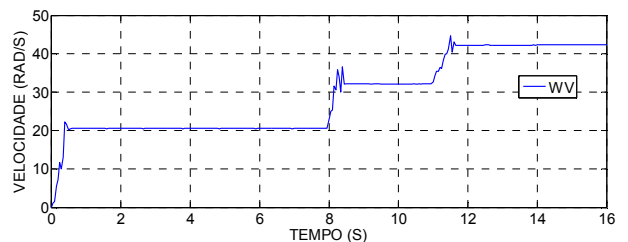


Fig. 13. Velocidade WV da turbina.

A Figura 14 apresenta o gráfico da velocidade de rotação do rotor síncrono em relação à referência fixa. Notam-se oscilações nos instantes de 8s e 11s, provocados pelas variações “de vento”, até o retorno ao valor de referência, 188,5 rad/s. O sistema apresenta erro praticamente nulo em regime permanente, o que se vê pelo gráfico da Figura 15.

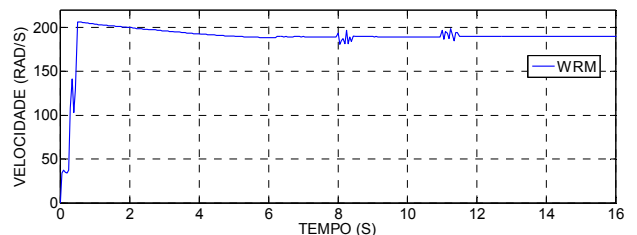


Fig. 14. Velocidade WRM.

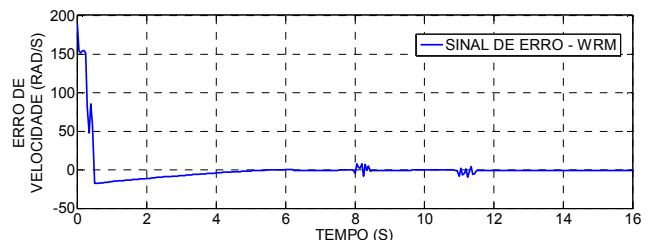


Fig. 15. Comportamento do sinal de erro de WRM.

A Figura 16 apresenta os sinais experimentais de correntes do rotor assíncrono para os valores diferentes de variação do vento. É importante analisar que os valores das frequências vão diminuindo com o aumento da velocidade do vento, mantendo

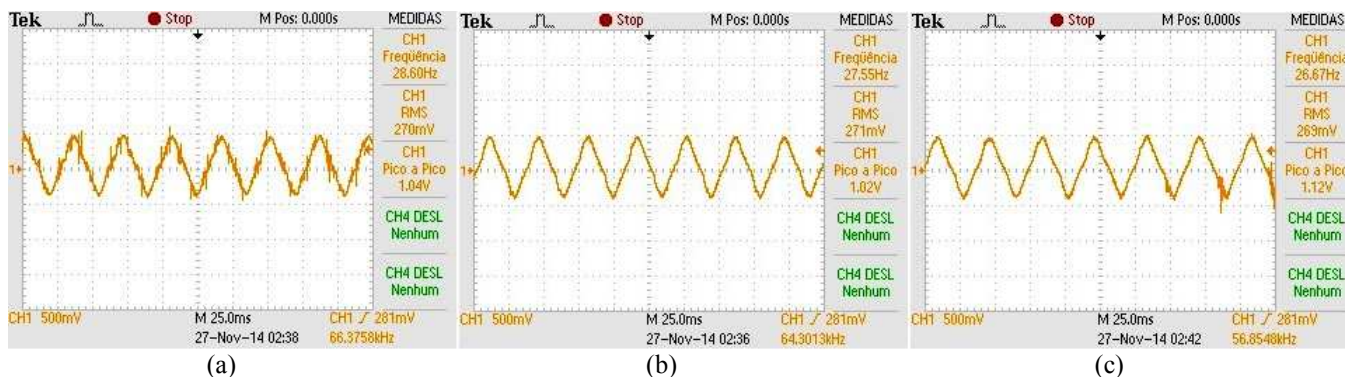


Fig. 16. Formas de onda da corrente injetada no rotor assíncrono para velocidades da turbina de (a) 200 rpm, (b) 300 rpm e (c) 400 rpm, respectivamente.

constante o valor da velocidade WRM de saída, o que comprova o princípio de funcionamento.

VI. CONCLUSÕES

A topologia proposta apresentou resultados de simulações e experimentais satisfatórios para os objetivos deste trabalho. O sistema de controle de velocidade foi eficiente para ventos com velocidade constante e velocidades variáveis, apresentando erro de regime permanente nulo em relação aos valores de referência de velocidade.

Demonstrou-se que o REF permite dispensar o uso de caixas de engrenagens e o desacoplamento elétrico do gerador com a carga através de conversores back-to-back, contribuindo com uma inovação tecnológica. Ao mesmo tempo, apresenta outras vantagens como: redução do uso de dispositivos eletrônicos, existência de um único ponto de acesso à rede de ca em sistemas de geração híbrida, o que simplifica o controle e, não injeta harmônicos no lado de ca, melhorando a qualidade da energia entregue.

A partir dos resultados obtidos, vários desdobramentos se apresentam visando avançar na pesquisa, tais como:

- ampliar os testes de impacto de carga e velocidade do vento;
- substituição dos controladores PI por estratégias de controle robusto;
- estudo de velocidades (turbina e gerador) e números de polos ideais para o REF e gerador;
- análise de transitórios, impactos na rede elétrica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à TRANSNOR - Transformadores do Nordeste Indústria e Comércio LTDA pela parceria, colaborando na confecção do protótipo.

REFERÊNCIAS

- [1] World Wind Energy Association, "World wind energy report", 2014. [Online]. Disponível: <http://www.wwindea.org>.
- [2] S. Sharma, "Simulation and analysis of DFIG system with wind turbine implementing fuzzy logic controller", in *International Conference Non Conventional Energy (ICONCE)*, pp.154-159, 2014.
- [3] N. Djagarov, Z. Grozdev, M. Bonev, J. Djagarova, "Operation study of wind permanent magnet synchronous generator," in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, pp.522-528, 2013.
- [4] M. G. Zanchettin, *Análise da inserção de geração eólica com aerogeradores de indução*, Dissertação de Mestrado, UNIOESTE, Brasil, 2012.
- [5] A. Ragheb, M. Ragheb, "Wind turbine gearbox technologies", in *Internacional Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC)*, pp.1-8, 2010.
- [6] R. F. Pinheiro, P. V. Silva, N. C. Júnior, "Aerogerador de Velocidade Variável e Tensão e Frequência Constantes com Regulação Eletromagnética de Frequência", BR Pedido de patente, número: BR 10 2014 005059 0, Jan. 14, 2014.
- [7] M.V.A Nunes, *Avaliação do Comportamento de Aerogeradores de Velocidade Fixa e Variável Integrados em Redes Elétricas Fracas*, Tese de Doutorado, UFSC, Santa Catarina, Brasil, 2003.
- [8] A. Jammal, Y. Rong, "Wind turbine gearbox dynamics," in *IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM)*, pp.330-333, 2013.
- [9] H. A. Pereira, S. Y. Liu, M. C. L. Ramos, V. F. Mendes, S. R. Silva, "A comparative analysis of wind turbine technologies in focus on the grid integration", in *IEEE/IAS International Conf. on Industry Applications (INDUSCON)*, pp.1-6, 2010.
- [10] Z. Daneshi-Far, G. Capolino, H. Henao, "Modeling and simulation of planetary gearbox effects on a wound rotor induction machine," in *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, pp.1234-1239, 2012.
- [11] X. Sun; M. Cheng; Y. Zhu; L. Xu, "Application of Electrical Variable Transmission in Wind Power Generation System," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.49, no.3, pp.1299-1307, 2013.
- [12] R. Garcia-Hernandez, R. Garduno-Ramirez, "Modeling and Control of a Wind Turbine Synchronous Generator," in *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference (CERMA)*, pp.222-227, 2011.
- [13] S. Y. Liu, *Controle direto de potência em gerador de indução duplamente alimentado*, Dissertação de Mestrado, UFMG, Minas Gerais, Brasil, 2011.
- [14] T. H. Santos, A. Goedel, S. O. Silva, M. Suetake, "Controle Escalar do Motor de Indução usando a Técnica Sensorless Neural", *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, v. 19, n.1, p.024-035, dez.2013/fev.2014.

- [15] S. Liu, S. Li, H. Xiao, "Vector Control System of Induction Machine Supplied by Three-Level Inverter Based on a Fast SVPWM Algorithm", in *International Conf. on Intelligent System Design and Engineering Application (ISDEA)*, vol.2, pp.810-813, 2010.
- [16] C. B. Jacobina, A. M. N. Lima, "Estratégias de Controle Para Sistemas de Acionamento Com Máquina Assíncrona" *Revista SBA: Controle & Automação*, v. 7, n.1, p. 15-28, 1996.
- [17] L. Pengfei, W. Wang, "Principle, structure and application of advanced hydrodynamic converted variable speed planetary gear (Vorecon and Windrive) for industrial drive and wind power transmission," in *International Conf. on Fluid Power and Mechatronics (FPM)*, pp.839-843, 2011.
- [18] R. F. Camargo, *Método de Sincronização Aplicado a Conversores PWM Trifásicos*, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Maria, Brasil, Julho 2006.
- [19] C. Patel, R. Ramchand, K. Sivakumar, A. K. Gopakumar, "A rotor flux estimation during zero and active vector periods using current error space vector from a hysteresis controller for a sensorless vector control of in drive", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, n. 6, pp. 2334-2344, Jun. 2011.

DADOS BIOGRÁFICOS

Paulo Vitor Silva, nascido em 16/07/1984 em Natal-RN, é engenheiro eletricitista (2007) pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte; mestre (2010) e doutor (2015) também pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Atualmente é professor efetivo do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) e membro da SOBRAEP e do IEEE.

Suas áreas de interesse são: filtro ativo de potência, eletrônica de potência, acionamentos de máquinas elétricas e energias renováveis.

Ricardo Ferreira Pinheiro, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (1978), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1980) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal da Paraíba (2001).

Atualmente é professor titular do Departamento de Eng. de Computação e Automação do Centro de Tecnologia da UFRN. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: compensação de reativos, harmônicos, filtros ativos, potências instantâneas, energia eólica, fontes alternativas e renováveis e qualidade da energia.

Andrés Ortiz Salazar, possui graduação em Engenharia Eletrônica - Universidad Nacional de Ingeniería (1981), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1989) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1994).

Atualmente é professor titular da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais, atuando principalmente nos seguintes temas: instrumentação, automação industrial, eletrônica de potência, acionamento de máquinas e automação.

Luciano Pereira dos Santos Júnior, nasceu na cidade de Aracaju, Sergipe, Brasil, em 1977. Recebeu o título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade Pio Décimo (2004), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2009). É aluno de doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Atualmente é professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), e membro da SOBRAEP e do IEEE. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência.

Jefferson Doolan Fernandes, nascido em 10/07/82 em Natal-RN, possui graduação em Tecnologia em Automação Industrial, pelo Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) e em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo e faz doutorado em Ciências e Engenharia de Petróleo, os dois pela UFRN. Atualmente é professor do curso de Mecatrônica do IFRN - campus Parnamirim.