

Integração de Turbinas Eólicas tipo IV à rede elétrica: Simulação e Análise Usando o ATPDraw

Max Brazão de Oliveira ^[1], Adriano Aron Freitas de Moura ^[2] e Victor de Paula Brandão Aguiar ^[3]

^[1] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; max.oliveira69248@alunos.ufersa.edu.br

^[2] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; adrianoaron@ufersa.edu.br

^[3] Universidade Federal Rural do Semi-Árido; victor@ufersa.edu.br

Resumo: Neste estudo foram realizadas simulações operando o software ATPDraw com o propósito de analisar uma turbina eólica do tipo IV e a sua integração com a rede. A arquitetura da turbina é composta por uma estrutura dividida em três partes. São elas; o retificador trifásico não controlado, o conversor boost e um inversor trifásico controlado alimentada por uma máquina síncrona. O resultado desse trabalho, acabou gerando alguns gráficos fruto da simulação de um gerador de 2,24 MVA acoplado a uma turbina eólica de tipo IV. Nas correntes trifásicas que serão injetadas na rede elétrica de transmissão, foi constatado que seus valores são compatíveis com os esperados, além das correntes estarem balanceada, e também foi constatado que o ângulos entre as fases é de 120°. As três correntes apresentaram valores elevados logo após o acionamento do aerogerador, e depois de um leve amortecimento em 0,03 segundos, logo após conseguiram se estabilizar em torno de 1 kA. O aerogerador atuou numa frequência de 60 Hz. Em relação à tensão no barramento do retificador, vimos que a curva que a descreve cresce rapidamente nos primeiros 0,3 segundos de simulação, depois de alcançar seu valor máximo, que chegou a 3,5 kV, se estabiliza abaixo de 3 kV. Essa tensão do barramento capacitivo será direcionada para o conversor boost, que vai agir como um elevador de tensão. Esse valor foi atingido após 0,90 segundos de simulação. As potências ativa e reativa que saem do inversor e são fornecidas à rede nos mostram que no princípio da simulação, o gerador está absorvendo potência, atuando próximo do comportamento de um motor, o que se revela pelos valores negativos nos gráficos. Há também uma oscilação nas potências, devido aos harmônicos presentes no circuito. A transição do regime transitório para o permanente ocorre somente depois de 1,25 segundos. O conversor não consegue compensar totalmente a potência reativa da rede, resultando em um fator de potência menor que um. A entregar da potência máxima ocorre 1,0 segundo após o acionamento da turbina, alcançando 1,5 MW.

Palavras-chave: Conversor Boost, Energia eólica, Simulação, Rede elétrica

Abstract: In this study, simulations were carried out using the ATPDraw software with the purpose of analyzing a type IV wind turbine and its integration with the grid. The turbine architecture is made up of a structure divided into three parts. Are they; the uncontrolled three-phase rectifier, the boost converter and a controlled three-phase inverter fed by a synchronous machine. The result of this work ended up generating some graphics resulting from the simulation of a 2.24 MVA generator coupled to a type IV wind turbine. In the three-phase currents that will be injected into the electrical transmission network, it was found that their values are compatible with those expected, in addition to the currents being balanced, and it was also found that the angles between the phases are 120°. The three currents showed high values immediately after starting the wind turbine, and after a slight damping in 0.03 seconds, they managed to stabilize at around 1 kA. The wind turbine operated at a frequency of 60 Hz. Regarding the voltage on the rectifier bus, we saw that the curve that describes it grows quickly in the first 0.3 seconds of simulation, after reaching its maximum value, which reached 3.5 kV, stabilizes below 3 kV. This voltage from the capacitive bus will be directed to the boost converter, which will act as a voltage elevator. This value was reached after 0.90 seconds of simulation. The active and reactive powers that leave the inverter and are supplied to the grid show us that at the beginning of the simulation, the generator is absorbing power, acting close to the behavior of a motor, which is revealed by the negative values in the graphs. There is also an oscillation in powers, due to the harmonics present in the circuit. The transition from the transient to the permanent regime only occurs after 1.25 seconds. The converter cannot fully compensate the reactive power of the grid, resulting in a power factor of less than one. Maximum power is delivered 1.0 seconds after the turbine is activated, reaching 1.5 MW.

Key-words: Boost Converter, Wind Energy, Simulation, Electrical network

1. INTRODUÇÃO

Dentre as energias renováveis que tem conquistado cada vez mais espaço no cenário energético, a energia eólica possui seu lugar de destaque dentre as demais. Essa forma de energia, gerada a partir da força dos ventos, transformando energia mecânica em elétrica, por meio de suas turbinas, oferece uma energia oriunda de fontes limpa e sustentável.

Globalmente, diversos países estão a frente do Brasil em termos de capacidade instalada em Gigawatts (GW) gerados por energia eólica, graças a investimentos exponenciais nesse setor, e continuam cada vez mais crescente. É importante notar que muitos desses países nem tem o privilégio de possuir o potencial hídrico, por isso investem há mais tempo que o Brasil em fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis [1].

Apesar de todos seus pontos positivos, e da forma como a energia eólica é bem-vista por seus investidores, por ser uma energia mais sustentável que a proveniente dos combustíveis fósseis, os sistemas eólicos ainda apresentam grandes desafios, tanto para o meio ambiente quanto para o sistema elétrico [2].

Existem alguns tipos de aerogeradores que integram os tipos de energia eólica. A tipo IV é uma das mais comumente usadas. Podem ser definidos por sistemas de acionamento direto sem caixas de engrenagens e o gerador está diretamente acoplado ao cubo das lâminas. A maior parte dos aerogeradores desse tipo consistem em máquinas síncronas que empregam excitação de ímã elétrico ou permanente. O aerogerador se integra a rede elétrica por meio de conversores de potência, o que cria a viabilização para que ele consiga operar em uma faixa de velocidade mais ampla e também resulta em uma maior eficiência na captura da energia proveniente da força dos ventos [3].

Esse tipo de turbina carrega a grande vantagem de ser desacoplada em relação a rede ensejando a geração de energia de maneira completamente controlada. No entanto, o aerogerador possui a desvantagem de ter um comportamento notavelmente oscilatório, o que pode dar origem a questões de falta de estabilidade na rede a qual está conectado [4].

Devido ao seu padrão de comportamento oscilatório, a eólico tipo IV acaba produzindo excedentes de geração de potência ativa e reativa, provocando uma elevação na tensão e frequência da rede transmissão. Por outro lado a turbina eólica do tipo IV oferece múltiplos mecanismos de controle para lidar com o excedente de potência, incluindo o controle de ângulo das pás (Controle de Pitch), como também o controle de velocidade por ponto de máxima potência (MPPT), tirando proveito desses recursos para restringir e otimizar a geração de potência [5].

Abaixo temos a Fig. 1 exibindo o desenho do diagrama do gerador elétrico eólico do tipo IV. Ela consiste em uma turbina eólica acoplada a um gerador síncrono de ímã permanente. O gerador síncrono converte a energia mecânica da turbina em corrente alternada, que é retificada por um conversor CA/CC e enviada a um inversor CC/CA. O inversor CC/CA é responsável por adequar a tensão e a frequência da energia elétrica gerada às características da rede elétrica à qual o sistema está conectado.

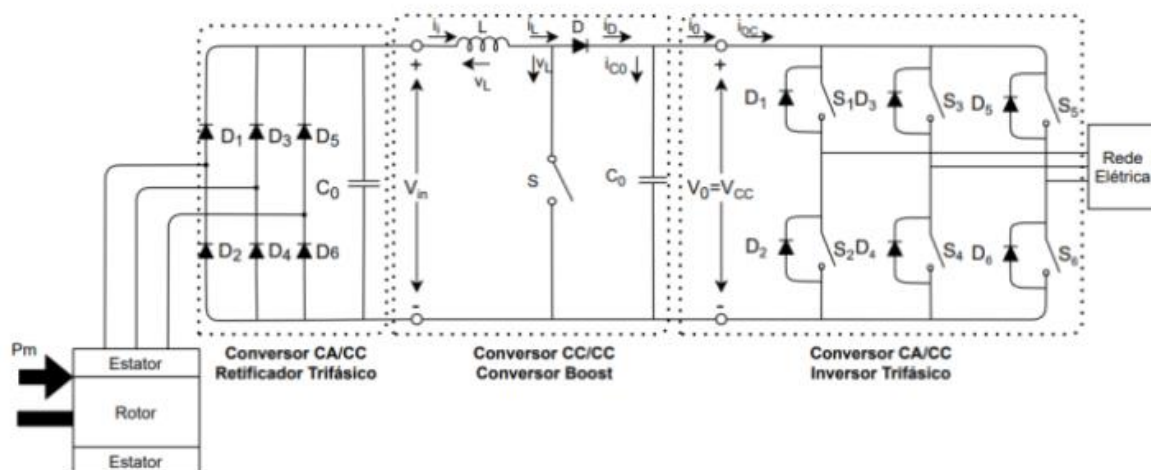


Fig. 1. Diagrama do Gerador Elétrico Eólico Tipo IV [5].

Como se vê na Fig. 1, o gerador elétrico está acoplado a um sistema de conversão do tipo Back-to-Back, que altera a forma de onda gerada. Em seguida, o sinal passa pelo conversor boost, que regula a quantidade de potência gerada, e finalmente passa pelo inversor trifásico controlado.

Este trabalho pretende estudar os componentes dos circuitos eletrônicos que integram o aerogerador de energia eólica tipo IV e sua arquitetura, com ênfase no conversor CC-CC boost. Além de se debruçar sobre seu funcionamento, esse artigo também visa analisar a integração desse tipo de turbina e a sua energia gerada na rede. Para isso foi realizada simulações no software *Alternative Transiente Program – Electromagnetic Transient Program* (ATP-EMTP).

II- ANÁLISE DAS COMPONENTES DO CIRCUITO

A. Gerador Síncrono

Dentro dos sistemas eólicos, os componentes encarregados de transformar a energia mecânica proveniente do eixo em energia elétrica são conhecidos como geradores. Essa energia é posteriormente direcionada a um circuito de condicionamento antes de ser fornecida a carga [6].

Os Geradores Síncronos (GS), também compreendidos como alternadores, são máquinas síncronas com a função de converter a potência mecânica, como a rotação do cubo das pás do aerogerador provocado pela força dos ventos, em potência elétrica CA [7].

Para gerar tensões trifásicas equilibradas em um gerador síncrono trifásico com 2 polos, cada fase deve ter uma bobina que esteja deslocada 120 graus em relação às outras. No entanto, se o gerador tiver mais de 2 polos, o número mínimo de bobinas necessárias será igual à metade do número de polos, formando conjuntos de bobinas para cada fase [6]. Por apresentar velocidade de rotação e sujeito a variações é possível sincronizar a velocidade de rotação da turbina com o gerador sem a necessidade de uma caixa de engrenagens, o que aumenta seu rendimento [8].

Em um gerador síncrono, o rotor gira na mesma velocidade que o campo magnético produzido pelos enrolamentos do estator. Portanto, não há diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor, e o escorregamento é zero. Isso significa que o gerador síncrono mantém uma velocidade constante de sincronismo [7]. Segue abaixo o esquemático do gerador síncrono na Fig 2.

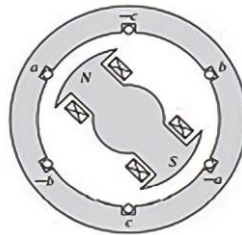


Fig. 2. Gerador Síncrono de 2 polos [6].

B. Retificador Trifásico Não Controlado

O Retificador Trifásico Não Controlado (RTNC) é um conversor CA-CC, que tem sua utilização comumente empregada na indústria para a geração de tensão CC para cargas elevadas [9]. Logo abaixo vemos a partir da Fig. 3 o circuito de retificador trifásico de onda completa chaveado por diodos, caracterizado como não controlado, e recebendo uma corrente trifásica de um gerador trifásico.

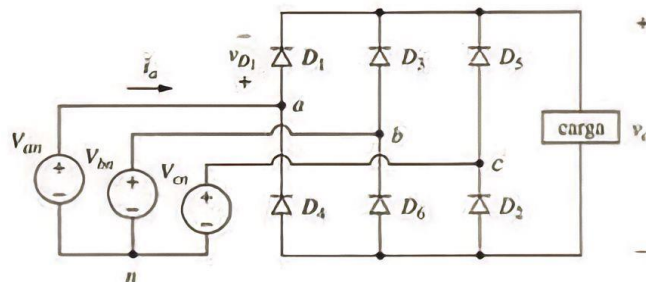


Fig. 3. Retificador Trifásico não controlado [9].

O circuito retificador possui ao todo 6 pulsos, que sucede uma mudança a cada 60° entre os diodos. A partir desse ponto de vista o retificador trifásico não controlado apresenta uma frequência de oscilação na tensão de saída. A tensão de saída é seis vezes a frequência de oscilação de tensão na fonte de alimentação CA [10].

C. Conversor Boost

Esse conversor amplificador, conhecido como conversor boost, é um conversor CC-CC chaveado. A sua função é ativar, desativar, também agindo como alternador da periodicidade das chaves eletrônicas. Outro propósito é criar um circuito que mantém ou aumenta a tensão aplicada no Sistema [9]. A seguir temos a Fig. 4 apresentando a topografia do conversor boost.

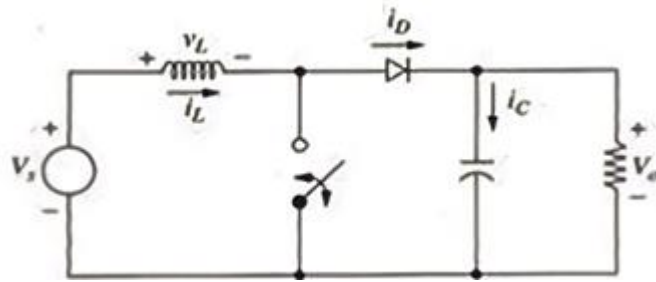


Fig. 4. Conversor Boost [9].

Uma forma simplificada de explicar o funcionamento do conversor Boost é dividir em dois estados, de acordo com o estado da chave. Quando a chave está fechada ou ligada, o diodo fica bloqueado, porque a tensão no lado positivo é maior que no lado negativo. Nesse estado, a fonte de tensão alimenta o indutor e a carga, e o indutor guarda energia, aumentando sua corrente. [9].

Quando a chave se abre ou se fecha, a corrente deixa de fluir diretamente da fonte de tensão para o circuito. O diodo entra em ação e cria uma via para a corrente no indutor, que transfere a energia que havia armazenado ao capacitor. [9].

Uma forma de explicar o funcionamento dos conversores chaveados é considerar o papel do componente principal que controla o chaveamento, que pode ser um transistor, um tiristor ou outro dispositivo semicondutor. Esse componente é responsável por regular o conversor ao alternar entre os estados de condução e corte. Basicamente, a tensão de saída depende do tempo que a chave fica ligada (T_{on}), dividido pela período de chaveamento (T_{all}). Isso corresponde a sua razão cíclica (D) [9].

$$D = \frac{T_{on}}{T_{all}} \quad (1)$$

A tensão na saída do conversor será calculada a partir dos valores do ciclo de trabalho e da tensão de entrada, pois o sistema funciona pelo Modo de Condução Contínua (MCC) [11].

$$V_0 = \frac{1}{1-D} * V_{in} \quad (2)$$

D. Inversor Trifásico Controlado

O controle do inversor trifásico converte a tensão que se acumula no barramento CC capacitivo em um sinal CA por meio da comutação de transistores e diodos, controlados por meio de um controle interno do inversor. Dessa forma, o chaveamento se dá por meio de intervalos de ângulos defasados em 60° [11].

Portanto, um inversor trifásico controlado pode ser considerado um tipo de inversor de fonte de tensão, uma vez que controla a tensão de saída em termos de amplitude e frequência fornecendo uma saída CA, estável e controlada. Dessa maneira, inversores trabalham mantendo a tensão na saída constante, com valores diferentes de carga conectada a ele [11].

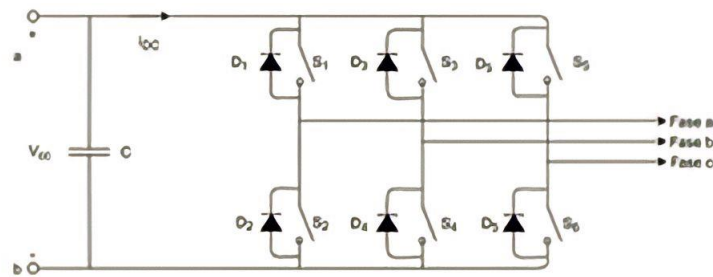


Fig. 5. Inversor Trifásico Controlado [10].

O inversor de fonte de tensão (Voltage-Source Converter), conhecida pela sigla VSC, depende da sua alimentação por uma fonte de tensão e sua conexão à rede elétrica. É crucial que a amplitude da tensão o ângulo de fase e a frequência, desfrutem da sincronia com a rede para manter o equilíbrio do Sistema. Para alcançar isso é possível utilizar um Sistema VSC cuja frequência seja ditada pela rede elétrica de nível dois. [12]. A Fig. 6 Mostra um esquemático do Sistema VSC.

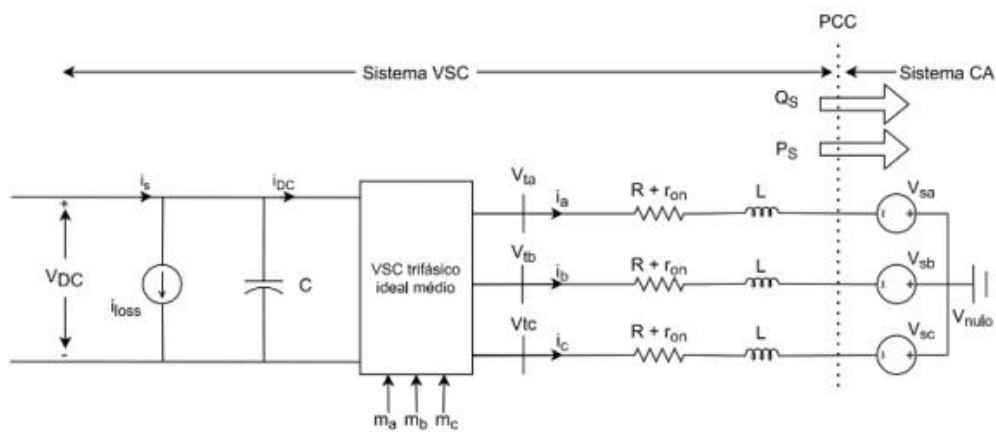


Fig. 6. Esquemático do Sistema VSC com frequência subordinada à rede [12].

O VSC pode ser concebido como um eficiente processador de energia, com poucas perdas, e inclui um barramento CC capacitivo equivalente em paralelo com o Sistema. A fonte de corrente em paralelo ao lado CC do VSC, constitui a perda da energia decorrente da comutação. Em relação ao lado CA, as resistências e os indutores conectados em série são responsáveis pela dissipação de potência. Quanto à conexão no lado CC, é possível optar por uma fonte de tensão, ou por outro conversor com saída de tensão CC, como por exemplo o conversor CC boost [12].

A fusão de todas essas componentes produz a eólica tipo IV, que normalmente é empregado na sua arquitetura geradores síncronos de ímãs permanentes, eliminando a necessidade de uma caixa de engrenagens na Nacele. No seu projeto, o rotor eólico é diretamente acoplado ao eixo de um gerador síncrono com um número de polos geralmente superior a 100. Isso se dá graças a ampla faixa de velocidade das pás que possibilita uma variação de 6 a 60 rpm, permitindo que a frequência que é gerada coincida com a da rede [13]. A Fig. 7 mostra de maneira elucidativa e didática o sistema de geração de uma usina eólica tipo IV.

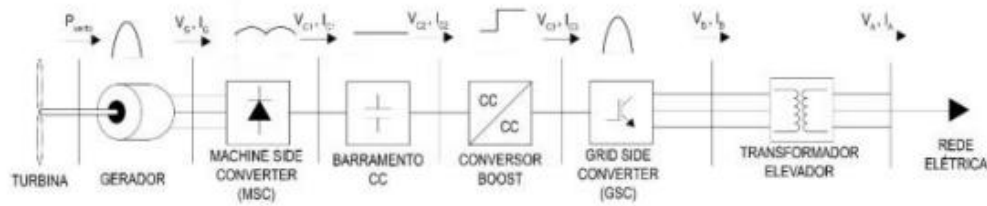


Fig. 7. Sistema de geração de energia de uma usina eólica tipo IV [12].

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A produção desse artigo se deu através de algumas etapas, contando com algumas dificuldades que surgiram pelo caminho e sua premente necessidade de serem solvidas. Em um primeiro momento, foi contactado o responsável pela licença do software ATPDraw aqui no Brasil. Depois de concedida a licença e realizada a instalação do programa, maratonei as vídeos aulas disponíveis no Youtube, com destaque para o minicurso produzidas pela PPGEE da UFRSA.

Ainda sobre o programa utilizado, podemos afirmar que é uma ferramenta valiosíssima para usuários iniciantes em programas da área de sistemas elétricos de potência. Com o ATPdraw, é possível construir e simular circuitos monofásicos e trifásicos complexos, bem como linhas de transmissão com parâmetros concentrados, distribuídos e dependentes da frequência.

O circuito do aerogerador tipo IV foi construído e simulado no ATPDraw do ATP-EMTP, foi baseado no circuito da Fig.1. As características elétricas do conversor CC-CC boost, retificador trifásico, de cada fase do circuito e do gerador síncrono trifásico estão disponíveis na seção dos Apêndices.

A turbina do tipo IV produz uma potência nas fases abc, com uma tensão igual em V_a , V_b e V_c . Essa energia é enviada para o Retificador Trifásico Não Controlado, onde a tensão é retificada e depois mantida constante no barramento de corrente contínua (CC) e aumentada no barramento de corrente alternada (CA). Após a conversão de CC-CC, ocorre a conversão de CC-CA por meio do inversor.

Esse gerador trabalha gerando uma potência trifásica aparente de 2,24 MVA. A conversão da tensão trifásica que é produzida pelo aerogerador é convertida através do retificador trifásico não controlado em tensão contínua. Depois, essa tensão contínua se mantém devido a um capacitor no barramento CC, para a partir daí ser elevada pelo conversor boost. Logo após o conversor boost elevar a tensão de entrada, a sua tensão de saída é injetada no barramento CC do inversor. e a tensão que foi acumulada nesse barramento CC, se mantém como a tensão elétrica de referência.

3. RESULTADOS

Os resultados das simulações e suas referidas análises estão divididas em subseções para uma melhor elucidação de cada componentes e elementos do circuito. O aerogerador de energia eólica tipo IV será analisado a partir das correntes de referência trifásicas do sinal da saída do inversor, e o desempenho das potências ativa e reativa, análise da tensão capacitiva no barramento do retificador, como também tensão que será injetada na rede.

A. Análise da tensão do barramento CC do Retificador

A tensão que será injetada para a rede começa a simulação apresentando uma curva de crescimento do gráfico bem inclinada, antes mesmo de 0,3 segundos atinge seu apogeu ou seu platô e assim permanece com valores próximos de 3,5Kv por décimos de segundos, mas logo experimenta uma pequena queda e em seguida é estabilizado um pouco a baixo de 3,0 kV. Essa tensão será enviada para o conversor Boost, que irá elevar o seu valor. O barramento CC do retificador trifásico não controlado possui uma capacitância de 0,05 F. Cumpre muito bem a sua função, pois atua suavizando a tensão e entregando ao conversor elevador, uma tensão sem tantas flutuações. Através de uma leitura atenta da Fig. 8 nota-se que essa amortização se dá a partir dos 0,9 segundos de simulação, quando a curva que a princípio se apresenta bem sinuosa, se estabiliza, apresentando valores mais constantes. O tempo total da simulação foi de 1,8 segundos, tempo suficiente para contemplar a curva ficar estável, mostrando que entrou no regime permanente.

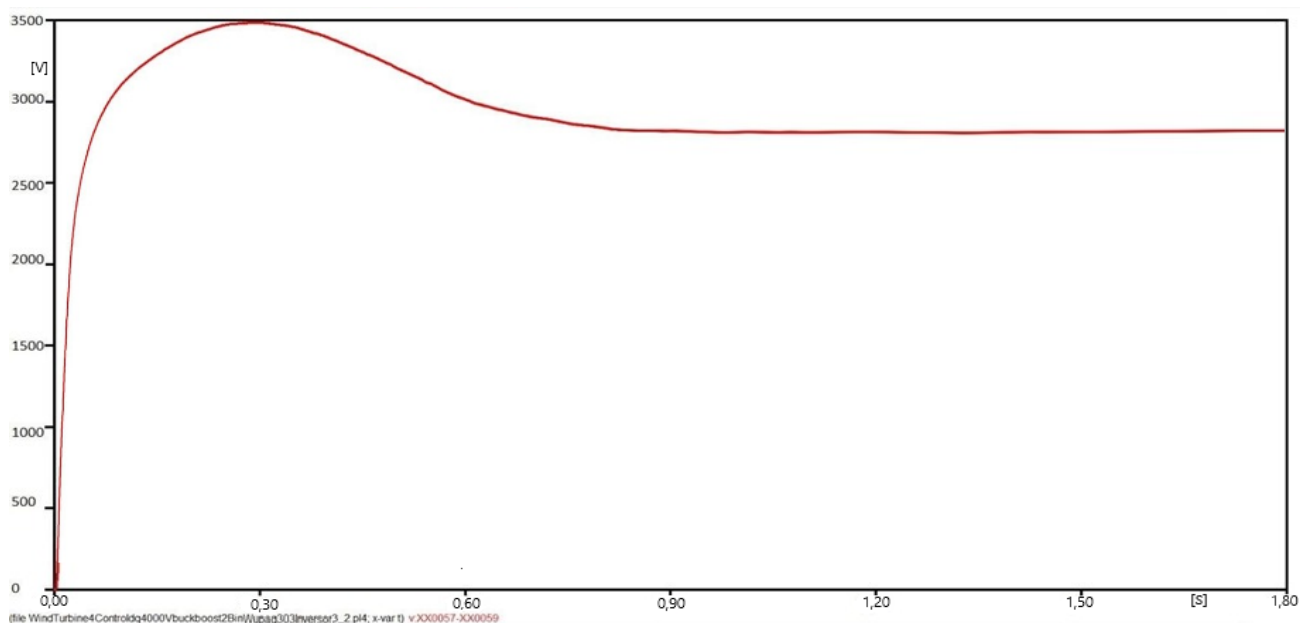


Fig. 8. Corrente Trifásica de referência de saída do inversor trifásico controlado (autoria própria).

B. Análise das correntes trifásicas de referência de saída do inversor

Foi realizado o teste para a verificação da corrente de referência da saída do inversor trifásico controlado. Essa simulação que está sendo mostrada na Fig. 9 tem como finalidade, acompanhar o desempenho da corrente de referência e verificar se o sistema trifásico está, ou não em equilíbrio. Nos primeiros 0,04 segundos de simulação, elas apresentam valores bem elevados até atingir a sua estabilidade. Essas correntes muito altas, ocorreram bem no início que o gerador foi acionado, o que pode ser interpretado como a simulação ainda atuando em regime transitório. Depois de 0,04 segundos houve um amortecimento nos valores das correntes até que elas conseguiram enfim atingir o regime permanente. Após 0,08 segundos da simulação correntes exibiram valores constantes, e que giram em torno de 1kA.

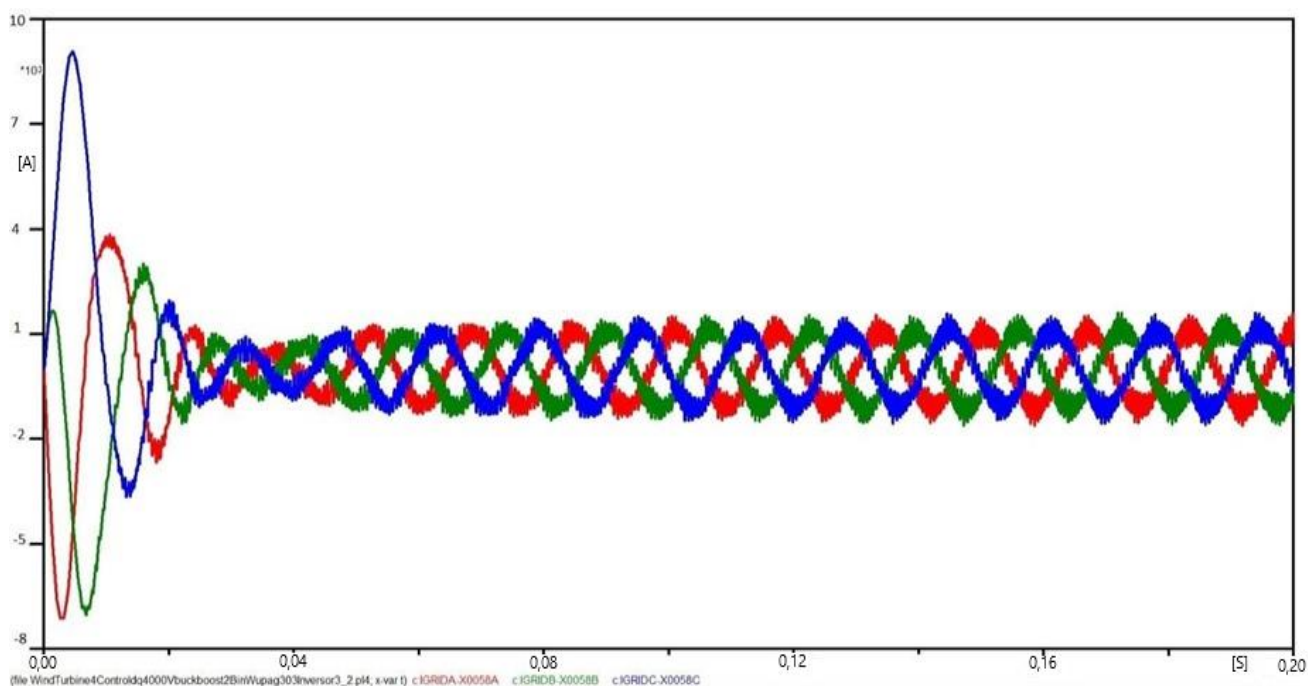


Fig. 9. Corrente Trifásica de referência de saída do inversor trifásico controlado (autoria própria).

C. Análise da Potência Ativa e Reativa do Sistema

Simulações foram realizadas para avaliar o desempenho das potências ativa e reativa injetadas na rede elétrica. Nos primeiros décimos de segundo, as respectivas curvas que traduzem o comportamento da potência ativa, e reativa despencaram abruptamente. Foi um pico negativo nas potências do gerador. Esse vale, atingiu valores bem próximos de 4MW na potência ativa, 3MW na reativa. Passado esse primeiro instante, o aerogerador começou a produzir potência. A partir de 0,25 segundos de simulação os valores das duas potências passam a destoar. Os resultados da simulação mostraram que o aerogerador precisa melhorar sua geração de potência ativa. Pois a potência ativa alcançou valores em torno 1,5 MW, abaixo do satisfatório. Não se manteve dentro da faixa de potência aparente fornecido pelo gerador síncrono do aerogerador tipo IV. No que tange aos resultados apresentados pela potência reativa, o valor encontrado na simulação bem oscilatório, resultando em um fator de potência que não se aproxima de um. O caráter oscilatório do gráfico pode ser atribuído a presença de harmônica nos circuitos, algo que precisa ser corrigido. O gráfico representado na Fig. 10 ilustra o comportamento das potências, a ativa em vermelho e a reativa em verde, passando pelo período transitório e permanecendo no regime permanente antes do tempo de simulação de 1,50 segundos.

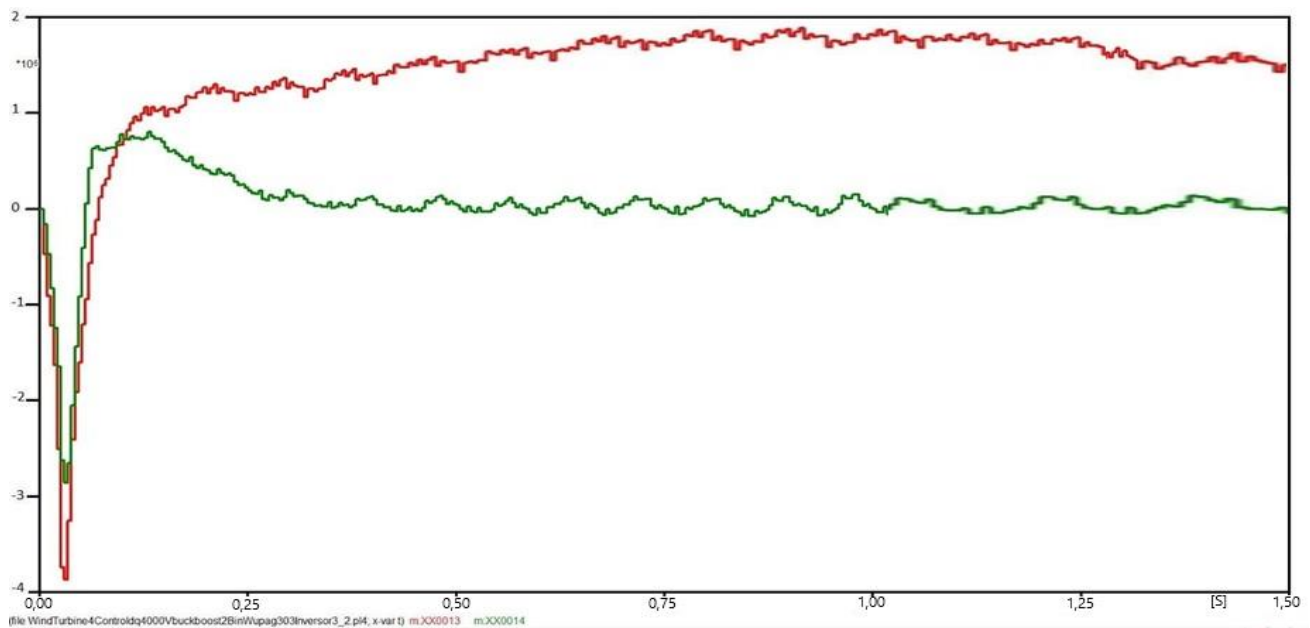


Fig. 10. Gráfico das potências ativa (kW) e reativa (kVar) injetadas na rede elétrica (autoria própria).

CONCLUSÃO

Neste estudo, foram realizadas algumas simulações de um gerador com uma potência nominal de 2,24 MVA p de uma turbina eólica tipo IV. Foram analisadas as correntes trifásicas que chegam a rede elétrica, e foi aferido que seus valores estavam coerentes com os valores simulados, além de se mostrarem equilibradas. Na análise dessas correntes se constatou que o ângulo de defasagem entre elas é 120° , e que quando acionado o aerogerador elas atingiram valores um pouco exorbitantes, até que fossem se aproximando 1 kA. Quanto a tensão no barramento capacitado do retificador foi possível notar que depois de um crescimento exponencial no valor da tensão, que se deu antes de 0,3 segundos de simulação, o gráfico passou a mostrar um comportamento mais linearizado, com valor um pouco abaixo de 3kV. O mesmo foi alcançado depois de 0,90 segundos de simulação. Os gráficos das potências ativa e reativa que saem do inversor controlado e vão ser injetadas na rede mostrou que nos primeiros décimos de segundo da simulação, no momento inicial, o gerador estava consumindo potência, o que dá pra notar nos Spikes negativos do gráfico. O comportamento oscilatório também se mostrou presente, resultado da presença de harmônicos no circuito. E a simulação veio apresentar uma possível mudança no regime transitório para o permanente, apenas depois de 1,25 segundos. O conversor conseguiu entregar máxima potência em 1,0 segundo a partir do acionamento da turbina, entregando 1,5MW, sem obter a neutralização da potência reativa à rede elétrica de forma que o fator de potência não foi unitário.

REFERÊNCIAS

- [1] COUNCIL, G. W. E. Global Wind Report. 2018. Disponível em: . Acesso em: 19 dez. 2019.
- [2] DIAS, M. V. X.; BOROTNI, E. da C.; HADDAD, J. Geração distribuída no Brasil: oportunidades e barreiras. Revista Brasileira de Energia, Rio de Janeiro, v. 11, n. 2, abr. 2012.
- [3] M. El-Sharkawi. Wind Energy – An Introduction. New York: CRC Press, 2016.
- [4] T. Kerdphol, M. Watanabe, K. Hongesombut and Y. Mitani, "Self Adaptive Virtual Inertia Control-Based Fuzzy Logic to Improve Frequency Stability of Microgrid With High Renewable Penetration," in IEEE Access, vol. 7, pp. 76071-76083, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2920886..
- [5] A. P. Moura, A. A. F. Moura, E. P. Rocha, “Geração Hidroelétrica e Eólicoelétrica”, 1ª ed, vol. 1. Edições UFC, 2019.
- [6] UMANS, S. D. . In: . Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley. Massachusetts, EUA: AMGH, 2014. v. 7a edição.
- [7] S. J. Chapman, “Fundamentos de Máquinas Elétricas”, 5ª ed. AMGH Editora Ltda., 2013.
- [8] TIBOLA, G. Sistema Eólico de Pequeno Porte Para Geração de Energia Elétrica com Rastreamento de Máxima Potência. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, mar. 2009.
- [9] D. W. Hart, “Eletrônica de Potência: análise de projetos e circuitos”, 1ª ed. AMGH Editoria Ltda., 2012.
- [10] DE MOURA, Adriano Aron Freitas et al. Análise, Modelagem e Controle de Potência para Sistemas de Energia Eólica Tipo IV usando a Transformada de Clarke.
- [11] M. A. Vitorino, “Eletrônica de Potência: Fundamentos, Conceitos e Aplicações”, 1st ed, vol. 1. Appris Editora, 2019. [12] A. Yazdani, R. Iravani, “Voltage-Sourced Converters in Power Systems”, IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [12] A. Yazdani, R. Iravani, “Voltage-Sourced Converters in Power Systems”, IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [13] A. P. Moura, A. A. F. Moura, E. P. Rocha, “Engenharia de Sistemas de Potência: Geração Hidroelétrica e Eólicoelétrica”, 1ª ed., vol 1. Edições UFC, 2019.

APÊNDICE

TABLE I. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO GERADOR SÍNCRONO TRIFÁSICO

Características Elétricas	Valores	Características Elétricas	Valores
Tensão	690 V	Xl	0,18 pu
Frequência	60Hz	Xd'	0,296 pu
Ângulos	0	Xq'	0,36 pu
Polos	2	Xd''	0,252 pu
RA	0,006 pu	Xq''	0,243 pu
Xd	1,31 pu	Tdo	4,49 s
Xq	0,474 pu	Tqo'	0 s
Xo	0,12 pu	XN	1000000 pu
RN	1000000 pu	XCAN	0,12 pu

TABLE II. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE CADA FASE DO CIRCUITO

Características Elétricas	Valores
Resistência(R)	0,5 ohms
Indutância(L)	0,1 Mh
Ks	0 Damp

TABLE III. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO REIFICATORY TRIFÁSICO NÃO CONTROLADO

Características Elétricas	Valores
Resistência(R)	200 ohms
Indutância(L)	0 H
Capacitância (C) paralelo ao diodo	1 mF
Capacitância (C) em U(0)	50000 µF

TABLE IV. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DO CONVERSOR BOOST

Características Elétricas	Valores
Amplitude	1
Período do Chaveamento (T_s)	0,000238 s
Largura de Pulso (T_{on})	0,00005 s
Indutância	0,69 mH
Capacitância	50000 µF