



ESTRUTURA FÍSICA DE PARQUES EÓLICOS E OS PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DAS TOPOLOGIAS DE GERAÇÃO

L. P. Moura^{1*}, M. S. Lima², J. C. Oliveira², G. S. Troncha², A. Reis³

¹FEEC – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas

²FEELT – Faculdade de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Uberlândia

³FGA – Faculdade UnB Gama – Universidade de Brasília

Resumo - Este artigo apresenta as principais topologias utilizadas para extração da energia eólica e interligação de parques eólicos com os sistemas elétricos de potência. Ao longo do texto é apresentado o princípio de funcionamento de cada tecnologia, apontando os pontos fortes e as desvantagens de cada uma delas. Ainda, apresenta-se os principais tipos de conversores utilizados para conexão dos geradores com as redes elétricas.

Palavras-Chave - Conversores eletrônicos, energia eólica, máquinas elétricas, princípios de operação, topologias de geração.

PHYSICAL STRUCTURE OF WIND FARMS AND THE PRINCIPLES OF OPERATION OF GENERATION TOPOLOGIES

Abstract - This article presents the main topologies used for extracting wind energy and interconnecting wind farms with power systems. Throughout the text, the principle of operation of each technology is presented, pointing out the strengths and the disadvantages of each one of them. Also, the main types of converters used to connect the generators to the electrical networks are presented.

Keywords - Electronic converters, wind Energy, electric machines, principles of operation, generation topologies.

I. INTRODUÇÃO

Os sistemas elétricos de potência são alvos, no momento, de grandes quebras de paradigmas e modernização dos processos voltados para a geração da energia elétrica. Mudanças nas tecnologias de geração, transmissão, distribuição e consumo são cada vez mais evidentes. Tal processo se deve principalmente às crescentes preocupações com as mudanças climáticas, à sustentabilidade, aos altos preços da energia, às questões relacionadas à segurança energética, à possibilidade de escassez em curto ou médio

período de algumas fontes de energia convencionais, dentre outros.

Sendo assim, a sociedade preza pelo uso inteligente e sustentável dos recursos naturais e, como consequência, a geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Nesse contexto, a busca pelo aproveitamento desses recursos tem incorporado diversas fontes de energia nos sistemas elétricos, as quais se destacam por se tratarem de fontes de energia renovável e por trazerem maior diversificação da matriz energética.

O recurso renovável cuja utilização cresce de forma mais acentuada atualmente, no Brasil, é a energia eólica. Ao longo dos últimos anos, devido aos incentivos econômicos, tornou-se possível o desenvolvimento de novas concepções e tecnologias para a construção de aerogeradores e, por consequência, a redução gradual e expressiva dos custos de implantação. Assim, o aproveitamento da energia eólica como alternativa para geração de energia elétrica atingiu uma escala de contribuição mais significativa, em termos de geração, para os sistemas elétricos, como reportado em [1].

Em um contexto mundial, o Brasil está numa posição de destaque por possuir grande disponibilidade de recursos hídricos, ao passo que empreendimentos eólicos ainda são emergentes no cenário nacional, como aponta as informações contidas na Figura 1 [2]. Vale, todavia, destacar que estudos recentes são indicativos de uma tendência de esgotamento do potencial hidrelétrico aproveitável e o aumento das energias renováveis não hidráulicas [3], fato este que, certamente, irá impactar fortemente na composição da matriz energética nacional num futuro próximo.

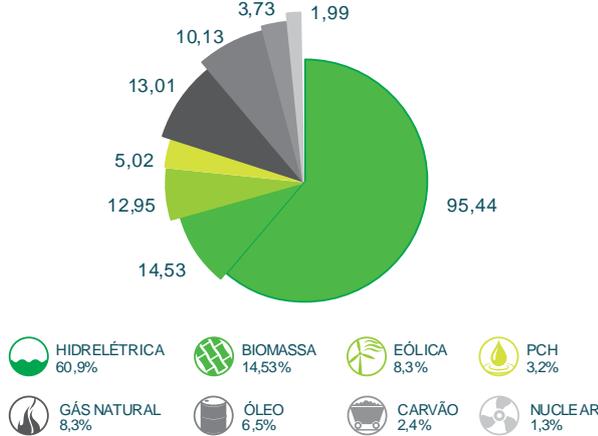
Pelo lado quantitativo, a participação da energia eólica no contexto brasileiro, ao final do ano de 2017, atingiu uma potência instalada de 12,77 GW, o que representou cerca de 8,1% da capacidade de geração elétrica do país.

A luz destes dados, percebe-se que o crescimento acentuado do potencial de geração eólica nacional acenderá discussões cada vez mais pertinentes relacionadas com o tema e, inserido neste cenário, também crescerá as discussões atreladas com a evolução de critérios específicos para a regulamentação do acesso de parques eólicos ao sistema elétrico, o desenvolvimento de novas tecnologias relacionadas

* leandropm91@gmail.com

aos aerogeradores, estudos dos impactos no sistema elétrico devido a operação dos geradores empregados, dentre outras.

Figura 1: Matriz energética brasileira, em GW.



Para o estudo dos impactos da operação dos parques eólicos nos sistemas elétricos, é necessária uma discussão acerca das principais características desses aproveitamentos, uma vez que as tecnologias empregadas nesses complexos estão diretamente relacionadas com o desempenho das fazendas eólicas.

II. ESTRUTURA FÍSICA DOS PARQUES EÓLICOS

Como ponto de partida, apresenta-se na Figura 2 a disposição física típica dos principais elementos que constituem uma fazenda eólica.

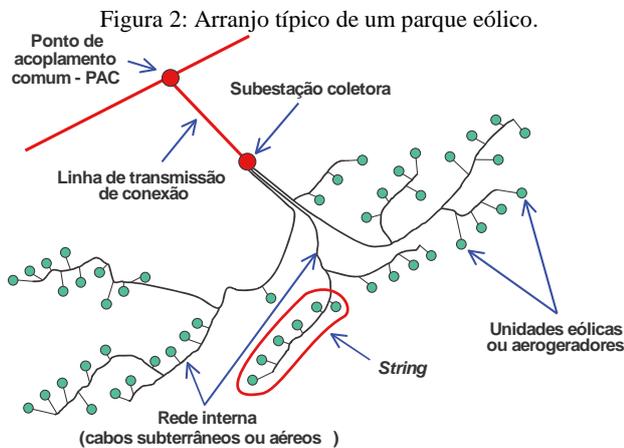


Figura 2: Arranjo típico de um parque eólico.

As unidades eólicas, ou aerogeradores, agrupados nas chamadas strings, são responsáveis pela extração de potência dos ventos e pela transformação da mesma em potência elétrica, a qual é conduzida à subestação coletora através das redes internas do parque eólico. Utiliza-se ainda uma linha de transmissão para interligação do parque eólico ao Ponto de Acoplamento Comum – PAC, junto à rede elétrica existente nas imediações da instalação.

III. TOPOLOGIAS DE GERAÇÃO

No que diz respeito aos aerogeradores e suas filosofias de operação existentes na atualidade, as principais topologias se

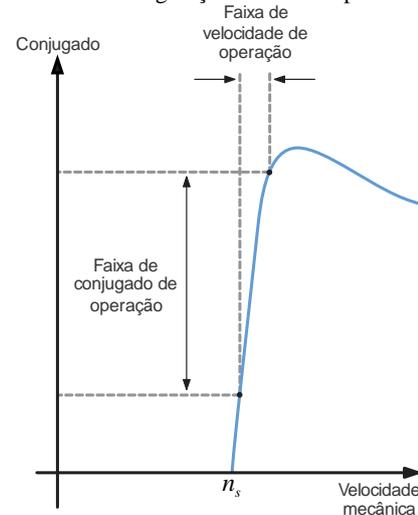
dividem, basicamente, em 2 grupos distintos: sistemas de geração com velocidade fixa e com velocidade variável. Estes são classificados de acordo com seus princípios de funcionamento e de operação [4]-[13].

A. Sistemas de geração com velocidade fixa

Sistemas de geração com velocidade fixa caracterizam-se por operarem dentro de uma faixa relativamente estreita de velocidades. Este grupo pode ainda ser dividido em dois outros: sistemas do tipo 1 e 2.

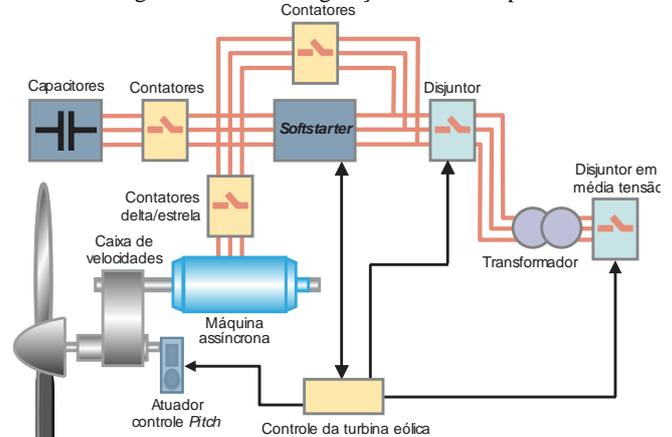
O sistema de geração eólica do tipo 1 é caracterizado pela conexão direta do gerador eólico à rede elétrica, método que comumente é denominado “conceito dinamarquês”. Sua faixa típica de operação está indicada pela Figura 3.

Figura 3: Característica típica de conjugado/velocidade de um sistema de geração eólica do tipo 1.



Essa topologia faz uso de Geradores de Indução com Rotor de Gaiola de Esquilo – GIRGE, uma vez que o mesmo é capaz de fornecer potência à rede elétrica mesmo quando há variações na velocidade de seu eixo mecânico. As conexões usualmente adotadas para este sistema são exemplificadas pela Figura 4.

Figura 4: Sistema de geração eólica do tipo 1.



Vale ressaltar que, apesar de o gerador estar conectado diretamente à rede elétrica, são empregados dispositivos que

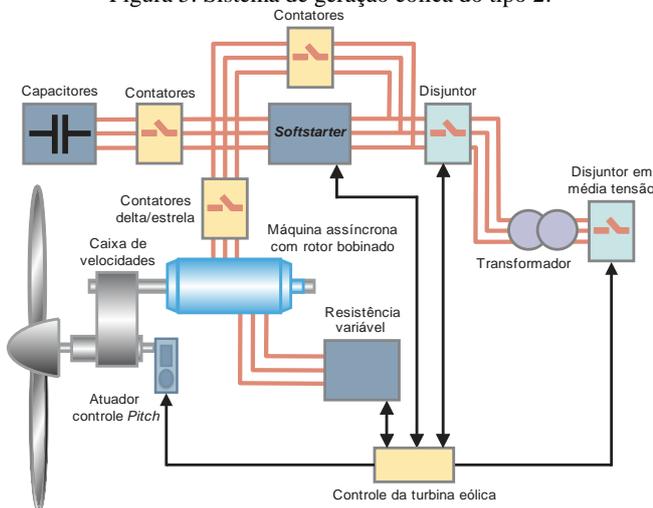
suavizam sua partida, como é o caso softstarter indicado. Tais dispositivos, por uma questão de custo, possuem capacidade nominal e térmica limitada, e por isso são retirados do sistema assim que a conexão do gerador com a rede é concluída.

Sendo assim, os sistemas de geração eólica do tipo 1 possuem construção simples e barata, sem a necessidade de dispositivos de sincronização ou de controle do gerador. No entanto, pela falta de dispositivos que façam a intermediação entre o gerador e a rede elétrica, essa topologia possui como uma de suas principais desvantagens o fato de que as variações de velocidade do vento são diretamente traduzidas em flutuações de tensão e de potência no ponto de conexão com o sistema elétrico, sendo o controle mecânico da turbina o único meio de limitação da potência gerada, controle que não é rápido o suficiente para minimização desses efeitos.

Uma vez que os geradores de indução, em sua essência, consomem reativos, os mesmos não são capazes de promover a regulação dinâmica da tensão. Desse modo é perfeitamente compreensível que, se nenhum dispositivo complementar de compensação de reativos for empregado, os parques eólicos dotados desses sistemas de geração poderão comprometer os níveis de tensão no PAC. Sendo assim, além do componente auxiliar de partida, são empregados bancos de capacitores conectados em paralelo com cada uma das unidades de geração dos parques eólicos, como indicado pela Figura 4.

Ainda tratando de sistemas de velocidade fixa, os sistemas do tipo 2 empregam o Gerador de Indução com Rotor Bobinado – GIRB, também conectado diretamente na rede elétrica. Os enrolamentos do rotor do gerador, nesse tipo de sistema, são dotados de dispositivos, sejam estes passivos ou ativos, que variam a resistência total do circuito (Figura 5).

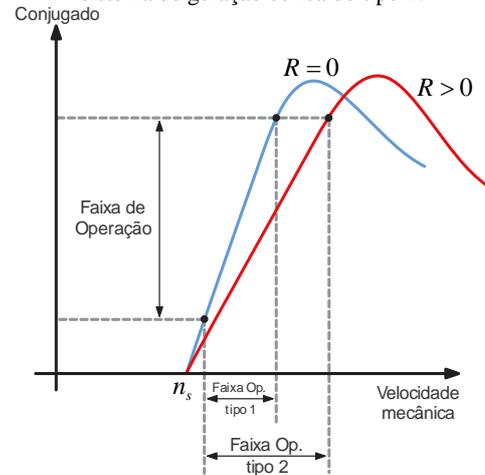
Figura 5: Sistema de geração eólica do tipo 2.



Como indicado pela Figura 6, com o ajuste da resistência total dos enrolamentos do rotor do gerador, é possível controlar seu conjugado com base em seu carregamento mecânico, o que dá maior flexibilidade quanto à faixa de velocidades de operação da turbina, quando comparada com a topologia do tipo 1. Esse método de controle de conjugado, no entanto, possui baixa eficiência, uma vez que toda a potência entregue aos enrolamentos do rotor do gerador é dissipada em forma de calor pelas resistências.

Por possuir maior flexibilidade de operação que o sistema do tipo 1, o sistema do tipo 2 é também denominado sistema de geração eólica de velocidade semi-variável.

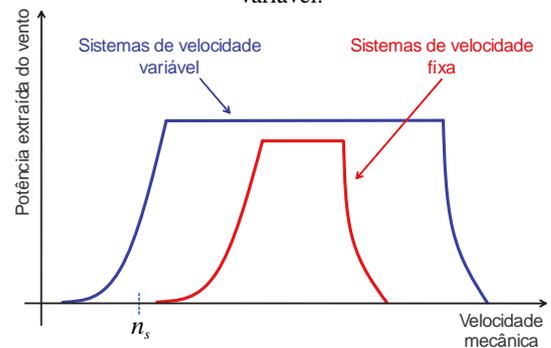
Figura 6: Característica típica de conjugado/velocidade de um sistema de geração eólica do tipo 2.



B. Sistemas de geração com velocidade variável

Muito embora ainda haja instalações que fazem uso de sistemas de geração eólica do tipo 1 e 2, atualmente, reconhece-se grandes esforços para o aprimoramento das tecnologias voltadas para os sistemas de geração eólica do tipo 3 e do tipo 4, ou sistemas de velocidade variável, cujos arranjos operam com velocidades que dependem do vento e empregam turbinas concebidas para extrair a máxima potência numa ampla faixa de velocidades, como indicado na Figura 7.

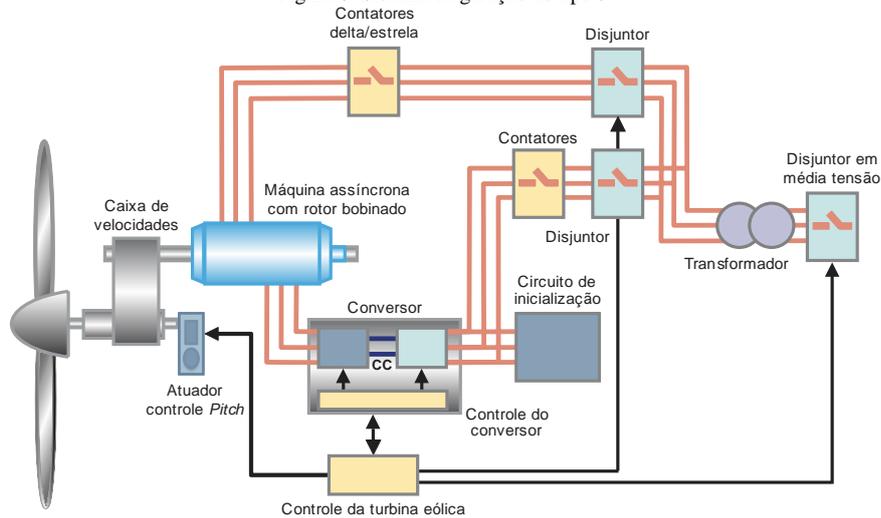
Figura 7: Faixas de extração de potência do vento por parques eólicos dotados de sistemas de velocidade fixa e de velocidade variável.



Quanto ao acoplamento das unidades de geração de velocidade variável com a rede elétrica, ressalta-se que as variações na velocidade do vento são responsáveis por rotações não controladas dos geradores e por variações da frequência das tensões geradas, fato este determinante para o emprego de conversores eletrônicos destinados à adequação e conexão dos complexos eólicos às redes elétricas.

Outro aspecto relevante está no fato de que em sistemas de geração eólica com as características supra postas, a conversão da energia mecânica em elétrica se apoia no uso de geradores síncronos e assíncronos. Neste contexto, encontra-se o sistema de geração eólica do tipo 3, o qual faz uso de um GIRB, cuja denominação comumente adotada e advinda do inglês é DFIG

Figura 8: Sistema de geração do tipo 3.



– Double Fed Induction Generator. O termo "duplamente excitado", ou "duplamente alimentado", reflete ao fato de que o estator da máquina é alimentado pela rede elétrica, ao mesmo tempo que seu rotor é alimentado por um conversor de potência, assim como indicado na Figura 8.

No que diz respeito aos conversores de potência, os mesmos são necessários para que a máquina de indução opere como gerador independente da velocidade do eixo mecânico. Basicamente, a principal função do conversor conectado do lado do rotor é controlar o conjugado eletromagnético da máquina, enquanto que a principal tarefa do conversor do lado da rede é manter a tensão do barramento ou link CC constante, fornecendo ou extraindo potência dos enrolamentos do rotor do gerador, dependendo da velocidade do eixo mecânico.

Muito embora a topologia DFIG seja vulnerável aos curtos-circuitos ocorridos na rede elétrica [14], a mesma se mostra vantajosa quando se trata do custo dos conversores eletrônicos, os quais possuem capacidade nominal significativamente menor do que a máquina de indução empregada. Geralmente, a potência dos conversores dos sistemas de geração eólica à máquina de indução duplamente excitada corresponde apenas a um terço da potência nominal da máquina. No entanto, vale ressaltar que a fração de potência dos conversores eletrônicos em relação à máquina de indução depende da faixa de velocidade de operação do conjunto, com valores típicos em torno de $\pm 30\%$ em torno da velocidade síncrona.

Percebe-se através da Figura 8 a ausência do banco de capacitores, os quais foram citados nos sistemas de geração do tipo 1 e 2. Sua ausência é perfeitamente compreensível, uma

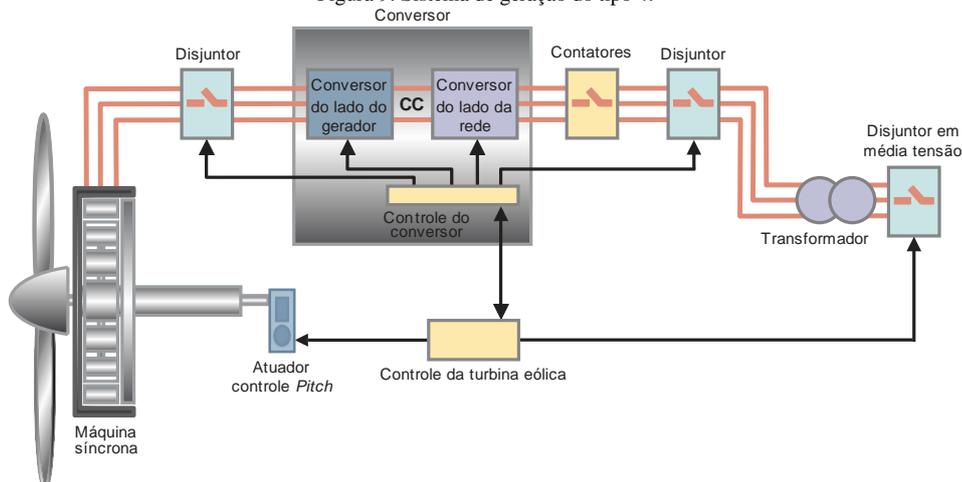
vez que os sistemas de geração do tipo 3 são dotados de conversores eletrônicos, os quais podem auxiliar na promoção da regulação de tensão do ponto de acoplamento do parque eólico. Neste contexto, a capacidade de fornecimento ou absorção de potência reativa dos conversores das unidades de geração depende, basicamente, da capacidade nominal dos mesmos e do carregamento de cada unidade em um determinado instante de tempo, uma vez que sua prioridade é auxiliar o gerador de indução a transferir toda a potência ativa convertida pela turbina eólica para o sistema elétrico.

Finalmente, destaca-se a essência do sistema de geração eólica do tipo 4, que se trata de um sistema de velocidade variável que faz uso de Geradores Síncronos – GS para conversão eletromecânica de energia. Esses sistemas são caracterizados pela conexão do gerador eólico à rede elétrica através de um conversor, denominado conversor pleno ou full converter, uma vez que toda a potência produzida pela turbina eólica é transmitida pelo mesmo (Figura 9).

Uma característica notável dos sistemas de geração eólica do tipo 4 é o abandono do uso da caixa de velocidades, que até então foi utilizada para adaptar a velocidade de rotação do rotor da turbina (baixa velocidade de rotação) para a operação do gerador (alta velocidade de rotação). Tal prática utilizada nos sistemas do tipo 1, 2 e 3 era indispensável, uma vez que o estator do gerador de indução era conectado diretamente na rede elétrica, sendo sua velocidade síncrona definida pela frequência do sistema elétrico.

Como consequência direta da não utilização da caixa de velocidades, as tensões induzidas no estator do gerador síncrono possuem frequência e amplitude variáveis, as quais

Figura 9: Sistema de geração do tipo 4.



são determinadas pela velocidade da turbina eólica, que por sua vez é definida pela velocidade do vento. Assim, os conversores de potência fazem a adaptação das tensões de saída da unidade de geração eólica e, uma vez que não é necessário adaptar as velocidades mecânicas envolvidas, o sistema de geração eólica do tipo 4 possui a mais ampla faixa de operação dentre todos os outros tipos, possuindo melhor eficiência de conversão da energia dos ventos [8].

Assim como nos sistemas de geração eólica do tipo 3, os conversores de conexão dos sistemas do tipo 4 podem fornecer ou absorver potência reativa para o auxílio na regulação de tensão no ponto de acoplamento do parque eólico [15]. Possuindo maior capacidade nominal, os conversores de conexão dos sistemas do tipo 4 podem participar da regulação de tensão mesmo em momentos em que a turbina eólica esteja trabalhando próxima de sua capacidade nominal. No entanto, apesar das notáveis qualidades apresentadas por essa topologia, a mesma possui algumas limitações. Por se tratar de um sistema dotado de conversores plenos, os custos iniciais são elevados.

Contudo, não obstante a crescente utilização da tecnologia que fazem uso das máquinas síncronas, não se pode ignorar que as máquinas de indução, diante de seus fortes atrativos econômicos, ainda se mantêm competitivas e amplamente empregadas, seguidos dos sistemas de geração do tipo 4 [16]-[20]. Vale ressaltar que existem outras topologias que cumprem as funções básicas de um sistema de geração eólica, mas não são comercialmente utilizadas ou possuem pouca expressão no mercado.

IV. COMPOSIÇÃO DOS CONVERSORES DE CONEXÃO

Uma vez que cada tipo de sistema de geração de energia eólica possui características distintas, as quais foram brevemente mencionadas, é perfeitamente compreensível que haja diversas topologias de conversores de conexão, os quais atendem as necessidades de cada tipo de sistema.

A seguir, são apresentadas as principais topologias de conversores de conexão empregados pelos principais fabricantes do mercado [6], [8], [9], [11], [12].

O conversor de conexão do tipo A apresentado na Figura 10, também denominado conversor back to back, é constituído de uma unidade de retificação e de uma unidade de inversão, ambas empregando o IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor em sua concepção. À unidade de retificação é atribuída a responsabilidade da extração da máxima potência disponível no vento, enquanto que a unidade de inversão trabalha como uma fonte de tensão, sendo denominada de VSI – Voltage Source Inverter de dois níveis, a qual mantém constante a tensão no elo de corrente contínua. Esses conversores são indispensáveis para o funcionamento dos sistemas de geração eólica do tipo 3, uma vez que necessitam de um conversor com fluxo de potência ativa bidirecional [21]-[23].

Apesar dos conversores do tipo A também serem empregados em sistemas de geração eólica do tipo 4, o custo dos mesmos pode ser significativo, uma vez que a potência nominal dos equipamentos desse sistema de geração é expressivamente maior. Dessa forma, geralmente, utiliza-se um conversor de conexão do tipo B, apresentado pela Figura

11, cuja unidade de retificação é constituída por uma ponte retificadora trifásica não-controlada auxiliada por um conversor CC/CC do tipo boost. Vale ressaltar que, dependendo da potência do aerogerador, vários conversores boost são utilizados em paralelo, em respeito aos valores nominais do equipamento. É importante salientar a necessidade da presença do conversor CC/CC para controle da extração de potência da turbina eólica, uma vez que a ponte retificadora em pauta não é capaz de exercer tal função. Já a unidade de inversão é idêntica às utilizadas em conversores do tipo A.

Figura 10: Conversor do tipo A.

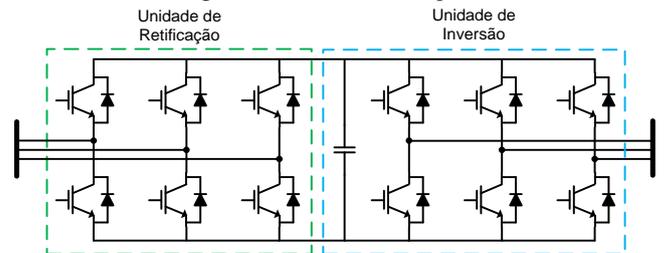


Figura 11: Conversor do tipo B.

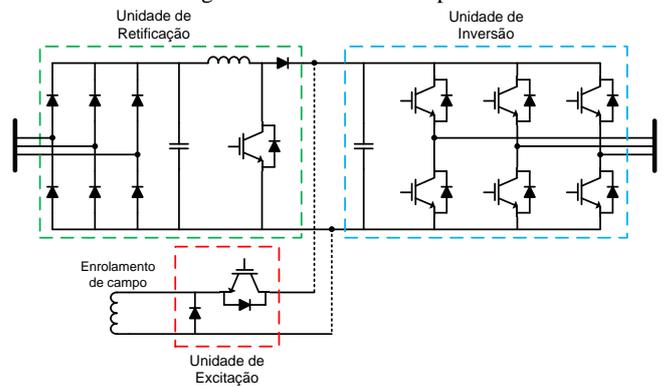
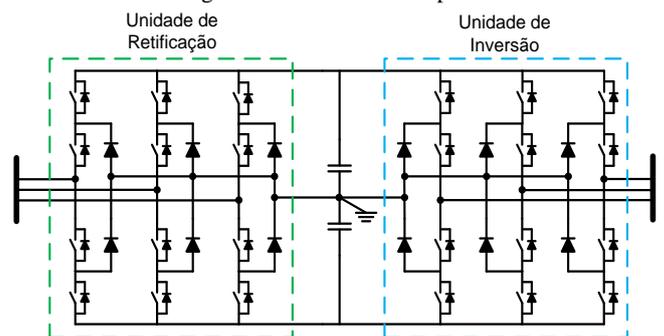


Figura 12: Conversor do tipo C.



Caso se trate de um sistema de geração, são utilizados geradores síncronos de rotor bobinado, fazendo-se presente, também, um conversor CC/CC do tipo buck, o qual supre a corrente do enrolamento de campo do gerador. Tal configuração é empregada por alguns fabricantes como uma alternativa ao uso de alguns materiais aplicados na confecção do rotor de ímã permanente. No entanto, essa topologia também possui suas desvantagens, uma vez que a mesma necessita de anéis coletores para acesso ao rotor do gerador, aumentando a complexidade da proteção dos circuitos auxiliares, tornando a configuração menos atraente [8], [24].

Atualmente, algumas tecnologias alternativas surgem com fortes atrativos operacionais. Tais tecnologias fazem parte de um grupo de conversores de potência denominado conversores multiníveis, cujo conceito é proporcionado por técnicas de geração de tensões senoidais a partir de um determinado número de níveis de tensão em corrente contínua [11], [12], [25]. Sua principal vantagem é o aumento da tensão de saída, o que possibilita em alguns casos a eliminação do transformador de potência utilizado nos sistemas de geração eólica convencionais. Além disso, utiliza-se estratégias de chaveamento com velocidades de comutação inferiores, o que se traduz em menores perdas de comutação, tornando assim o conjunto mais eficiente [26]. A Figura 12 traz um exemplo de conversor multinível, o chamado Neutral-Point Clamped – NPC [27].

Uma vez que a quantidade de chaves semicondutoras necessárias para constituição de conversores multiníveis é alta, seu custo é demasiadamente elevado para sistemas de geração eólica com baixa potência, o que torna esses conversores de conexão mais atrativos para aplicações offshore.

V. CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou as principais informações acerca das principais tecnologias de sistemas e geração de energia eólica utilizadas pelos principais fabricantes do mercado. Foram apresentados os princípios de funcionamento dos principais tipos de turbinas, assim como os principais tipos de conversores de potência utilizados para integração dos geradores com as redes elétricas. Verificou-se que, apesar da simplicidade e custo reduzido, os sistemas de geração dos tipos 1 e 2 estão caindo em desuso, sendo substituídos por sistemas do tipo 3 e 4. Vale destacar que, apesar do uso crescente dos sistemas de geração do tipo 4, os sistemas do tipo 3 ainda são os mais utilizados. Ao mesmo tempo, quanto aos conversores empregados, há uma tendência do aumento do número de níveis dos mesmos, indo de encontro com o uso de turbinas com potências cada vez mais elevadas.

REFERÊNCIAS

- [1] International Energy Agency, “Technology roadmap - Wind energy,” *Technology Roadmap*. 2013.
- [2] ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica, “Dados Mensais - Fevereiro 2018.” 2018.
- [3] ABEEólica - Associação Brasileira de Energia Eólica, “Boletim Anual 2017.” 2017.
- [4] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*, vol. 8. John Wiley & Sons, Ltd., 2005.
- [5] M. H. Ali, *Wind Energy Systems: Solutions for Power Quality and Stabilization*. CRC Press, 2012.
- [6] O. Anaya-Lara, N. Jenkins, J. Ekanayake, P. Cartwright, and M. Hughes, *Wind energy generation: modelling and control*, vol. 54, no. 2. John Wiley & Sons, Ltd., 2009.
- [7] F. Blaabjerg and Z. Chen, *Power Electronics for Modern Wind Turbines*, vol. 1, no. 1. Morgan & Claypool, 2006.
- [8] S. Chakraborty, M. Simões, and W. Kramer, *Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems - A Sourcebook of Topologies, Control and Integration*. Springer, 2013.
- [9] M. El-Sharkawi, *Wind Energy - An Introduction*. CRC Press, 2016.
- [10] G. Michalke, “Variable Speed Wind Turbines - Modelling, Control, and Impact on Power Systems,” Technical University of Darmstadt, 2008.
- [11] V. Vittal and R. Ayyanar, *Grid Integration and Dynamic Impact of Wind Energy*. Springer, 2013.
- [12] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, and S. Kouro, *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*. John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- [13] ABB, “Breakers and Switches Low Voltage Products Protection and Control on Wind Turbine application.” 2010.
- [14] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley & Sons, Ltd., 2011.
- [15] W. Kramer, S. Chakraborty, B. Kroposki, and H. Thomas, “Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems Part 1: Systems and Topologies Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems Part 1: Systems and Topologies,” 2008.
- [16] D. Anca, F. Iov, F. Blaabjerg, and L. H. Hansen, “Review of Contemporary Wind Turbine Concepts and their Market Penetration,” *Wind Eng.*, vol. 28, no. 3, pp. 247–263, 2009.
- [17] E. Watanabe, F. K. Lima, and S. L. Lima, “The Challenges of Wind Turbines Technologies and their Possible Impacts on the Electric Distribution Network,” in *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos de Potência (SBSE)*, 2012, p. 16.
- [18] D. Anca and L. H. Hansen, “Market penetration of wind turbine concepts over the years,” *Ewea*, vol. 10, no. 1, pp. 81–97, 2006.
- [19] D. Anca and L. H. Hansen, “Wind turbine concept market penetration over 10 years (1995–2004),” *Wind Energy*, vol. 10, no. 1, pp. 81–97, Jan. 2007.
- [20] AEMO, “Wind Turbine Plant Capabilities Report - 2013 Wind Integration Studies.” 2013.
- [21] ABB, “Hardware manual ACS800-67LC wind turbine converters.” 2011.
- [22] ABB, “System description and start-up guide ACS800-67 wind turbine converters.” 2011.
- [23] ABB, “Hardware Manual ACS800-67 Wind Turbine Converters for Asynchronous Slip Ring Generators.” 2010.
- [24] Infineon, “Solutions for Wind Energy Systems.” 2013.
- [25] ABB, “Medium voltage for wind power PCS 6000 full-scale converters up to 9 MVA.” 2009.
- [26] J. Glasdam, J. Hjerrild, Ł. H. Kocewiak, and C. L. Bak, “Review on Multi-Level Voltage Source Converter Based HVDC Technologies for Grid Connection of Large Offshore Wind Farms,” in *Power System Technology (POWERCON)*, 2012, vol. 10, pp. 1–6.
- [27] S. Floten, “Modulation Methods for Neutral-Point-Clamped Three-Level Inverter,” Norwegian University of Science and Technology, 2010.