

A INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO SISTEMA ELÉTRICO

CORRÊA, Michel Ferreira¹

Professor²

RESUMO

A energia eólica tem ganhado grande destaque no campo das energias renováveis para a produção elétrica. Ainda assim, a energia gerada pelas turbinas eólicas ao longo do tempo é caracteristicamente desigual devido à natureza imprevisível de sua fonte primária de energia. Isso só aumenta os problemas inerentes à integração de um grande número de turbinas eólicas em redes de energia, tornando sua contribuição bastante difícil de gerenciar (regulação de tensão e frequência, operação do parque eólico, etc.). Diante dessa perspectiva este artigo objetiva analisar os requisitos do sistema de energia para a integração da energia gerada nos sistemas eólicos brasileiros ao Sistema Energético Nacional (SIN). Como objetivos específicos estão apresentar um histórico da energia eólica, apresentar alguns problemas e desafios técnicos da integração de usinas eólicas ao SIN e discutir algumas soluções e métodos técnicos possíveis. A metodologia utilizada foi de revisão da literatura. A integração da energia eólica no sistema de energia passou a ser um problema para otimizar a utilização do recurso e para dar continuidade ao elevado índice de instalação de capacidade eólica, necessária para atingir os objetivos de sustentabilidade e segurança de abastecimento. Esses desafios incluem os efeitos da energia eólica no sistema de energia, o custo operacional do sistema de energia, a qualidade da energia e os desequilíbrios de energia (estabilidade da rede). Conclui-se que é necessário buscar evoluir no desenvolvimento de equipamentos que possam melhorar a correção dessas possíveis falhas e, assim, otimizar a energia gerada a partir de turbinas eólicas.

Palavras-chave: Energia eólica. Integração. Problemas. Soluções.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, as tecnologias de energias renováveis estão sendo rapidamente desenvolvidas em todo o mundo, especialmente, a energia eólica tem tido um acelerado crescimento nas últimas décadas. A Associação Brasileira de

¹ Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário UNINTER.

² Orientador de TCC no Centro Universitário UNINTER.

Energia Eólica (ABEEólica, 2020) aponta que o Brasil tem em 2019 16 GW de capacidade instalada de geração de energia eólica. Com previsão de chegar, em 2024, a 24,2 GW, o que representa cerca de 7,6% do total da energia elétrica consumida no país.

O país planeja realizar uma participação de maior na produção de eletricidade até 2050 com energia eólica. Normalmente as turbinas eólicas estão sendo conectadas a vários níveis de tensão dos sistemas de energia e são distribuídas em sistemas de baixa/média tensão, bem como diretamente conectadas a redes de transmissão de alta tensão (EPE, 2018).

As usinas de energia tradicionais costumam usar combustíveis não renováveis, como carvão, petróleo e gás, que são os recursos limitados, e produzem poluição ambiental, embora os geradores baseados em combustíveis fósseis, com boa capacidade de controle e disponibilidade, e experiências ricas tenham sido amplamente utilizadas nos sistemas de energia tradicionais (HEIER, 2014).

Os parques eólicos em larga escala e outras tecnologias de geração baseadas em energia renovável estão desempenhando um papel cada vez mais importante e trazem muitas mudanças às redes elétricas. Portanto, as funções das usinas tradicionalmente centralizadas serão significativamente reduzidas em algumas áreas (COLMENAR-SANTOS et al., 2019)

No entanto, a energia produzida pelos parques eólicos e outras tecnologias de energia renovável depende em grande parte das condições naturais, como a velocidade do vento, que são estocásticas e não podem ser previstas com precisão. Além disso, a tecnologia de geração é bem diferente daquela usada pelas usinas convencionais baseadas em gerador síncrono. A eletrônica de potência é amplamente utilizada como interface de grade para turbinas eólicas modernas, com classificação parcial, como geradores de indução duplamente alimentados ou classificação total com geradores de indução ou geradores síncronos (HEIER, 2014).

As diferenças na fonte de energia e na tecnologia de geração apresentam novos problemas e desafios técnicos, o que dificulta a operação e o controle do sistema de energia (FADIGAS, 2011). Assim, o sistema teria mais incertezas e se tornaria mais vulnerável se os problemas e desafios não pudessem ser abordados adequadamente.

Diante dessa perspectiva este artigo objetiva analisar os requisitos do sistema de energia para a integração da energia gerada nos sistemas eólicos

brasileiros ao Sistema Energético Nacional (SIN). Como objetivos específicos estão apresentar um histórico da energia eólica, apresentar alguns problemas e desafios técnicos da integração de usinas eólicas ao SIN e discutir algumas soluções e métodos técnicos possíveis.

O tema foi definido depois de observar o potencial eólico nacional e a capacidade de crescimento na geração dessa energia nos próximos anos, principalmente em função dos bons ventos que sopram as regiões Nordeste e Sul do país.

2 O USO DO VENTO COMO ENERGIA ELÉTRICA

A energia eólica é a energia obtida do vento. É uma das fontes de energia mais antigas exploradas pelo homem e hoje é a fonte de energia renovável mais estabelecida e eficiente (HEIER, 2014). Nos tópicos a seguir será abordado como esta energia é explorada e transformada em energia elétrica para ser utilizada pela humanidade.

2.1 ESTRUTURA E FUNCIONAMENTO DE TURBINAS EÓLICAS

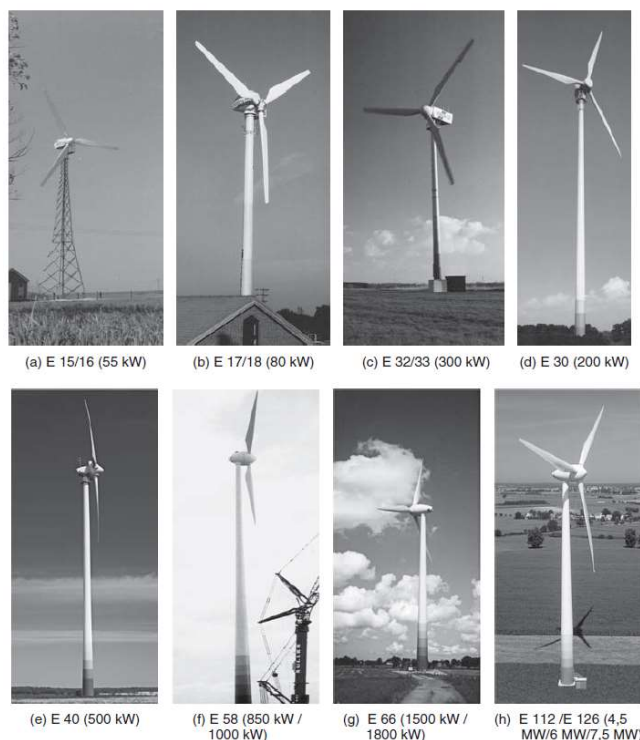
As modernas turbinas eólicas elétricas vêm em alguns estilos e tamanhos diferentes, dependendo de seu uso. O estilo mais comum, grande ou pequeno, é o design do eixo horizontal (com o eixo das lâminas horizontal ao chão). Nesta turbina, duas ou três pás giram contra o vento da torre em que está assentada (USHER, 2019).

Pequenas turbinas eólicas são geralmente usadas para fornecer energia fora da rede, variando de turbinas muito pequenas de 250 watts, projetadas para carregar baterias em um veleiro, a turbinas de 50 quilowatts que alimentam fazendas de laticínios e vilarejos remotos. Como os antigos moinhos de fazenda, essas pequenas turbinas eólicas costumam ter ventiladores de cauda que os mantêm orientados ao vento (ROY, 2019).

As grandes turbinas eólicas, mais frequentemente usadas pelas concessionárias para fornecer energia a uma rede, variam de 250 quilowatts até enormes máquinas de 3,5 a 7,5 MW que estão sendo usadas no exterior. Em 2009, as turbinas eólicas terrestres médias possuíam uma capacidade de 1,75 MW. As

turbinas em escala de utilidade pública geralmente são colocadas em grupos ou linhas para aproveitar os principais pontos de vento. Os parques eólicos como esses podem consistir em algumas ou centenas de turbinas, fornecendo energia suficiente para dezenas de milhares de residências (FADIGAS, 2011). Os principais modelos de estruturas e turbinas de geração de energia eólica pode ser observado na Figura 1:

Figura 1 - Turbinas com engrenagens de velocidade, modelos e alturas variáveis



Fonte: Heier (2014, p. 26)

Do lado de fora, as turbinas eólicas de eixo horizontal consistem em três grandes partes: a torre, as pás e uma caixa atrás das pás, chamada barquinha, conforme pode ser observado nos diversos modelos da Figura 1. Dentro da barquinha é onde ocorre a maior parte da ação, onde o movimento é transformado em eletricidade. Turbinas grandes não têm ventiladores de cauda; em vez disso, eles têm controles hidráulicos que orientam as pás contra o vento (CORKE; NELSON, 2018).

No projeto mais típico, as lâminas são presas a um eixo que se depara com uma caixa de engrenagens. A caixa de velocidades, ou transmissão, aumenta a velocidade da rotação, de cerca de 50 rpm até 1.800 rpm. O eixo giratório mais rápido gira dentro do gerador, produzindo eletricidade CA. Uma solução para esse problema é ter turbinas de velocidade constante, onde as pás se ajustam, girando levemente para o lado, para abrandar quando o vento acelera. Outra solução é usar turbinas de

velocidade variável, onde as pás e o gerador mudam de velocidade com o vento, e sofisticados controles de potência corrigem as flutuações da saída elétrica. Uma terceira abordagem é usar geradores de baixa velocidade (CORKE; NELSON, 2018).

Uma vantagem que as turbinas de velocidade variável têm sobre as de velocidade constante é que elas podem operar em uma faixa mais ampla de velocidades do vento. Todas as turbinas têm limites superiores e inferiores à velocidade do vento que podem suportar: se o vento estiver muito lento, não há energia suficiente para girar as pás; se for muito rápido, há o risco de danos ao equipamento. As velocidades de corte das turbinas podem afetar a quantidade de tempo em que as turbinas operam e, portanto, sua potência (ROY, 2019).

2.2 MATRIZ ENERGÉTICA E O ATUAL CENÁRIO DA POLÍTICA ENERGÉTICA BRASILEIRA

O modelo energético brasileiro tem sofrido transformações contundentes desde o início da crise hídrica que ocorreu no ano de 2014 o que fez com que governantes adotassem nova postura frente a esse panorama. Em função da necessidade energética nacional, tomassem novos rumos, passando a investir em fontes renováveis tais como solar, eólica, biomassa e o gás natural o que alterou a formação da matriz energética nacional (MOREIRA, 2019).

2.2.1 A Matriz Energética

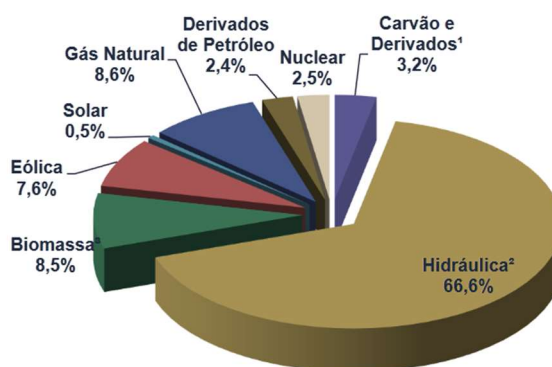
De acordo com Moreira (2019, p. 7) a matriz energética “é o panorama de distribuição real de aproveitamento dos recursos energéticos dentro de um país, de uma região ou do mundo” (MOREIRA, 2019, p. 7). O autor acrescenta que a sua determinação se vincula ao balanço energético, dependendo de estudos setoriais que objetivam pesquisar a evolução do coeficiente demanda/oferta referente à energia elétrica de um país, região ou de todo o mundo.

A matriz energética é criada tendo como base o período de um ano e a análise de um cenário específico. Projetada para determinado período, propõe como deve ser o desenvolvimento energético de uma região nesse espaço de tempo. A construção da matriz é feita levando-se em consideração os diversos setores de produção, industrial, residencial, agropecuário e de serviços do lado da demanda e, do lado da

oferta, os centros de transformação das principais fontes de energia (REIS; SANTOS, 2014).

Com relação à geração de energia elétrica o Brasil também utiliza um grande percentual oriundo de fontes renováveis, principalmente a hidrelétrica. Porém outras fontes renováveis, como a eólica e solar tem ganhado destaque nos últimos anos. Para se ter uma ideia, a energia solar em 2013 se quer aparecia no Balanço Energético e em 2018 representava 0,5% de toda a energia elétrica consumida no país. A eólica em 2013 representava 1,1% e em 2018 saltou para 7,6% da energia elétrica gerada no Brasil (BARROS et al., 2015). Esses dados, com relação à energia elétrica, podem ser melhor analisados na Figura 2:

Figura 2- Matriz de geração de energia elétrica – Ano Base 2018



Fonte: EPE (2019, p. 35)

Isso faz com que a participação de energias renováveis na matriz elétrica brasileira, com o incremento da geração eólica, chegue a 83,3% em 2018. O que é um grande resultado pois, de acordo com Brasil (2019) em 2016 o resto do mundo apenas 24,0% da energia elétrica consumida provinha de fontes renováveis.

2.3 EVOLUÇÃO DA EXPLORAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

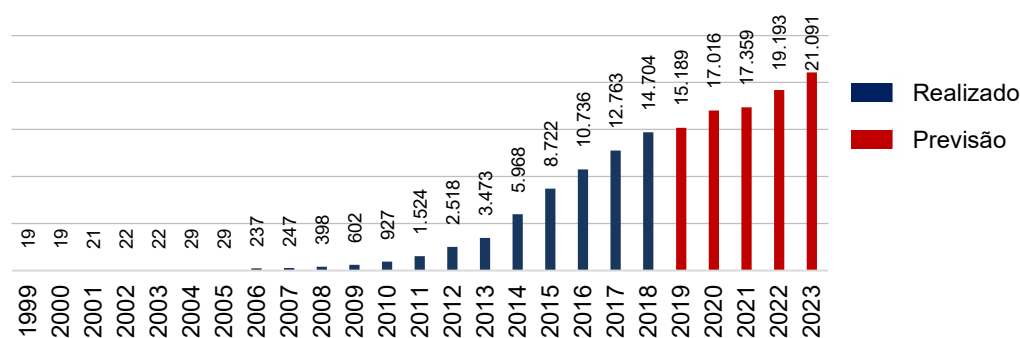
A primeira grande turbina eólica da América Latina foi instalada em 1992, em Fernando de Noronha, com potência nominal de 75 KW (três pás e um rotor de 17 m de diâmetro), fornecendo de 10 a 20% da demanda local de energia, mas, em 2009, foi destruída por uma tempestade elétrica. Ao longo dos anos, alguns outros projetos foram conduzidos em alguns estados do Brasil, mas pouco foi feito para efetivar a energia eólica em uma geração alternativa de energia elétrica, atribuída à falta de

políticas públicas e ainda a custos proibitivos de tecnologia na época (PINTO, 2013).

Em 2001 foi estimado, de acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro (BRASIL, 2001), um potencial eólico de 143 GW no Brasil, tendo como base a altura das torres de 50m e a velocidade do vento de igual ou superior. De acordo com o atlas isso seria suficiente para as tecnologias de turbinas existentes nessa época.

Não há dúvidas que o atlas foi importante para que o setor eólico brasileiro se desenvolvesse e chegasse ao patamar existente hoje. O gráfico 4 mostra a evolução da capacidade eólica instalada no Brasil de 1999 a 2018 e uma previsão até 2023, com base na consolidação da capacidade contratada em ambientes de contratação livres e regulados.

Figura 3 – Evolução da capacidade de eólica instalada no Brasil 1999-2018 realizado, 2019-2023 previsto.



Fonte: Adaptado de Tolmasquim (2016), EPE (2019)

De fato, considerando as tecnologias atuais de produção de energia eólica e, principalmente, o uso de turbinas eólicas de 100 m de altura, o potencial eólico brasileiro deve ser muito superior ao avaliado pelo primeiro atlas de vento em 2001. Dessa forma, de acordo com Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica, 2020), o potencial eólico brasileiro pode atingir 880 GW, sendo 522 GW tecnicamente viáveis, considerando que o valor máximo de energia que pode ser extraído do vento corresponde a cerca de 60% da energia total disponível. As estimativas apontam apenas para a região Nordeste, com um potencial *onshore* de 309 GW (EPE, 2019).

O potencial eólico *offshore* brasileiro também é enorme e estima-se que alcance 1,3 TW (EPE, 2019). Do atlas do vento brasileiro para velocidades do vento em alturas de 100 e 200 m (ANEEL, 2003), as regiões oceânicas da costa sul e nordeste podem ser identificadas como áreas de ventos fortes para geração de energia eólica.

Até outubro de 2018, havia 568 parques eólicos instalados em 12 estados do Brasil (14,3 GW), representando mais de 7000 turbinas eólicas, atualmente equivalentes ao consumo residencial brasileiro médio de cerca de 26 milhões de casas (80 milhões de pessoas). Além disso, pode-se observar que os principais estados estão localizados na região Nordeste, ou seja, mais de 85% da capacidade eólica provém dessa região. O Brasil deverá ter outros 213 novos parques eólicos até 2023. O governo federal espera uma expansão de 125% até 2026 (EPE, 2019), quando praticamente um terço da energia do país virá dos ventos. As estimativas apontam que, até 2026, a cadeia de energia eólica poderá gerar aproximadamente 200.000 novos empregos diretos e indiretos (ABEEÓLICA, 2019).

3 METODOLOGIA

O presente trabalho se caracteriza como uma pesquisa básica pois mesmo que esta pesquisa tenha avanço no conhecimento científico não há preocupação em aplicabilidade imediata dos resultados, apenas de apresentá-los (PRADO, 2011). Com relação aos meios este trabalho se caracteriza como uma pesquisa bibliográfica na qual foi utilizada uma revisão da literatura em livros, artigos e manuais. Nesse sentido, Santos (2011) aponta que:

É importante ressaltar que, ao estudar fatos da atualidade, que ainda não foram cristalizados na forma de livros, os periódicos, jornais, revistas e, principalmente, publicações especializadas no assunto são de fundamental importância para o pesquisador (SANTOS, 2011, p. 83).

A busca pelas fontes de informação para elaboração desse trabalho será na biblioteca virtual da universidade e na base Google Scholar. Os dados buscados serão com relação capacidade de geração, sistemas de transmissão, capacidade estocástica da energia e soluções para os problemas encontrados na geração e transmissão da energia eólica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 PROBLEMAS NA GERAÇÃO DA ENERGIA EÓLICA: A VARIAÇÃO DO VENTO

Duas características advindas da transferência dos caprichos climáticos para a potência produzida e da automação dos processos de produção permitem concluir que a tecnologia eólica não oferece um adequado controle à produção gerada. Com efeito, os processos mecânicos de produção de energia a partir de turbinas eólicas transferem toda a variabilidade do vento para a produção elétrica definida como intermitente. Esta intermitência corresponde aqui à variação fracamente previsível da energia eólica (TANER; DEMIRCI, 2014).

É caracterizada por uma grande variabilidade no que diz respeito às previsões estabelecidas de produção para um dia antes. Como as variações climáticas do vento (rajadas, variações de velocidade, mudança de direção) são transmitidas diretamente para a produção, cada variação da velocidade do vento aumenta ou diminui a potência gerada. Então, a energia eólica é considerada variável (USHER; 2019).

A análise da controlabilidade da energia eólica requer a capacidade de antecipar essas variações para se permitir algum grau de controlabilidade da produção. A previsibilidade da energia eólica é a chave para que a energia permita um maior controle sobre a produção de energia eólica. Por falta de controle do rendimento da tecnologia do aerogerador, a previsibilidade permitiria uma correta antecipação das injeções na rede. É mais fácil gerenciar o equilíbrio entre a produção e o consumo (TOLMASQUIM, 2016).

Porém, Tolmasquim (2016) infere que é difícil antecipar a produção elétrica que será gerada pelas turbinas eólicas, pois as ferramentas de previsão não são projetadas para reproduzir todas as variações do vento. Os modelos de previsão estimam a produção de energia através da compilação de dados climáticos (uma velocidade média do vento ao longo de um determinado período) e dados técnicos de turbinas eólicas.

4.2 EFEITOS DA ENERGIA EÓLICA NO SISTEMA ELÉTRICO

Adicionar energia eólica aos sistemas de energia terá impactos benéficos, reduzindo as emissões da produção de eletricidade e reduzindo os custos operacionais do sistema de energia, pois menos combustível é consumido nas usinas convencionais (HARISH; SANT, 2020).

No entanto, possíveis impactos negativos terão que ser avaliados para garantir que eles não compensarão uma parte muito grande dos benefícios e também para

garantir a segurança da operação do sistema de potência. A previsibilidade limitada e as altas variações intertemporais da energia eólica causam um espectro completo de problemas, variando de desvios de frequência de curto prazo a problemas de balanceamento de longo prazo e envolve uma série de novos desafios e restrições adicionais para a operação na rede elétrica (PINTO, 2013).

O tamanho do sistema de energia, o mix de capacidade de geração (flexibilidade inerente) e as variações de carga afetam a forma como a produção intermitente é assimilada ao sistema. Se a proporção da produção de energia intermitente for pequena e se a produção de energia eólica estiver bem dispersa em uma grande área e se correlacionar com a carga, a energia eólica é mais fácil de integrar no sistema (HEIER, 2014).

No curto prazo, principalmente as variações na produção de energia eólica afetam a operação do sistema elétrico. Isso se refere à alocação e uso de reservas extras, bem como perdas cíclicas de unidades convencionais de produção de energia e impactos na rede de transmissão ou distribuição. Em um sistema grande, os requisitos de reserva de diferentes cargas e energia eólica interagem e se compensam parcialmente (HEIER, 2014).

Em longo prazo, a produção de energia eólica esperada nas horas de pico de carga tem um impacto na adequação do sistema de energia. É expresso como o crédito de capacidade da energia eólica. Para uma baixa penetração do sistema, o crédito de capacidade é igual ao de uma usina totalmente confiável, gerando a mesma potência média nos momentos em que o sistema pode estar em risco. Conforme a penetração aumenta, as fontes variáveis tornam-se progressivamente menos valiosas para economizar capacidade térmica (HEIER, 2014).

Os problemas devido à integração em larga escala de usinas eólicas no sistema de potência aumentam a dificuldade de participação nos serviços do sistema (controle da tensão e da frequência, arranque automático ou *black start*, possibilidade de operar em ilhamento etc.) e estabilizar a rede elétrica fortemente dependente do equilíbrio entre oferta e demanda (CORKE; NELSON, 2018).

Outros problemas técnicos vêm das flutuações do recurso eólico. Por exemplo, no caso da produção de energia, as oscilações têm como consequência que o conversor deve ser dimensionado para suportar o pico de produção. Além disso, essas flutuações complicam o gerenciamento da energia produzida. Na verdade, a maioria dos aplicativos requer uma alimentação constante (FADIGAS, 2011). No caso

da rede pública de distribuição de energia, a possibilidade de controlar a potência consumida variando levemente a tensão não pode ser realizada pela multiplicação dos sistemas automáticos que mantêm constante a potência consumida apesar dessas variações

4.3 IMPACTOS DA GERAÇÃO EÓLICA NA QUALIDADE DA ENERGIA

A localização e a natureza intermitente das máquinas de turbinas eólicas podem causar problemas de qualidade de energia, como variações estacionárias de tensão (quedas, interrupções e aumentos de tensão (quedas de tensão)), variações temporárias de tensão (oscilação), harmônicos, variações de frequência e baixo fator de potência (PINTO, 2013).

As turbinas eólicas, especialmente as máquinas indutivas, tendem a absorver a potência reativa do sistema e produzir um fator de potência baixo. Se as turbinas eólicas absorvem muita potência reativa, o sistema pode se tornar instável (USHER, 2019). Os principais problemas de qualidade da energia elétrica produzida por turbinas eólicas estão expressos na Tabela 1.

Tabela 1 - Resumo dos diferentes problemas relacionados à qualidade da energia

Característica	Descrição	Causa
Variações de tensão	Mudança do valor efetivo da tensão durante vários minutos ou mais	- Operações de mudança - Efeito Shadow Tower
Flicker	Flutuações de tensão em frequências entre 0,5 Hz e 30 Hz	- Falha na orientação do rotor - Efeito de cisalhamento - Variações da velocidade do vento
Harmônicas e inter-harmônicas	Flutuações de tensão em frequências entre 60 Hz e 2,5 kHz	- Conversores de frequência - Controladores tiristores - Capacitores
Fator de potência	Consumo de energia reativa	Componentes indutivos

Fonte: Adaptado de Heier (2014); Usher (2019)

A maneira pela qual a turbina eólica afeta localmente as tensões dos nós depende se turbinas de velocidade fixa ou variável são usadas. Em turbinas de velocidade fixa, existe uma relação fixa entre a velocidade do rotor, a potência ativa, a potência reativa e a tensão nos terminais. Como resultado, eles não podem afetar as tensões dos nós adaptando o intercâmbio de potência reativa com a rede (HEIER; 2014).

Por outro lado, turbinas de velocidade variável têm, pelo menos em teoria, a

capacidade de variar a potência reativa para afetar a tensão nos terminais; entretanto, na prática, depende dos conversores eletrônicos de potência utilizados. A cintilação é uma característica das turbinas eólicas (USHER, 2019).

A baixa qualidade de energia pode fazer com que o equipamento do usuário final opere de maneira ineficiente, ou seja, as luzes piscarão ou o sistema utilitário se tornará instável e interromperá a energia para o cliente. Vários fatores contribuem para a oscilação da tensão nos terminais de um gerador eólico: fenômenos aerodinâmicos (turbulência no vento, sombra da torre etc.), energia de curto-circuito no ponto de conexão, número de turbinas e tipos de sistemas de controle de turbinas eólicas (IRENA, 2019).

A distorção harmônica geralmente ocorre com turbinas de velocidade variável porque elas possuem eletrônica de potência, uma importante fonte de harmônicas. No entanto, nos casos de conversores eletrônicos de potência modernos com altas frequências de chaveamento e algoritmos de controle avançados e técnicas de filtragem, a distorção harmônica não seria um problema principal (SHAO; AGELIDIS, 2010).

As variações de frequência são produzidas quando existem diferenças no equilíbrio de energia entre a geração e a demanda. Variações da velocidade do vento, conexão e desconexão de turbinas eólicas causam diferenças na geração; tais diferenças podem, por sua vez, causar variações de frequência dependendo do sistema de potência. Se forem considerados sistemas isolados ou micro redes, os problemas introduzidos pela geração eólica na qualidade da energia são acentuados (PINTO, 2013).

Em particular, as variações de frequência são mais importantes nesses sistemas do que em sistemas fortemente interconectados. Além disso, nesses sistemas, as oscilações da energia eólica demandam mais das usinas de geração, responsáveis por fechar o equilíbrio de energia.

4.4 SOLUÇÕES REAIS BASEADAS NA GESTÃO DE ENERGIA EÓLICA

A gestão da energia eólica advém da estabilização da rede, da sua fiabilidade e do serviço uniforme para a energia fornecida. Essas três características ajudam a controlar a intermitência dessa fonte de energia e aumentar a taxa de penetração das turbinas eólicas. A abordagem tradicional de gerenciamento requer a adição de uma

usina complementar para garantir o fornecimento em todos os momentos (IRENA, 2019).

De acordo com Pinto (2013) essa solução consiste em compensar a intermitência da energia eólica com a produção por uma fonte mais controlável (hidrelétricas, termoelétricas a diesel etc.) ou pela conexão dessas turbinas às redes de alta tensão de transmissão e distribuição (é a solução mais comum) ou por conexão aos sistemas de armazenamento de energia para ter uma reserva adicional de energia e atuar como um sistema tampão entre o produtor e o consumidor.

4.5 GESTÃO DA GERAÇÃO EÓLICA PELA CONEXÃO DE USINAS EÓLICAS À REDE DE TRANSMISSÃO

Para funcionar adequadamente e produzir eletricidade, a maioria das turbinas eólicas requer uma rede poderosa que impõe a frequência e a tensão. Além disso, esta rede também deve ser capaz de fornecer a potência reativa necessária aos geradores assíncronos, por exemplo, e ser capaz de absorver continuamente a potência produzida pelas turbinas eólicas (HARISH; SANT, 2020).

Para as unidades de produção eólica, a interface com a rede inclui os equipamentos eletrônicos de potência. Em comparação com as centrais convencionais que utilizam máquinas rotativas síncronas ou assíncronas, apresentam novas possibilidades em termos de ajustes (USHER, 2019). Assim, as estratégias de controle relacionadas podem visar diretamente o ajuste da produção por um lado e a qualidade do serviço da rede por outro. A flexibilidade obtida por este tipo de ligação pode proporcionar ao gestor da rede diversos serviços, nomeadamente, conforme Heier (2014):

- o controle da potência ativa;
- a compensação da potência reativa;
- o fortalecimento da rede pelo controle local do valor efetivo da tensão; e
- um quadro geral, uma filtragem das perturbações introduzidas pelas cargas poluentes conectadas à porção considerada da rede.

Tudo isso é muito complexo de gerenciar porque a energia produzida pelas turbinas eólicas está flutuando devido aos caprichos do vento. Uma turbina eólica de 1 MW não pode produzir permanentemente esta potência nominal. Por este motivo, é

interessante interligar um grande número de turbinas eólicas em vários locais para ter uma produção estabilizada (efeito de profusão) (HEIER, 2014).

No entanto, as turbinas eólicas podem fornecer os serviços do sistema porque são equipadas com sistemas eletrônicos de potência. Além disso, é possível ajustar a saída de potência alterando o passo da lâmina. Se durante um período de vento forte houver um excesso de energia elétrica injetada na rede, o que pode desestabilizar a frequência, é possível limitar a energia produzida pelos aerogeradores. Este sistema é executado pela ação sobre o controle da parte eletrônica e do ângulo de passo da pá para reduzir o desempenho do rotor. Esta área de pesquisa é hoje estudada por diversos laboratórios para contribuir com soluções inovadoras e eficazes (CORKE; NELSON, 2018).

Além disso, a ação ao comando dos inversores associados ao gerador pode variar o valor da potência reativa produzida pelo parque eólico. Dependendo da cadeia de conversão escolhida, é possível absorver ou fornecer uma potência reativa e controlar o nível de tensão da rede.

O gerenciador da rede pode contar com a turbina eólica para auxiliá-la na correção do fator de potência da rede. Esta opção agora está incorporada na maioria das turbinas eólicas que usam máquinas de indução duplamente alimentadas. Se for um período sem vento, o operador da rede elétrica não pode contar com turbinas eólicas como fonte de energia elétrica com alguns dias de antecedência. Isso depende das condições meteorológicas e não muda nada quando a velocidade do vento diminui (COLMENAR-SANTOS et al., 2019).

Tradicionalmente, os operadores da rede administraram a variação da demanda na rede usando várias estratégias operacionais para equilibrar a carga com a capacidade de geração. No processo de equilibrar carga e produção, eles devem manter a frequência da rede dentro de padrões muito rígidos. Com o progresso da geração eólica, reservas adicionais de produção são necessárias para manter o desempenho do sistema dentro dos limites recomendados. Esta solução permite solucionar o problema devido ao impacto da geração eólica na operação da rede elétrica, analisando os custos de integração e balanceamento (BARROS et al., 2015).

Os estudos mais recentes mostraram que a capacidade de reserva necessária para integrar a energia eólica é menor do que o inicialmente esperado. No pior dos casos, pode chegar a 10% da capacidade nominal das usinas eólicas. Na maioria das vezes; está entre 3% e 5% desta potência (TOLMASQUIM, 2016; IRENA, 2019).

Para maior versatilidade e eficiência do sistema, deve-se armazenar a energia durante os períodos de alta velocidade do vento e restaurá-la quando não houver vento, ou então associar as turbinas eólicas a outras fontes de geração como geradores a diesel no caso de a rede autônoma para áreas remotas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os principais desafios técnicos e possíveis soluções associados à integração da energia eólica em sistemas de energia foram apresentados neste artigo. Os desafios incluem os efeitos da energia eólica no sistema de energia, o custo operacional do sistema de energia e a qualidade da energia.

Estudos realizados até o momento mostram que os impactos da energia eólica nos custos operacionais do sistema são pequenos em baixas penetrações do vento (cerca de 5% ou menos) e moderados em níveis de penetração mais elevados (cerca de 20%).

Para melhorar a integração da energia eólica aos sistemas de transmissão de energia deve-se utilizar equipamentos eletrônicos de potência para conectar as turbinas eólicas à rede elétrica. Assim, a energia eólica tem a possibilidade de participar na regulação da frequência e da tensão para manter a sua ligação à rede na presença de afundamentos de tensão.

Outro ponto de destaque é a necessidade de desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia de curto e longo prazo associadas a usinas eólicas além de desenvolvimento de sistemas híbridos, combinando a energia eólica com fontes convencionais ou outras fontes aleatórias, com uma gestão integrada e otimizada da energia.

Este estudo conclui que para garantir e manter a confiabilidade do desenvolvimento de energia eólica na rede, é importante acelerar os procedimentos para a construção de novas linhas e definir uma taxa mínima de estabilidade necessária para os operadores de parques eólicos.

REFERÊNCIAS

ABEEólica. Associação Brasileira de Energia Eólica. Fonte eólica deverá ter 24,2 GW de capacidade até 2024. **ABEEólica**, 15 de junho de 2020. Disponível em: <https://canalenergia.com.br/noticias/53137528/fonte-eolica-devera-ter-242-gw-de-capacidade-ate-2024>. Acesso em 17 out. 2020.

ANEEL. **Atlas de Energia Eólica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2003.

BARROS, Benjamim Ferreira de; BORELLI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo Luis. **Eficiência Energética**: técnicas de aproveitamento, gestão de recursos e fundamento. São Paulo: Érica, 2015.

BRASIL. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2018**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética/Ministério de Minas e Energia, 2019. Disponível em <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>. Acesso em 24 out. 2020.

BRASIL. **Atlas do potencial eólico brasileiro**. Brasília: MME, 2001.

COLMENAR-SANTOS, Antonio; ROSALES-ASENSIO, Enrique; BORGE-DIEZ, David (Editors). **Distributed wind energy generation**. New York: Nova, 2019.

CORKE, Thomas; NELSON, Robert. **Wind energy design**. Boca Raton: CRC Press, 2018.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Brasileiro Ano de 2018**: Relatório Final. Brasília: MME, 2018. Disponível em http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf. Acesso em 22 out. 2020.

EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017**: ano base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2017.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2019**: Relatório Final. Brasília: MME, 2019. Disponível em <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>. Acesso em 24 out. 2020.

EPE. **Potencial dos Recursos Energéticos no Horizonte 2050**. Rio de Janeiro: EPE, 2018.

FADIGAS, Eliane A. Faria Amaral. **Energia eólica**. Barueri, SP: Manole, 2011.

HEIER, Siegfried. **Grid integration of wind energy**. Third editon. West Sussex: John Wiley & Sons, 2014.

MOREIRA, José Roberto Simões; GRIMONI, José Aquiles Baesso; ROCHA, Marcelo da Silva. Energia e panorama energético. In: MOREIRA, José Roberto Simões (org.). **Energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019, p. 1-13.

PINTO, Milton de Oliveira. **Fundamentos de energia eólica**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

PRADO, Fernando Leme do. **Metodologia de Projetos**. São Paulo: Saraiva, 2011.

REIS, Lineu Belico dos; SANTOS, Eldis Camargo. **Energia elétrica e sustentabilidade**: aspectos tecnológicos, socioambientais e legais. 2a ed. Barueri, SP: Manole, 2014.

ROY, Anindita; BANDYOPADHYAY, Santanu. **Wind power based isolated energy systems**. Mumbai: Springer, 2019.

SANTOS, João Almeida. **Metodologia científica**. 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (coord.). **Energia Renovável**: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-172/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>. Acesso em 21 out. 2020.

USHER, Bruce. **Renewable Energy: A primer for the Twenty-first century**. New York: Columbia University Press, 2019.

ZAPAROLLI, Domingos. Ventos promissores a caminho. Fapesp Energia, ed. 275, jan. 2019. Disponível em <https://revistapesquisa.fapesp.br/2019/01/10/ventos-promissores-a-caminho/>. Acesso em 18 out. 2020.