

PROCEDIMENTOS DE REDE PARA A CONEXÃO DE FAZENDAS EÓLICAS

4.1 INTRODUÇÃO

O procedimento de rede é um documento elaborado pelo operador de um sistema elétrico no qual são especificadas as regras para acesso à rede de transmissão por parte de agentes geradores ou consumidores. No caso dos agentes geradores, o procedimento de conexão à rede de transmissão pode especificar equipamentos mínimos, estratégias de controle e comportamentos predeterminados durante perturbações para auxiliar a garantia da estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico como um todo.

No caso brasileiro, há alguns anos não havia procedimentos específicos para fazendas eólicas conectadas no sistema de transmissão pois esta fonte não era muito participativa na matriz energética. Nesse cenário, era permitido às fazendas eólicas que se desconectassem do sistema de transmissão durante uma perturbação e pouco efeito era observado no sistema. Contudo, com o crescimento exponencial da participação das eólicas, a sua desconexão durante perturbações pode ser muito impactante, pois a perda de geração de um grande bloco de energia pode agravar ainda mais o cenário podendo prolongar a perturbação ou até mesmo causar um blecaute.

A operação de sistemas elétricos com altos níveis de penetração de geração eólica impõe que haja procedimentos de rede, que consideram as características específicas da tecnologia de geração eólica e de sua interface com a rede elétrica por meio de eletrônica de potência. Com isso, é possível exigir a participação das fazendas eólicas no controle de tensão e no controle de frequência, melhorando assim a performance da rede frente a perturbações.

Neste capítulo são apresentados, de forma resumida, os procedimentos de rede para a conexão de fazendas eólicas no Brasil elaborados pelo Operador Nacional do Sistema e diretrizes dessa conexão em alguns outros sistemas elétricos ao redor do mundo. As particularidades de cada tecnologia de turbina eólica no atendimento dos procedimentos serão discutidas.

4.2 REQUISITOS TÉCNICOS PARA A CONEXÃO DE FAZENDAS EÓLICAS NO BRASIL

4.2.1 Histórico e Requisitos Técnicos

No ano de 2015, a ANEEL abriu uma consulta pública para obter contribuições para o aprimoramento dos procedimentos de rede relacionados ao planejamento, programação e operação em tempo real do Sistema Interligado Nacional (SIN).

A capacidade instalada de geração eólica naquele ano atingiria a marca de 8.700 MW, representando nível relevante para a operação. Além disso, a distribuição deste tipo usinas não é uniforme em todo o SIN, se concentrando principalmente nas regiões Sul e Nordeste. Portanto, era necessária a revisão dos requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão (submódulo 3.6 dos procedimentos de rede) para que refletissem as reais condições de operação do sistema.

Ao final de 2016, foi publicado o novo submódulo 3.6, vigente a partir de 01/01/2017 que incluiu uma nova subseção específica de requisitos mínimos para centrais geradoras eólicas e fotovoltaicas. Os requisitos atualizados incluíram a participação no controle de tensão, frequência e a injeção de corrente reativa durante curtos-circuitos.

O objetivo desta seção é apresentar uma visão dos requisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão específicos para centrais geradoras eólicas, como:

- Modos de controle (tensão, potência reativa e fator de potência);
- Geração/absorção de potência reativa;
- Operação em regime de tensão não nominal;
- Atendimento do fator de potência em regime de tensão não nominal;
- Potência ativa de saída após a recuperação de distúrbios no sistema;
- Operação em regime de frequência não nominal;
- Inércia Sintética de uma central geradora eólica;
- Participação no controle de sobrefrequência;
- Injeção de corrente reativa durante curto-circuito e curva de suportabilidade de tensão (*Low voltage Ride Through*);
- Harmônicos.

Além de destacar a importância no atendimento a estes requisitos para a operação em tempo real do sistema.

4.2.2 Modos de Controle

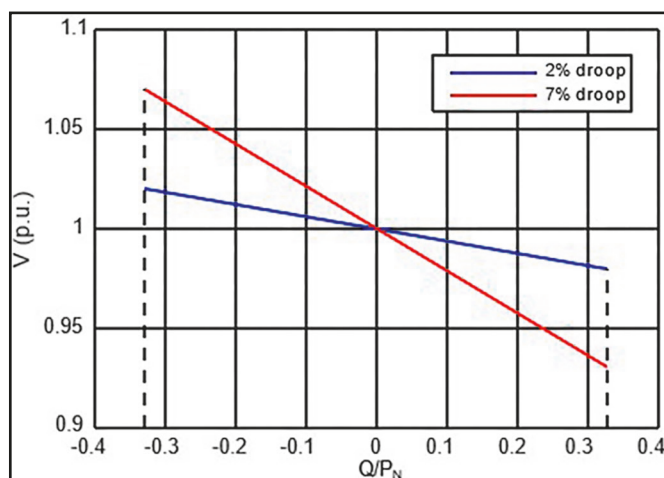
O ONS exige que a fazenda eólica seja capaz de operar nos três modos de controle a seguir:

- Controle de tensão;
- Controle de potência reativa;
- Controle de fator de potência.

O modo de controle considerado primário é o controle de tensão no barramento coletor ou ponto de conexão auxiliando a manutenção do perfil de tensão dentro dos limites aceitáveis durante a operação normal ou de emergência do sistema. Quando operando neste modo de controle a fazenda eólica deve ser capaz de prover um controle contínuo da tensão do barramento de conexão

sendo que a sua referência deve ser ajustável entre 0.95 e 1.05 pu de acordo com a necessidade do SIN. Além disso, deve possuir um controle do tipo droop (estatismo) ajustável na faixa de 2 a 7 % da potência reativa nominal¹ conforme mostrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 Controle de tensão no terminal coletor a partir da injeção/absorção de potência reativa



Na Figura 4.1 pode-se notar que conforme a tensão do sistema aumenta, a quantidade da potência reativa absorvida pelos geradores deve aumentar. Com esse consumo da potência reativa do sistema, a corrente reativa no sistema de transmissão diminui, levando a diminuições nos níveis de tensão. De forma oposta, quanto a tensão do sistema diminui, é demandado ao gerador eólico que injete potência reativa no sistema para que a corrente reativa aumente, aumentando assim os níveis de tensão. A inclinação do droop pode refletir uma necessidade do sistema: para droops maiores o sistema irá reagir mais lentamente com injeções de potência reativa menores para um desvio de tensão maior e para droops menores, o sistema irá reagir mais abruptamente com injeções de potência reativa maiores para um desvio de tensão menor.

Já os modos de controle de potência reativa e de fator de potência devem ser acionados pela fazenda eólica se requisitados pelo ONS. No modo de controle

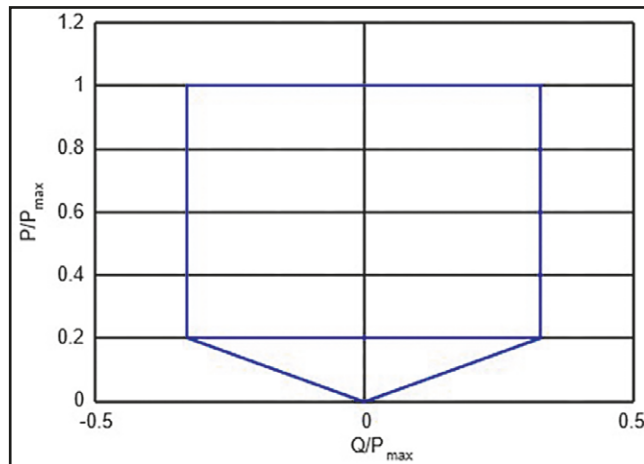
¹ A potência ativa nominal é calculada considerando que a central geradora opera a potência nominal e com fator de potência 0.95 (o valor de base, em outras palavras, é 32,9 % da potência nominal).

de potência reativa, a fazenda eólica deve ser capaz de injetar uma quantidade de potência reativa determinada pelo ONS. No modo de controle de fator de potência, o ONS demanda da fazenda eólica que controle o fator de potência em seu terminal coletor de acordo com o valor especificado.

4.2.3 Geração ou Absorção de Potência Reativa

O atual procedimento de rede exige uma participação efetiva das fazendas eólicas no controle de tensão. A região de operação exigida em regime permanente é mostrada na Figura 4.2. A fazenda eólica deve ser capaz (durante a operação em regime permanente da rede) de fornecer ou absorver potência reativa equivalente à operação em fator de potência na faixa de 0,95 capacitivo a 0,95 indutivo quando injetando 100 % da sua potência nominal na rede elétrica.

Figura 4.2 Operação em frequência não nominal.



Dito em outras palavras, a fazenda eólica deve ser capaz de injetar ou absorver até 32,9 % de sua capacidade instalada como potência reativa durante a operação normal do sistema para o auxílio no controle de tensão. Esta exigência deve ser cumprida quando a fazenda eólica estiver gerando pelo menos 20 % de sua capacidade instalada.

Quando gerando abaixo de 20 % de sua capacidade instalada, a fazenda eólica deve operar em todos os pontos dentro do triângulo destacado na Figura 4.2. Além disso, quando não estiver gerando potência ativa, o procedimento do

ONS prevê que a fazenda eólica possua recursos de controle para oferecer ao SIN a sua capacidade de injeção/absorção de potência reativa na faixa especificada. Na prática, o atendimento de todas as regiões especificadas na Figura 4.2 implica em um dimensionamento aproximadamente 6 % maior na potência aparente dos conversores de potência.

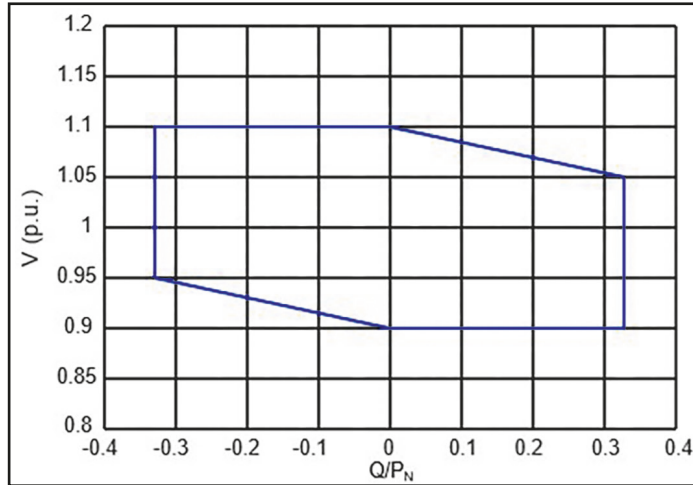
4.2.4 Operação em Regime de Tensão Não Nominal

O ONS, para evitar que as fazendas eólicas se desconectem em casos de variação de tensão do Sistema, exige a operação em algumas regiões de tensão fora das aceitáveis por um tempo mínimo. No caso de quedas de tensão, a operação entre 0,85 pu e 0,9 pu da tensão nominal deve ser mantida por um período mínimo de 5 segundos. Para o caso de problemas de sobretensão no sistema, a fazenda eólica deve ser capaz de operar por no mínimo 2,5 segundos entre 1,1 pu e 1,2 pu. Para a região entre as tensões especificadas (de 0,9 pu a 1,1 pu), a fazenda eólica deve ser capaz de operar ininterruptamente.

4.2.5 Atendimento do Fator de Potência em Regime de Tensão Não Nominal

O requisito para atendimento do fator de potência em regime de potência não nominal tem como objetivo garantir que a fazenda eólica seja capaz de atender os requisitos de fator de potência dentro da região descrita pela Figura 4.3. Conforme detalhado na seção 4.2.2, um dos possíveis modos de controle da fazenda eólica deve ser o de fator de potência. Assim, o requisito apresentado na presente seção visa garantir que mesmo em operação em tensão não nominal a fazenda eólica seja capaz de atender ao ONS e operar dentro da região de fator de potência especificada. Na Figura 4.3 considera-se que fazenda eólica está operando com injeção de potência ativa nominal.

Figura 4.3 Requisito para atendimento ao fator de potência na faixa operativa de tensão no ponto de conexão



Nota-se no canto inferior esquerdo que conforme a tensão diminui, a fazenda eólica precisa regular a sua absorção de potência reativa para evitar que a tensão do sistema se deteriore ainda mais. De maneira análoga, nota-se no canto superior direito da Figura 4.3 que conforme a tensão aumenta há uma demanda por diminuição da máxima injeção de potência reativa para evitar que o problema de sobretensão se deteriore ainda mais. Com isso, o ONS visa garantir o atendimento aos requisitos de fator de potência em todas as faixas de operação de tensão.

4.2.6 Potência Ativa de Saída Após a Recuperação de Distúrbios no Sistema

Este requisito tem como objetivo determinar o comportamento da potência de saída das fazendas eólicas após a recuperação de distúrbios no sistema, durante a operação em regime de tensão nominal e durante os regimes de frequência nominal e não nominal. Com o atendimento deste requisito, o benefício ao sistema é a garantia da adequada recuperação da potência de saída da fazenda eólica quando a tensão do sistema se recupera após um distúrbio e também garantir a disponibilidade de potência das fazendas eólicas em caso de subfrequência, de forma a evitar a desconexão de cargas através do Esquema Regional de Alívio de Cargas (ERAC).

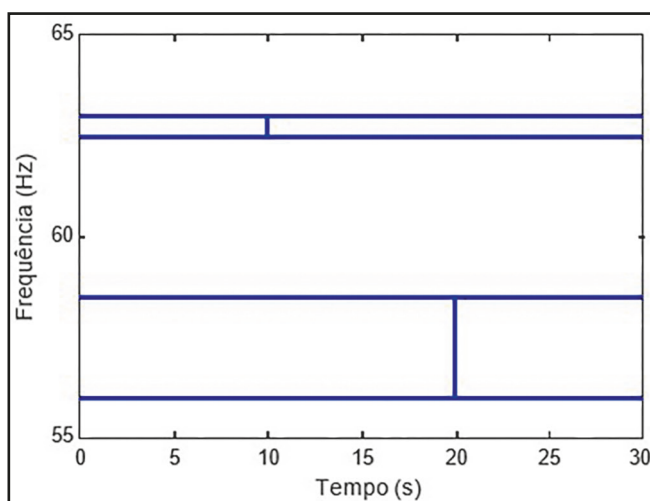
Após a recuperação de um distúrbio de tensão, considerada quando a tensão atinge pelo menos 85 % do seu valor nominal, a potência ativa de saída da fazenda eólica deve se reestabelecer a 85 % do valor que apresentava antes da ocorrência do distúrbio em quatro segundos. A rampa de recuperação da potência ativa de saída deverá ser definida pelo ONS de acordo com as características do sistema onde a fazenda eólica está inserida.

Já em relação aos regimes de frequência, este requisito determina que não é admitida redução na potência ativa de saída de uma fazenda eólica quando a frequência do sistema está no intervalo entre 58,5 Hz e 60,0 Hz operando dentro da faixa de tensão admissível de 0,9 pu e 1,1 pu. Em caso de quedas de frequência para o intervalo de 57,5 Hz e 58,0 Hz é admitida uma redução de 10 % da potência ativa de saída. Esta limitação na redução de potência em casos de subfrequências visa diminuir ou até mesmo evitar o corte de carga na atuação do ERAC.

4.2.7 Operação em Regime de Frequência Não Nominal

Para que o desligamento de geradores por subfrequência ou sobrefrequência seja minimizado em situações em que o sistema elétrico pode se recuperar por sua própria capacidade de regulação foi proposta a região de operação mostrada na Figura 4.4.

Figura 4.4 Operação em frequência não nominal



A Figura 4.4 detalha as regiões de operação do gerador eólico. A região considerada de operação normal é para frequências entre 58,5 e 62,5 Hz. Nesta região o gerador deve operar por tempo ilimitado. Em eventos de subfrequência entre 56 e 58,5 Hz, o gerador deve permanecer conectado à rede por até 20 segundos. Caso a duração da perturbação seja superior a este tempo, a desconexão do gerador é permitida. Já para eventos abaixo de 56 Hz, a desconexão imediata é permitida. Para eventos de sobrefrequência o gerador eólico deve operar na região entre 62,5 e 63 Hz por até 10 segundos sendo que acima desta duração a desconexão é permitida. Caso a frequência ultrapasse os 63 Hz a desconexão imediata é permitida ao gerador.

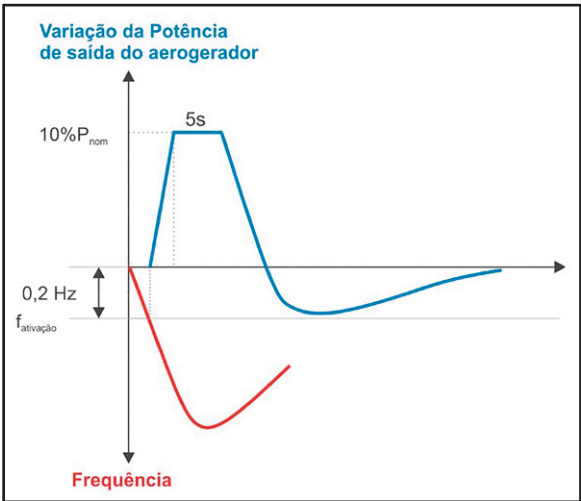
4.2.8 Inércia Sintética de uma Central Geradora Eólica

Este requisito do procedimento de rede visa estabelecer a contribuição das fazendas eólicas para o controle de frequência do SIN em eventos de subfrequência através da emulação de inércia (inércia sintética) de forma a não comprometer seu ponto ótimo de operação. O requisito descrito nesta seção aplica-se a todas as turbinas eólicas de fazendas com capacidade instalada superior a 10 MW.

Na ocorrência de um regime de subfrequência quando o desvio de frequência é superior a 0,2 Hz, a fazenda eólica deve contribuir com pelo menos 10 % da sua potência ativa nominal por no mínimo 5 segundos. Esta contribuição pode ser retirada automaticamente caso a frequência retorne para o seu valor nominal. A fazenda eólica deve injetar a sua contribuição de potência em uma rampa preestabelecida de 0,8 pu de potência ativa para cada 1 Hz de desvio de frequência.

Esta provisão de inércia sintética deverá ser atendida pela fazenda eólica quando a potência ativa de saída da turbina eólica for maior ou igual a 25 % da sua potência nominal. O operador da fazenda eólica deverá informar ao ONS qual é o tempo máximo de sustentação do provimento do valor adicional de 10 % da potência nominal para pontos de operação de potência de saída inferiores a 25 % da potência nominal.

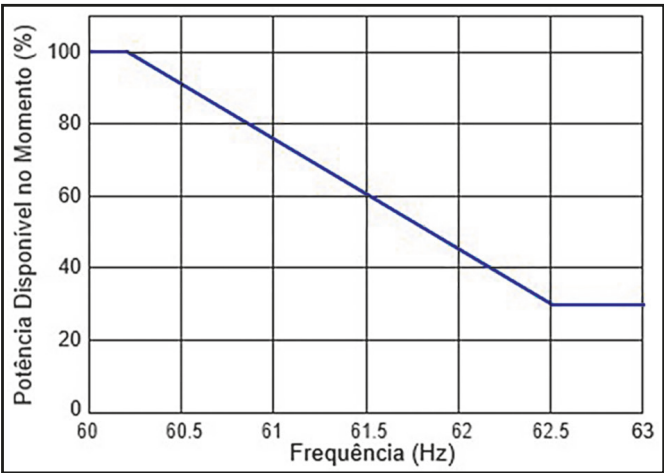
Figura 4.5 Comportamento da potência ativa de saída de uma turbina eólica durante um evento de subfrequência



4.2.9 Participação no Controle de Sobrefrequência

Este requisito visa estabelecer o comportamento das fazendas eólicas com capacidade instalada maior do que 10 MW durante os eventos de sobrefrequência para que contribuam na recuperação do sistema. O sistema de controle das fazendas eólicas deve ser sensível à variação da frequência e promover a redução da potência ativa disponível naquele momento conforme mostrado na Figura 4.6.

Figura 4.6 Comportamento em caso de sobrefrequência



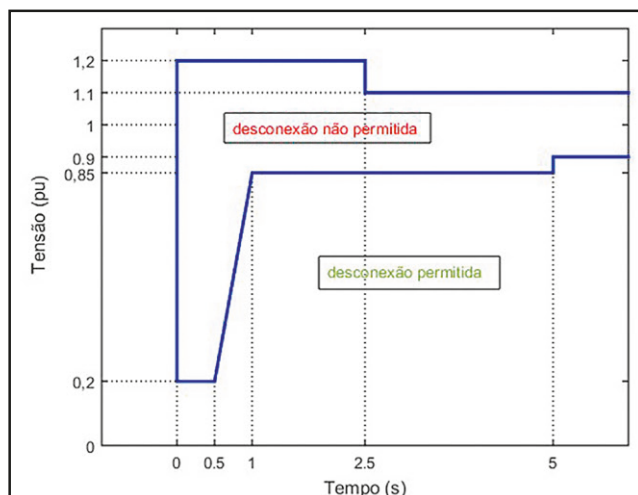
O comportamento descrito na Figura 4.6 corresponde a uma redução proporcional de 3 % da potência ativa disponível no momento para cada 0,1 Hz de desvio. Este controle deverá atuar quando a frequência se encontrar no intervalo de 60,2 Hz a 62,5 Hz.

4.2.10 Injeção de Corrente Reativa Durante Curto-Circuito e Curva de Suportabilidade de Tensão (*Low Voltage Ride Through*)

Os requisitos de operação na região de tensões consideradas de regime permanente foram mostrados anteriormente nesta seção, ou seja, em condições em que a tensão não varia rapidamente. Para complementar estes requisitos, esta seção descreve os requisitos para situações em que a tensão varia rapidamente. Uma típica situação que faz com que a tensão do sistema elétrico caia rapidamente é o curto-circuito. Porém, existem eventos (como rejeição de carga) que podem elevar a tensão do sistema rapidamente.

Para que as fazendas eólicas possam contribuir ativamente para a recuperação do sistema elétrico, o ONS estabelece tempos mínimos de conexão de acordo com a severidade da queda (ou elevação de tensão) durante um distúrbio à rede elétrica. Os tempos mínimos podem ser vistos na Figura 4.7 conhecida como a curva de suportabilidade de tensão, ou curva de *Low Voltage Ride Through* (LVRT).

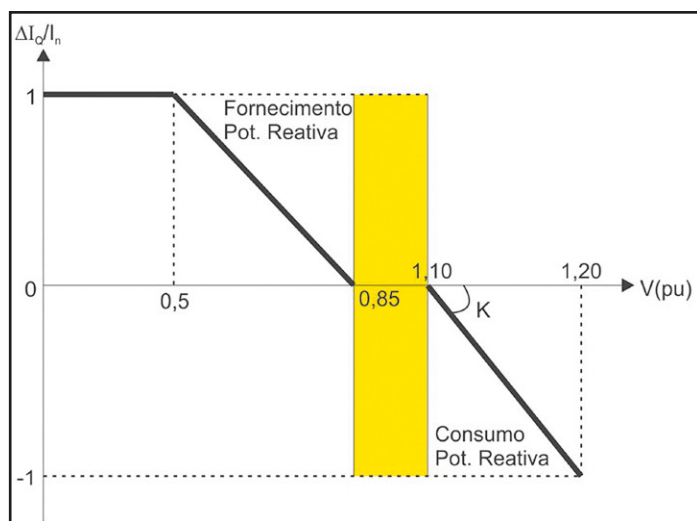
Figura 4.7 Curva de suportabilidade de tensão durante distúrbios para fazendas eólicas conectadas ao sistema de transmissão



A curva de LVRT mostra que, por exemplo, para um distúrbio que cause uma redução para 0,2 pu na tensão do terminal de conexão da fazenda eólica exige um tempo mínimo de permanência da conexão de 0,5 segundos. Após decorrido este tempo, é permitido que a fazenda eólica se desconecte do sistema. Pode-se verificar que a curva também mostra os tempos de conexão mínimos descritos na subseção 4.2.3, além das regiões nas quais a fazenda eólica deve operar continuamente.

Para auxiliar na recuperação do sistema devido aos distúrbios na tensão, a fazenda eólica além de permanecer conectada pelos tempos mínimos estabelecidos pela curva de LVRT deve ser capaz de injetar ou consumir corrente reativa do sistema conforme detalhado pela Figura 4.8. No eixo das ordenadas, ΔI_Q indica a variação de corrente reativa, ou seja, a diferença entre a corrente reativa que deve ser injetada no sistema e a corrente reativa que era injetada previamente ao distúrbio e I_N indica a corrente nominal do conversor.

Figura 4.8 Especificação de injeção de corrente reativa durante distúrbios de tensão



Conforme pode ser visto na Figura 4.8, a fazenda eólica deverá fornecer corrente reativa para o sistema quando a tensão no terminal de conexão for inferior a 0,85 pu e fornecer uma relação $\Delta I_Q / I_N$ de 1 quando a tensão cair abaixo de 0,5 pu. Já o consumo de corrente reativa do sistema deve ocorrer quando a tensão terminal se encontrar entre 1,1 pu e 1,2 pu, a partir de uma rampa com ganho K . No intervalo de tensão de 0,85 pu a 1,1 pu a fazenda eólica não é requisitada a

injetar corrente reativa adicional (além daquela já provida para casos de controle de fator de potência não unitário ou no controle de potência reativa).

O ONS determina que o sistema de controle de injeção de corrente reativa deve ter sensibilidade para começar atuar em até 30 ms (milissegundos) após detectado o distúrbio. Já em relação ao controle de consumo de corrente reativa, o ONS deverá instruir a ativação do recurso pela fazenda eólica e definir o valor de K para especificar a rampa de consumo de corrente reativa.

4.3 PROCEDIMENTOS DE REDE ADOTADOS NA EUROPA

Esta seção visa apresentar os procedimentos de rede específicos para fazendas eólicas adotados na Europa. Sob a bandeira da União Europeia, foi fundada a Rede Europeia de Gestores de Redes de Transporte de Eletricidade (ENTSO-E) com o objetivo de harmonizar os diferentes requisitos de redes praticados pelos 43 operadores de redes de transmissão de energia elétrica nos 36 países da Europa.

Atualmente, os sistemas europeus encontram-se em uma transição e a tendência é que todos os operadores da Europa adotem as normas propostas pelo ENTSO-E.

Esta seção está baseada em (Nycander & Söder, 2018) e apresenta os procedimentos de rede aplicados na Dinamarca, Irlanda e Irlanda do Norte, Reino Unido, Alemanha (específico para offshore para comparação) e guias do ENTSO-E.

Os respectivos operadores, os anos nos quais os procedimentos de rede foram aprovados e as siglas utilizadas no decorrer desta seção são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Operadores de sistemas elétricos europeus

Sistema	País	Ano	Sigla Utilizada
Energinet	Dinamarca	2016	DK
Eirgrid	Irlanda e Irlanda do Norte	2015	EIR
National Grid	Reino Unido	2018	NG
TenneT *	Alemanha	2017	OFF

* Este procedimento de rede (prévio) é exclusivo para fazendas eólicas offshore conectadas à rede elétrica.

Vale frisar que os operadores EIR e NG operam redes elétricas isoladas.

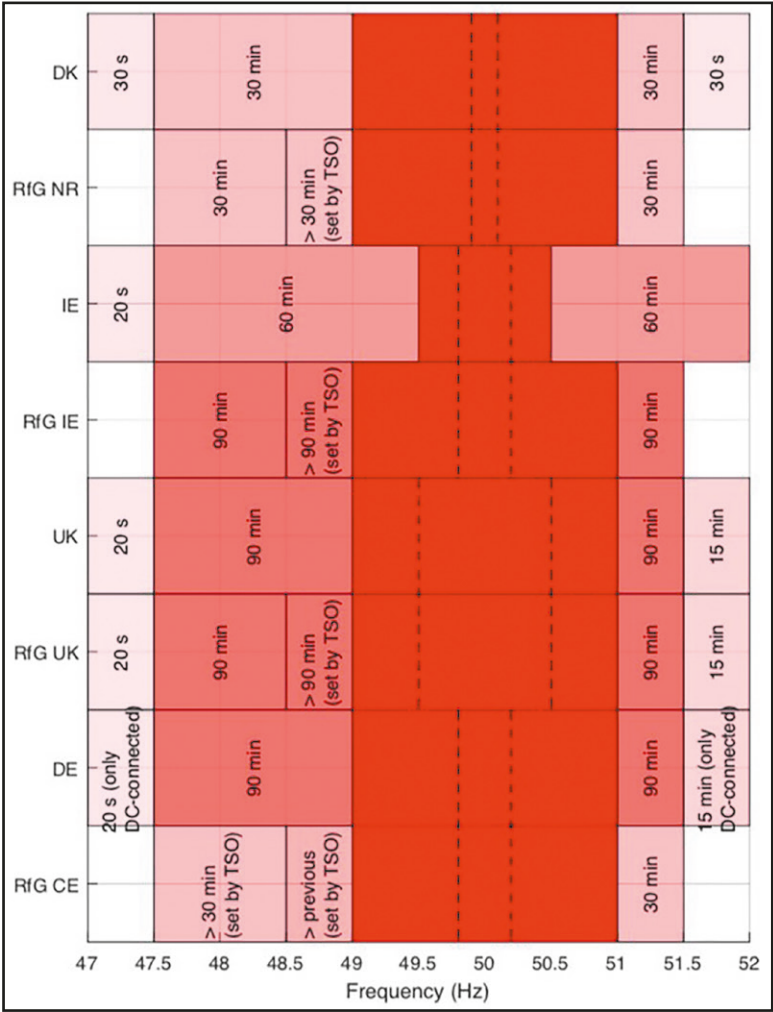
4.3.1 Operação em Regime de Frequência Não Nominal

Os sistemas elétricos europeus aqui descritos operam na frequência nominal de 50 Hz. Todos os operadores destes sistemas (exceto EIR) requerem que as fazendas eólicas operem ininterruptamente nas faixas de frequência de 49 Hz a 51 Hz, o que equivale a um desvio de frequência de 2 % da nominal. O operador EIR requer a operação ininterrupta das fazendas eólicas numa faixa mais estreita de frequência, correspondente a um desvio de apenas 1 %, ou seja, na faixa de 49,5 Hz a 50,5 Hz. O requisito proposto pelo ENTSO-E visa uniformizar as regiões normais de operação nas faixas de frequência de 49 Hz a 51 Hz para todos os operadores na Europa.

No caso da operação em subfrequência, os operadores OFF e NG requerem uma operação mínima na faixa de 47,5 Hz a 49 Hz de 90 minutos e o operador DK, por 30 minutos. O operador EIR requer uma operação mínima na faixa de 47,5 Hz a 49,5 Hz por 60 minutos. Em caso de frequências inferiores a 47 Hz, todos os operadores requerem uma operação mínima de 20 segundos, exceto DK, que requer pelo menos 30 segundos de operação pela fazenda eólica.

No caso da operação em sobrefrequência, todos os operadores requerem uma operação na faixa de 51 Hz a 51,5 Hz por tempos mínimos de 90 minutos (OFF e NG) e 30 minutos (DK). O operador EIR requer uma operação por tempo mínimo de 60 minutos numa faixa estendida de 50,5 Hz a 52 Hz. Os operadores NG e OFF também requerem uma conexão por no mínimo 15 minutos em frequências na faixa de 51,5 Hz a 52 Hz enquanto o DK, requer por apenas 30 segundos. Os tempos mínimos de conexão exigidos são resumidos na Figura 4.9.

Figura 4.9 Tempos mínimos de conexão para diferentes faixas de frequência



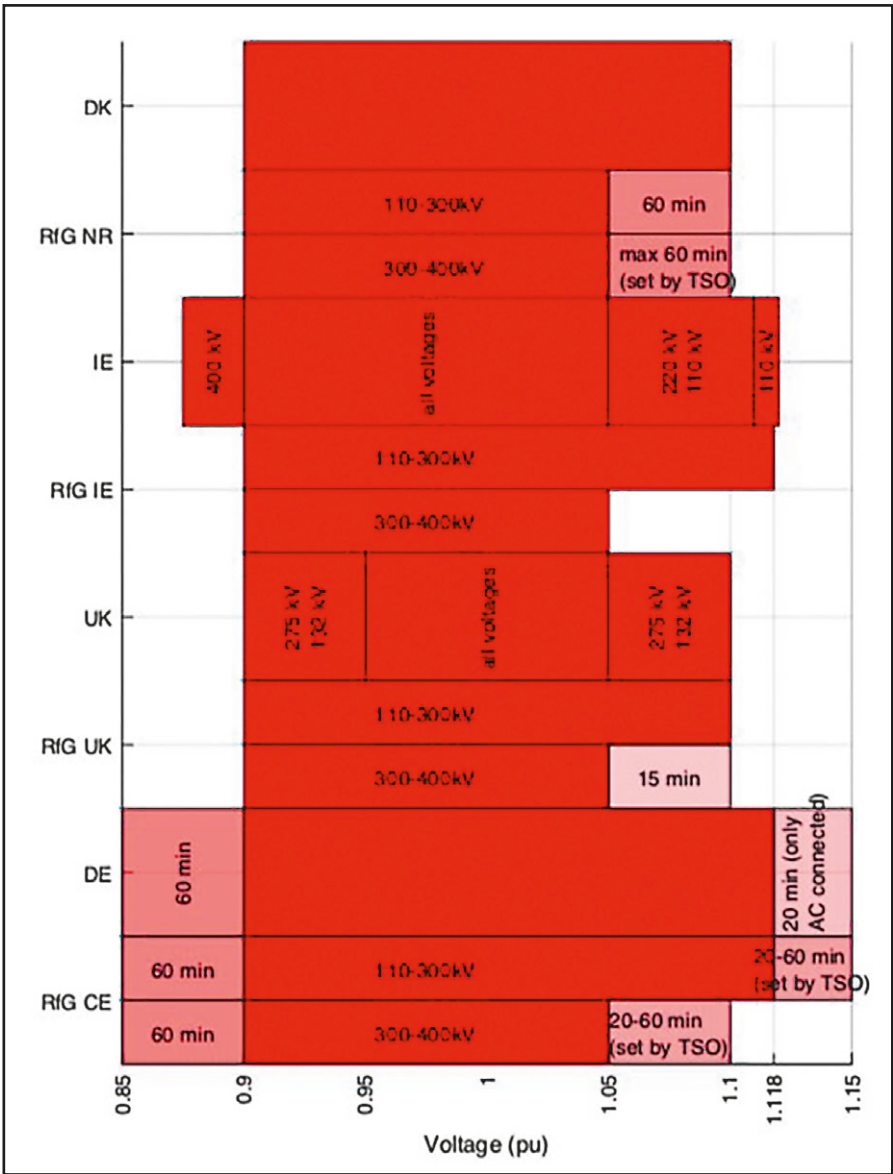
O ENTSO-E propõe tempos mínimos de funcionamento em eventos de subfrequência e sobrefrequência para cada operador regional para o atendimento das particularidades de cada sistema elétrico. A grande diferença encontra-se na uniformização da faixa de frequência considerada como operação normal.

4.3.2 Operação em Regime de Tensão Não Nominal

Os operadores EIR e DK (para linhas entre 300 e 400 kV) requerem uma operação contínua das fazendas eólicas na faixa de tensão de 0,9 pu a 1,1 pu.

Dependendo da faixa de tensão da linha na qual a fazenda eólica está conectada pode existir um tempo mínimo para que ela permaneça conectada ao sistema em caso de subtensão ou em caso de sobretensão. Os tempos mínimos de conexão relacionados às tensões nominais das linhas e os respectivos operadores são mostrados na Figura 4.10.

Figura 4.10 Faixas de operação de tensão para fazendas eólicas definidas por operadores do sistema



Assim como ocorre para o regime de operação de frequência não nominal, o ENTSO-E prevê regras de operação em regime de tensão não nominal a fim de uniformizar os critérios adotados pelos operadores regionais. Os tempos mínimos de conexão durante regimes não nominais variam de região a região a fim de respeitar as particularidades de cada sistema elétrico.

4.3.3 Participação no Controle de Frequência

Os procedimentos de rede definidos pelo ENTSO-E envolvem três modos de controle de frequência: o modo sensível de variações de subfrequência e de sobrefrequência limitados e o modo sensível a variações de frequência. Os modos limitados devem ser atendidos por fazendas eólicas pequenas e não envolve a necessidade de reserva de energia enquanto o modo sensível a variações de frequência prevê a necessidade de reserva de energia, obrigando as fazendas eólicas a trabalharem em pontos de operação abaixo da potência disponível no momento. Estes modos de controle de frequência já foram adotados pelos operadores NG e OFF. Os demais operadores adotam critérios próprios, mas a tendência é que migrem para versões adaptadas do procedimento especificado pelo ENTSO-E.

O modo sensível de variações de subfrequência, (*Limited Frequency Sensivity Mode for Over-frequencies*, LFSM-O) é um modo de controle que deve ser acionado quando a frequência está na faixa de 50,2 Hz a 50,5 Hz que demanda uma resposta dentro do intervalo de 30 segundos de um droop de frequência na faixa de 2 % a 12 %. Já o modo sensível de variações de sobrefrequência (*Limited Frequency Sensivity Mode for Under-frequencies*, LFSM-U), deve ser acionado na faixa de 49,5 Hz a 49,8 Hz e demanda uma resposta dentro do intervalo de 30 segundos também de um droop de frequência na faixa de 2 % a 12 %. Os modos LFSM-O e LFSM-U já foram adotados pelos operadores NG e OFF. O operador NG adotou o LFSM-O a partir de 50,4 Hz com valor do droop de frequência de 10 % e o LFSM-U a partir de 49,5 Hz com o mesmo valor de droop. O atendimento a estes requisitos pelos operadores NG e OFF são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Atendimento dos controles de frequência LFSM-O e LFSM-U pelos operadores NG e OFF

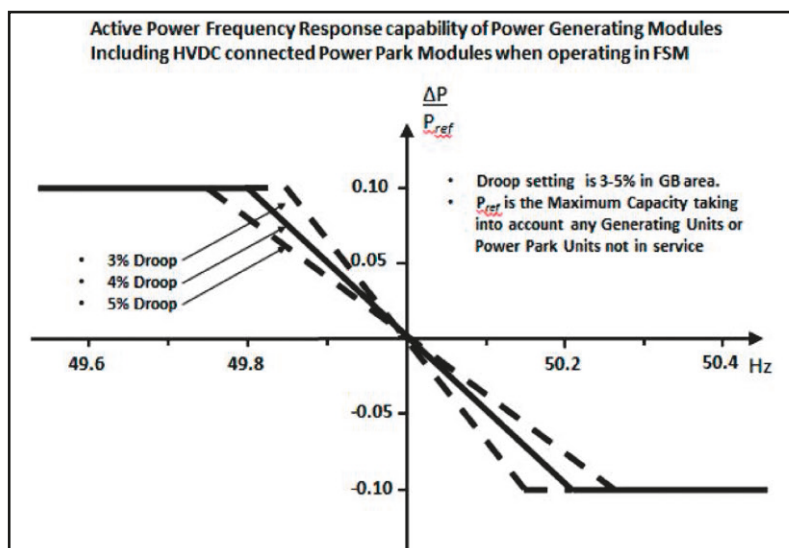
Operador	Lim. LFSM-O	Droop LFSM-O	Lim. LFSM-U	Droop LFSM-U
NG	50,4 Hz	10 %	49,5 Hz	10 %
OFF	50,2 Hz	5 %	49,8 Hz	2 %

O modo sensível a variações de frequência (*Frequency Sensitive Mode*, FSM) exigido para as grandes fazendas eólicas previsto pelo ENTSO-E prevê o suporte tanto para sobrefrequência e subfrequência. Ele instaura uma banda morta de 0 Hz a 0,5 Hz, intervalo no qual a fazenda eólica não precisa contribuir ao controle de frequência e a demanda de um droop de frequência na faixa de 2 % a 12 % fora da banda morta dentro de um intervalo de 30 segundos. Além disso, este modo de controle prevê a necessidade de reservas de 1,5 % a 10 % da potência disponível no momento, o que obriga as fazendas eólicas a operarem abaixo do seu ponto de máxima potência quando este requisito é adotado.

O FSM foi adotado pelo operador NG sem a adoção de banda morta (ou seja, uma banda morta de 0 Hz) e com droop de frequência na faixa de 3 % a 5 %. O gráfico mostrado na Figura 4.11 mostra o comportamento do controle da potência ativa para atender ao FSM. Além disso, o operador NG adotou 10 % como o valor de reserva de potência. Já o operador OFF adotou banda morta de 0,2 Hz, um droop de frequência fixo de 6 % e reserva de potência de 2 %.

Os demais operadores aqui tratados ainda não convergiram para a proposição de requisitos semelhantes aos propostos pelo ENTSO-E. Porém, como a tendência é que estes operadores adaptem os seus requisitos mínimos de rede para as diretrizes do ENTSO-E eles não serão detalhados nesta subseção.

Figura 4.11 Atendimento ao FSM proposto pelo ENTSO-E no Reino Unido (Nycander, 2018)

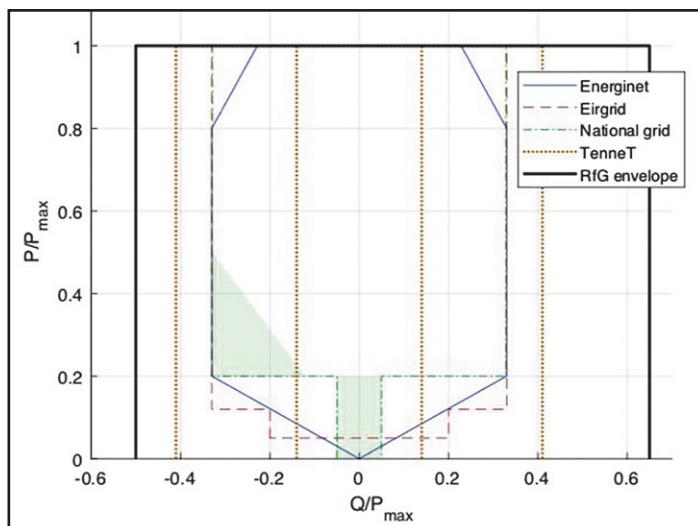


4.3.4 Controle de Potência Reativa e Tensão

O controle de potência reativa e tensão previsto nos procedimentos de rede expostos nesta seção possuem três modos: controle de tensão terminal, controle de fator de potência e controle de potência reativa. Assim como previsto no procedimento de rede brasileiro, o controle de tensão terminal visa controlar a tensão no ponto no qual a fazenda eólica é conectada e deve receber um valor de referência do operador da rede e atuar com um droop de tensão em uma faixa pré-especificada. O controle de fator de potência visa manter um fator de potência constante no ponto de conexão da fazenda eólica, controlando a injeção de potência reativa de forma proporcional à potência ativa. Por fim, o controle de potência reativa tem como objetivo injetar/absorver uma quantidade solicitada de potência reativa independentemente da quantidade de potência ativa que é injetada no sistema elétrico.

Os perfis de potência reativa para as fazendas eólicas conectadas a sistemas de transmissão na Europa são mostrados na Figura 4.12. Pode-se notar que com a exceção do operador OFF, todos os demais requerem a operação em fator de potência na faixa 0,95 capacitivo a 0,95 indutivo, assim como no Brasil. Nestes casos, como visto anteriormente, a injeção de potência reativa máxima é de 32,9 % da potência ativa nominal da fazenda eólica. Os operadores vistos, novamente com exceção de OFF requerem menor injeção de potência reativa em pontos de operação de baixa injeção de potência ativa.

Figura 4.12 Requisitos de perfil de potência reativa em tensão nominal especificados pelos operadores de sistemas europeus

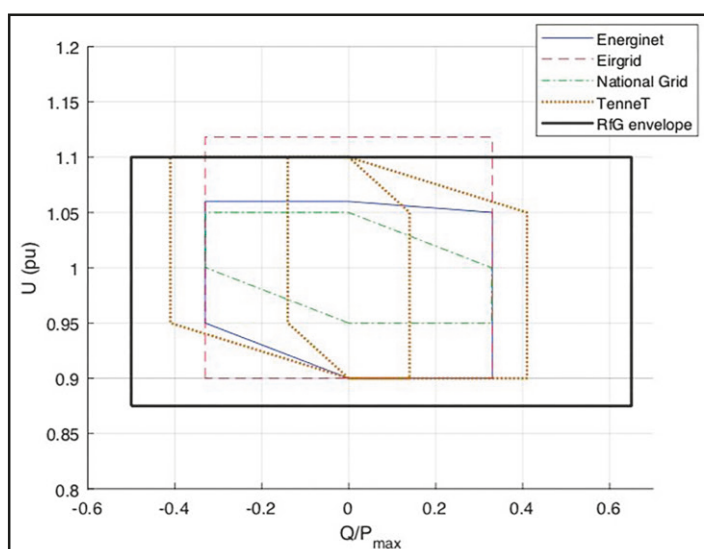


O operador OFF, exceção nos dois casos tratados, exige uma injeção/absorção mínima de potência ativa de 14 % da potência ativa nominal. Esse valor corresponde à operação mínima com um fator de potência 0,99 capacitivo ou indutivo. Em termos de valores máximos (em módulo), a exigência deste operador é de 41 % da potência ativa nominal, o que corresponde a uma operação com fator de potência entre 0,925 capacitivo e indutivo. Ressalta-se que o operador OFF lida exclusivamente com fazendas eólicas offshore.

O ENTSO-E especifica uma região chamada de envelope. Cada sistema regional pode especificar o seu próprio perfil de potência reativa em tensão nominal desde que dentro desta área, observando as características próprias de seu sistema elétrico. Nota-se que todos os operadores mostrados já obedecem ao critério proposto pelo ENTSO-E.

Os operadores europeus, assim como o ONS, especificam um perfil de potência reativa em função da tensão da rede. O objetivo deste perfil é garantir que a fazenda eólica possa injetar/absorver potência reativa em situações em que o sistema necessite de suporte para controlar a tensão. Os perfis estabelecidos pelos operadores discutidos nesta seção são mostrados na Figura 4.13. Assim como ocorre para o perfil de potência reativa em potência ativa nominal, o ENTSO-E também estabelece um envelope dentro do qual os operadores regionais podem estabelecer os seus próprios requisitos.

Figura 4.13 Requisitos de perfil de potência reativa em potência ativa nominal especificados pelos operadores de sistemas europeus



Na última atualização do procedimento de rede do operador EIR, o seu requisito de perfil de potência reativa em potência nominal encontra-se fora do envelope proposto pelo ENTSO-E. Neste caso, se o operador desejar atualizar o requisito, a atualização será no sentido de abrandá-lo e assim não trará consigo eventuais custos de *retrofitting*.

Por fim, as particularidades do controle de tensão do terminal de conexão exigidos pelos operadores são mostradas na Tabela 4.3. Os parâmetros para o modo de controle de tensão do ponto de conexão especificados pelo ENTSO-E são: faixa de referência, droop, banda e velocidade de regulação. A partir destes dados o comportamento do controle de tensão, como o que é descrito pelo ONS na Figura 4.1, pode ser construído.

Tabela 4.3 Especificação do controle droop de tensão para os operadores europeus

Operador	Faixa de Referência	Droop	Banda	Velocidade de Regulação
ENTSO-E	0,95 pu a 1,05 pu	2 % a 7 %		90 % em 1 s a 5 s
DK	-	-	Não	60 s
EIR	-	1 % a 10 %	Não	90 % em 1 s
NG	0,95 pu a 1,05 pu	2 % a 7 %	Não	5 s
OFF	0,95 pu a 1,05 pu	2 % a 5 %	Não	90 % em 5 s

Na Tabela 4.3, o parâmetro faixa de referência é o intervalo de valores que o controlador de tensão deve ser capaz de receber como referência; o parâmetro droop refere-se à inclinação da curva, em outras palavras, à intensidade da reação do controle de tensão; a banda refere-se à existência ou não de uma banda morta. A banda morta é um intervalo no qual o controle de tensão permanece inerte. Por fim, a velocidade de regulação específica em quanto tempo o controle deve ser capaz de restaurar a tensão a pelo menos 90 % do valor de referência dentro do tempo especificado. Por exemplo, o ENTSO-E recomenda que a exigência dos operadores regionais seja de recuperar a tensão a pelo menos 90 % do valor de referência dentro de 1 a 5 segundos.

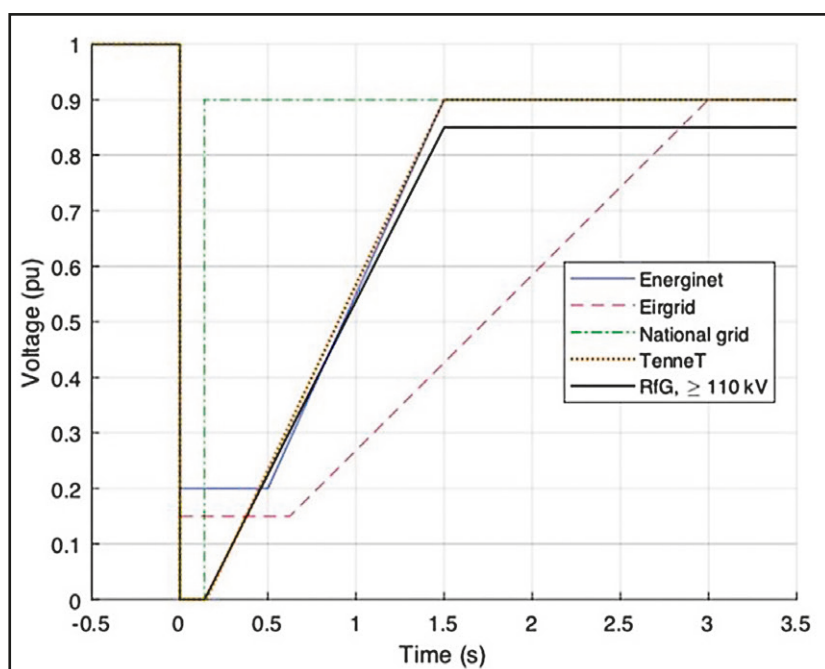
4.3.5 Operação Durante Distúrbios de Tensão

De forma semelhante ao ONS, os operadores de redes de transmissão europeus também exigem que as fazendas eólicas permaneçam conectadas por tempos mínimos durante perturbações de tensão. Este tempo mínimo é necessário para

evitar que o distúrbio se agrave ainda mais agora que as fazendas eólicas são parte significativa na geração.

As curvas de suportabilidade de tensão para fazendas eólicas praticadas pelos operadores europeus e a curva sugerida pelo ENTSO-E para uma harmonização dos requisitos entre os operadores regionais são mostradas na Figura 4.14. Pode-se notar entre os requisitos mostrados que o operador EIR é o mais severo em termos de tempo mínimo de conexão. Também vale notar que o operador NG exige um suporte apenas nos instantes iniciais de um curto-circuito, e, após esses instantes, permite a desconexão das fazendas eólicas.

Figura 4.14 Curva de suportabilidade de tensão dos operadores regionais de sistemas de transmissão europeus



O requisito proposto pelo ENTSO-E é também visto aqui como um envelope que deve conter as respostas dos operadores regionais europeus. Este envelope torna mais rígido os critérios exigidos pela maioria dos operadores vistos nesta seção.

A participação no curto-circuito passa a ser exigida por tempos semelhantes aos já praticados por alguns operadores e o nível de tensão para desconexão após 1,5 segundos de distúrbio diminui, forçando que as fazendas eólicas

sejam capazes de permanecer conectadas a tensões terminais mais baixas por longos intervalos.

4.4 PROCEDIMENTOS DE REDE DO ERCOT

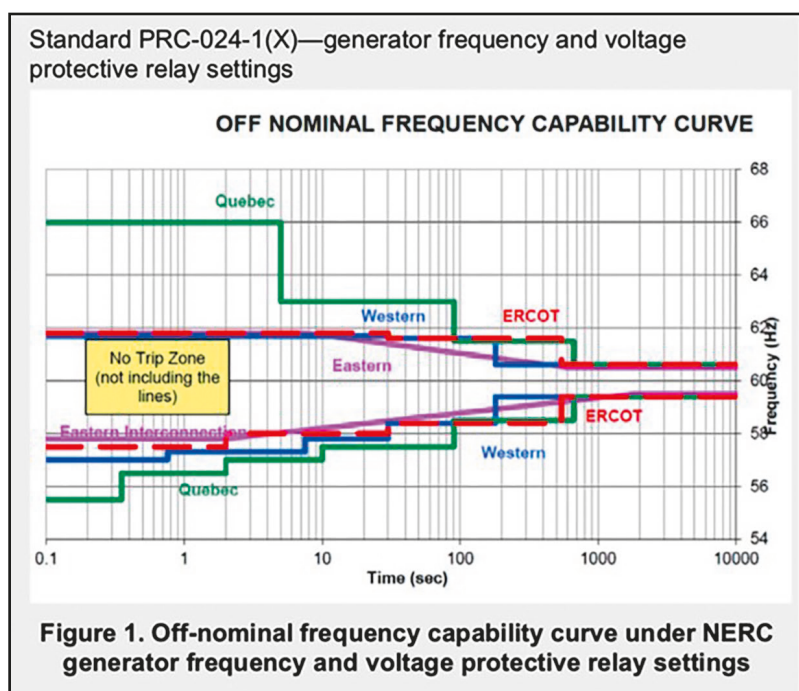
Nesta seção serão apresentados os procedimentos de rede para fazendas eólicas praticados pelo operador regional do Texas (ERCOT) nos Estados Unidos.

Os procedimentos de rede deste operador aplicam-se a centrais geradoras com capacidades instaladas superiores a 20 MW. Os requisitos para controle de potência ativa e reativa, atendimento a fator de potência, controle de tensão, participação no controle de frequência, suportabilidade de tensão e tempos mínimos de conexão em distintos de regime de frequência que serão apresentados nas próximas subseções.

4.4.1 Operação em Regime de Frequência Não Nominal

Os tempos mínimos antes da permissão de desconexão pelo ERCOT podem ser resumidos na curva de suportabilidade de frequência mostrada na Figura 4.15. O ERCOT requer que as fazendas eólicas operem ininterruptamente na faixa de frequência de 59,4 Hz a 60,6 Hz, o que configura uma banda de 1 % da frequência nominal do sistema elétrico (60 Hz). Quando da ocorrência de sobrefrequências, o ERCOT exige uma operação por tempo mínimo de 540 segundos (nove minutos) quando na faixa de frequência de 60,6 Hz a 61,6 Hz. Já na faixa de frequências de 61,6 Hz a 61,8 Hz, a operação é exigida por no mínimo 30 segundos. Quando a frequência ultrapassa o valor de 61,8 Hz, é permitida a desconexão instantânea da fazenda eólica.

Figura 4.15 Curva de suportabilidade de frequência exigida pelo ERCOT



Para as condições de operação de subfrequências, o ERCOT exige que a fazenda eólica opere por um tempo mínimo de 540 segundos na faixa de 58,4 Hz a 59,4 Hz. Para a faixa de frequências de 58,0 a 58,4 Hz a exigência mínima é de 30 segundos antes da desconexão. Na faixa de 57,5 a 58,0 Hz o tempo mínimo antes da desconexão exigido é de 2 segundos. Por fim, para frequências menores ou iguais a 57,5 Hz é permitido à fazenda eólica que se desconecte imediatamente do sistema.

4.4.2 Participação no Controle de Frequência

O ERCOT exige que as fazendas eólicas sejam capazes de fornecer um suporte semelhante aos governadores de geradores convencionais o que equivale a um droop de 5 % com uma banda morta que deve ser de acesso do operador para eventuais ajustes.

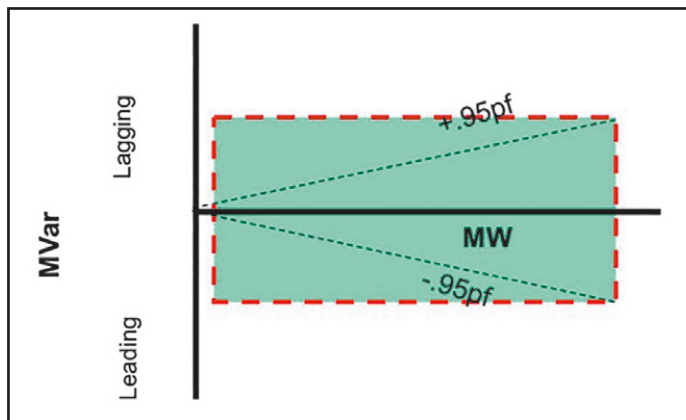
4.4.3 Controle de Potência Ativa

Para melhor controle da frequência do sistema como um todo, começando no ano de 2009 o ERCOT passou a exigir uma limitação da variação da potência de saída de usinas com base em recursos variáveis. O limite estabelecido para a variação da potência de saída foi de 20 % da potência nominal do empreendimento por minuto, o que permite que o operador tenha um maior tempo de reação para atuar em eventuais perturbações de frequência que ocorram exclusivamente devido à variabilidade do recurso eólico.

4.4.4 Controle de Potência Reativa e Tensão

Para o auxílio no controle de tensão do sistema é exigido que as fazendas eólicas conectadas no ERCOT forneçam suporte de potência reativa. A capacidade deste suporte deve ser o equivalente à operação com fator de potência na faixa de 0,95 capacitivo a 0,95 indutivo e deve estar disponível sempre que a potência ativa de saída for superior a 10 % da potência nominal do empreendimento. O perfil de potência reativa em tensão nominal especificado pelo ERCOT é mostrado na Figura 4.16.

Figura 4.16 Perfil de potência reativa em tensão nominal exigido pelo ERCOT

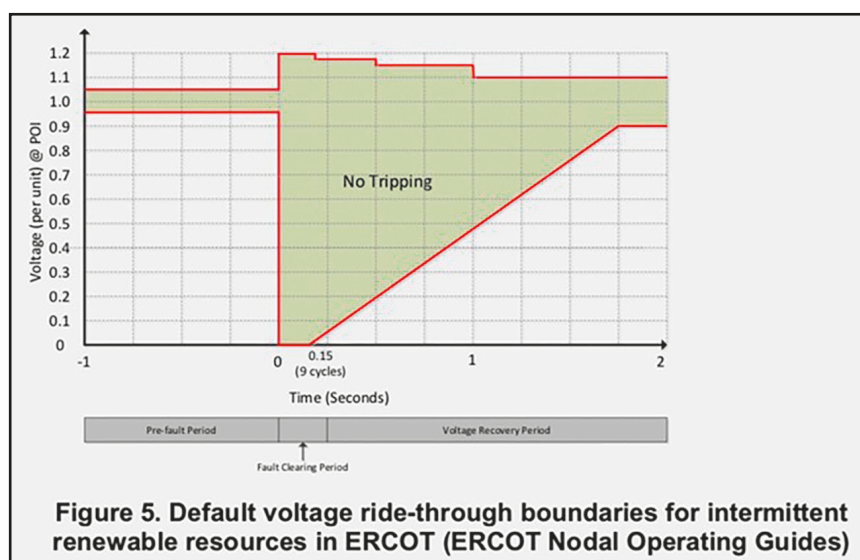


Assim como o solicitado pelo ONS, as fazendas eólicas na região do Texas devem ser capazes de injetar/consumir uma quantidade de potência reativa dentro da faixa de capacidade de forma constante se solicitadas pelo operador.

4.4.5 Operação Durante Distúrbios de Tensão

Os tempos mínimos de conexão durante distúrbios de tensão exigidos pelo ERCOT são mostrados na Figura 4.17. Nota-se que o ERCOT é semelhante a alguns operadores europeus, e exige que as fazendas eólicas permaneçam conectadas durante um breve intervalo de tempo (0,15 segundos) em caso de tensão terminal igual a zero (curto-circuito).

Figura 4.17 Curva de suportabilidade de tensão exigida pelo ERCOT



Pode-se verificar que a região de operação ininterrupta exigida por este operador é de 0,9 pu a 1,1 pu da tensão nominal do ponto de conexão. Para eventos de sobretensão, a desconexão instantânea é permitida quando a tensão terminal ultrapassa 1,2 pu. Para valores entre 1,175 pu a 1,2 pu exige-se que a conexão se mantenha por 0,2 segundos, para a faixa de tensões de 1,15 pu a 1,175 pu por 0,5 segundos e para a faixa de 1,10 pu a 1,15 pu por 1 segundo.

4.5 UM PARALELO ENTRE PROCEDIMENTOS DO MUNDO E NO BRASIL

Como visto ao longo deste capítulo, o ONS elaborou procedimentos de rede específicos para fazendas eólicas de forma semelhante a outros operadores ao redor do mundo. Os requisitos apresentados foram relativos à operação em

regime de frequência não nominal, participação no controle de frequência, controle de potência reativa e tensão e operação durante distúrbios.

No que tange à participação no controle de frequência, o ONS especifica comportamentos específicos para eventos de sobrefrequência e de subfrequência enquanto os operadores europeus e o ERCOT estabelecem apenas a exigência de um controle do tipo droop como o especificado para subfrequências pelo ONS. Um outro diferencial que vale ser discutido é a exigência de reservas de potência. O órgão composto por diversos operadores europeus, o ENTSO-E, propõe a manutenção de reservas de potência na faixa de 1,5 % a 10 % da potência instantânea disponível, o que não é exigido nem pelo ONS e nem pelo ERCOT até o momento. Dessa forma, pode-se concluir que o ONS exige um suporte de frequência sem comprometer a revenda de energia das fazendas eólicas.

Para o controle de potência reativa e tensão, os três modos de controle exigidos pelo ONS foram também vistos nos operadores europeus e no ERCOT. A faixa de fator de potência exigida de 0,95 capacitivo a 0,95 indutivo é a mesma praticada ao redor do mundo resultando em um perfil semelhante de potência reativa em tensão nominal.

Na operação durante distúrbios de tensão, a principal diferença entre o procedimento praticado pelo ONS e aquele praticado pelo ERCOT e proposto pelo ENTSO-E é a participação na recuperação do sistema quando a tensão do ponto de conexão cai abaixo de 0,2 pu. Em eventos de tal severidade, o ONS permite a desconexão imediata das fazendas eólicas. Já o operador americano e alguns europeus demandam que as fazendas eólicas permaneçam conectadas por pelo menos 0,15 segundos para auxiliarem na recuperação da tensão terminal.

Em suma, conforme a participação das eólicas aumentou ao redor do mundo, diferentes requisitos de operação mínimos passaram a serem exigidos para que as fazendas eólicas ajudassem na manutenção de parâmetros-chave do sistema como tensão e frequência. O ONS, ao estabelecer os critérios apenas no final do ano de 2016 se beneficiou da experiência mundial para que fossem implementados requisitos específicos para fazendas eólicas conectadas no sistema interligado. Apenas no que tange à operação em regimes de frequência não nominal, os critérios adotados no Brasil podem ser considerados mais relaxados. Em relação aos demais critérios vistos neste capítulo, o ONS está em consonância com demais operadores ao redor do mundo

