

Ações do ONS para Aperfeiçoamento da Representação de Parques Eólicos nos Estudos de Engenharia e de Planejamento da Operação

A.N.C. Albuquerque, A.D.R. Medeiros, A.R. Gaspar, M.J. Botelho, J.M.M. Capano,
P.E.M. Quintão, A.S. Neto, F.M.C. Ferreira, L.F.B. Vasconcelos, P.H.L. Santos

Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS

Resumo — Em função da crescente participação dos parques eólicos na matriz eletro-energética, a modelagem adequada destes parques tem se tornado imprescindível para a realização dos estudos elétricos. Com isso, é também premente a necessidade de se definir diretrizes e critérios para a elaboração dos modelos, notadamente para simulações dinâmicas. Adicionalmente, a concepção e análise destes modelos bem como a avaliação dos resultados de estudos obtidos com os mesmos requer um conhecimento da dinâmica real dos parques eólicos e dos seus controladores. Este trabalho tem por objetivo apresentar algumas ações que o ONS vem desenvolvendo neste aspecto, e que tem por objetivo assegurar que os resultados obtidos em ambiente de estudo tornem-se cada vez mais aderentes ao comportamento esperado dos equipamentos e forneçam subsídios adequados para a operação do Sistema Interligado Nacional.

Palavras-chave — geração eólica, Procedimentos de Rede, requisitos de modelagem, rede equivalente, controle centralizado, teste de modelo.

Abstract — Due to the growing participation of wind farms in the electro-energetic matrix, the adequate modeling of these generators has become essential for the accomplishment of the electrical studies. Therefore, it is also urgent the need to define guidelines and criterion for the elaboration of models, especially for dynamic simulations. In addition, the design and analysis of these models as well as the evaluation of the results of studies obtained with them requires a knowledge of the real dynamics of wind farms and their controllers. This paper aims to present some actions that the ONS has been developing in this aspect, and whose objective is to ensure that the results obtained in the study environment become more and more adherent to the expected behavior of equipment and provide adequate subsidies for the operation of the Brazilian Interconnected Power System

Key-words — wind power generation, Network procedures, modeling requirements, equivalent network, centralized control, model testing.

I. INTRODUÇÃO

O aumento significativo de empreendimentos de geração eólica na matriz energética do Brasil, notadamente nas regiões Nordeste e Sul é uma realidade, constatada desde a criação do PROINFA, e que se consolidou como uma geração bastante competitiva nos leilões de energia nova, a partir do ano 2009. Atualmente o SIN dispõe de 14,4 GW de potência instalada de geração eólica (12,1 GW na região Nordeste, 2,1 GW na

Região Sul e 0,3 GW no restante do país) [1] e já foi outorgado pela ANEEL um montante previsto de 5,2 GW [2].

Conforme o Submódulo 18.2 dos Procedimentos de Rede (PR) [3], para que um parque seja declarado apto a entrar em operação, entre os vários requisitos exigidos pelo ONS, faz-se necessário que toda a planta do parque (rede interna), turbinas eólicas (aerogeradores), transformadores elevadores e de conexão, sejam representados em todos os programas de simulação utilizados pelo ONS, especificamente ANAREDE, ANATEM, ANAFAS e ATP, considerando as informações e modelos enviados pelos agentes proprietários dos equipamentos que compõe as instalações da rede de operação. O envio de modelos que representem fielmente as características dos equipamentos é imprescindível para a realização dos estudos elétricos. Deve-se ter em conta, ainda, que a depender do tipo de estudo a ser realizado e da ferramenta de simulação que será utilizada, podem haver diferentes necessidades em termos de modelagem dos parques e de seus controladores.

Do ponto de vista da elaboração e da gestão das bases de dados que contém estes modelos, bem como da realização de estudos elétricos considerando o impacto destas fontes, pode-se elencar alguns aspectos principais a serem observados:

- Para a definição de quais lógicas e estratégias devem ser modeladas, e também para a correta interpretação dos resultados de simulações, é determinante o conhecimento das características técnicas dos aerogeradores e de seus controladores
- Dadas as características dos parques eólicos, formados por um grande número de aerogeradores e ramais em média e baixa tensão, deve-se avaliar o detalhamento necessário da rede interna dos parques em função do tipo de estudo a ser realizado.
- Deve-se atentar para a usabilidade dos modelos para simulações dinâmicas e de transitórios eletromagnéticos, evitando-se, à medida do possível, processos que dificultem a sua utilização, como por exemplo a necessidade de inicialização manual dos modelos para diferentes pontos de operação ou a representação de malhas de controle que demandem de passo de integração menores do que o usual e exijam recursos

computacionais excessivos. Este último aspecto torna-se ainda mais relevante ao se considerar que em situações específicas poderá ser necessário realizar simulações com a modelagem dinâmica e de transitórios eletromagnéticos de um grande número de parques eólicos.

Neste contexto, o ONS vem desenvolvendo uma série de ações para aprimorar a qualidade dos estudos elétricos que são impactados pela presença massiva de parques eólicos, de modo que os resultados obtidos em ambiente de estudo tornem-se cada vez mais aderentes ao comportamento real dos equipamentos, e seja possível fornecer subsídios cada vez mais adequados para a definição das instruções de operação do Sistema Interligado Nacional (SIN).

As ações do ONS no que diz respeito aos parques eólicos são bastante abrangentes e não se limitam à modelagem dos parques para estudos elétricos, mas também envolvem aspectos de proteção e controle, qualidade de energia, previsão de geração eólica para a programação eletro-energética, determinação de níveis mínimos de inércia equivalente no SIN para fazer frente à elevada inserção de geração eólica, dentre outras. Entretanto, o foco do presente trabalho será em apenas algumas destas questões, que estão relacionadas à representação de parques eólicos nos estudos de engenharia e de planejamento da operação. Os principais tópicos que serão abordados são:

- Utilização de redes equivalentes para representação de parque eólicos em estudos de fluxo de potência, transitórios eletromecânicos e transitórios eletromagnéticos.
- Diretrizes para modelagem de parques eólicos em programas de análise de transitórios eletromecânicos e transitórios eletromagnéticos.
- Constatações gerais da consulta técnica realizada junto aos fabricantes de parque eólicos sobre aspectos de controle de aerogeradores e parques eólicos.

Vale destacar, que os aspectos aqui abordados advêm de trabalhos permanentes, os quais são constantemente atualizados em função dos avanços observados no estado da arte e no conhecimento da tecnologia, que estão sendo continuamente verificados e perseguidos pelo ONS.

II. REPRESENTAÇÃO EQUIVALENTE DE PARQUES EÓLICOS PARA ESTUDOS DE FLUXO DE POTÊNCIA E TRANSITÓRIOS ELETROMECAÑICOS

As redes de conexão de usinas eólicas normalmente possuem características peculiares, podendo ser formadas por longos ramos em baixa tensão, cabos aéreos, subterrâneos, e uma grande diversidade de topologias. Uma representação detalhada desta rede, que levaria à modelagem de um elevado número de circuitos e barras, implicaria em uma série de dificuldades, no que diz respeito à elaboração de cenários para as análises de fluxo de potência e à criação e associação de modelos nas análises de transitórios eletromecânicos. Além disso, a eficiência numérica dos métodos utilizados para realizar as simulações poderia ser comprometida em função do mau condicionamento das matrizes associadas às redes com estas características. Um outro aspecto é que, dado o grande número de modelos dos aerogeradores quando da representação detalhada, as simulações no programa

ANATEM demandam excessivo esforço computacional. Portanto torna-se latente a necessidade de utilização de sistemas equivalentes para representação dos parques eólicos.

Por estes motivos, o ONS iniciou em 2013 um trabalho de criação de equivalentes de regime permanente para representação dos parques eólicos e suas redes de conexão ao SIN nos casos de referência dos estudos de fluxo de potência e transitórios eletromecânicos. A partir dos parâmetros elétricos de todos os circuitos e transformadores que compõe as redes internas dos parques eólicos, desde o terminal dos aerogeradores até o ponto de conexão com o SIN, realiza-se o processamento destas informações, utilizando os critérios e a metodologia que serão apresentadas a seguir para elaborar os equivalentes de rede para cada parque, levando-se em conta os conjuntos de parques existentes. A representação equivalente dos parques que já estão em operação foi finalizada, sendo que equivalentes adicionais são gerados à medida que novos parques são integrados ao SIN.

No que diz respeito ao trabalho realizado para criação dos sistemas equivalentes, cabe destacar as principais etapas realizadas:

- Estabelecimento de critérios e premissas para elaboração de equivalentes de redes em parques eólicos, definindo as fronteiras das redes equivalentes e a forma como devem ser agrupados os parques eólicos que possuem o mesmo ponto de conexão ao SIN e mesmo tipo de aerogerador (tecnologia, fabricante e modelo).
- Comparação entre as representações detalhada e equivalentada da rede dos parques eólicos, tanto no que diz respeito ao desempenho da rede no ponto de conexão quanto à quantidade de barras e de modelos dinâmicos para simulações de estabilidade eletromecânica necessários para representar os referidos parques.

A. Redes Equivalentes

As redes de conexão de parques eólicos normalmente possuem topologias diversas, a depender do ponto da rede no qual o parque se conecta e das próprias características do parque, como número de aerogeradores e as distâncias entre cada ponto na rede interna do parque. Neste sentido, ao propor a elaboração de uma rede equivalente, busca-se também uma padronização na sua representação, definindo-se quais elementos devem ser explicitamente representados e quais serão efetivamente aglutinados em uma representação equivalente. A Figura 1 apresenta a topologia padrão para um sistema equivalente de parques eólicos que tem sido adotada pelo ONS.

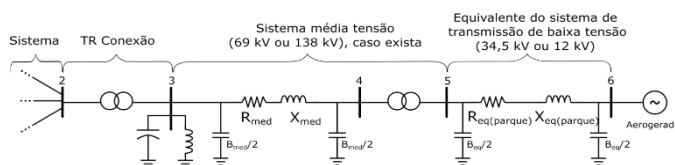


Figura 1 – Representação equivalente do sistema

Com relação à Figura 1, as seguintes premissas devem ser consideradas:

- O transformador de conexão do parque ao sistema, entre as barras 2 e 3, deve ser representado de forma explícita.
- R_{med} , X_{med} e B_{med} , entre as barras 3 e 4, são, respectivamente, a resistência, a reatância e a susceptância do sistema de transmissão de média tensão

do parque eólico (69 kV ou 138 kV). Este sistema, juntamente com os transformadores da rede de média tensão interna, representado entre as barras 4 e 5, deve ser representado de forma explícita.

- $R_{eq}(\text{parque})$, $X_{eq}(\text{parque})$ e $B_{eq}(\text{parque})$, entre as barras 5 e 6, são, respectivamente, a resistência, a reatância e a susceptância equivalentes da representação do sistema de transmissão de baixa tensão do parque eólico (12 kV ou 34,5 kV). O equivalente deve incluir os transformadores elevadores de conexão de cada aerogerador.
- Elementos shunts utilizados para compensação de reativo ou filtragem de harmônicos que estejam instalados na rede de média tensão (69 kV ou 138 kV), devem ser representados no barramento exato ao qual estão conectados. Caso estes elementos shunts estejam instalados na rede de baixa tensão (12 kV ou 34,5 kV), devem ser representados na barra 5 ou, caso não haja rede de média tensão, na barra de baixa do transformador de conexão (barra 3).
- O equivalente criado deverá conter somente aerogeradores de mesma tecnologia, fabricante e modelo.

A representação explícita da rede de média tensão é de particular importância para as análises de curto-circuito devido à influência da contribuição de sequência zero do transformador de média tensão (p.ex. 138/34,5 kV) para curto-circuito monofásico pelo tipo de ligação.

Na Figura 2 é apresentado o exemplo de um parque que se conecta a uma rede de 525 kV, através de um ATR 525/138 kV. O parque deste exemplo possui uma rede interna em 138 kV, transformadores da rede de média tensão 138/34,5 kV e uma extensa rede de 34,5 kV onde os aerogeradores são conectados, através de transformadores 34,5/0,69 kV.

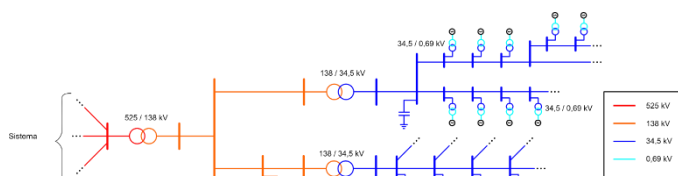


Figura 2 – Sistema completo (exemplo de parque com rede de média tensão)

A partir dos critérios apresentados, a estrutura da rede equivalente que seria adotada para o parque da Figura 2 é apresentada Figura 3.

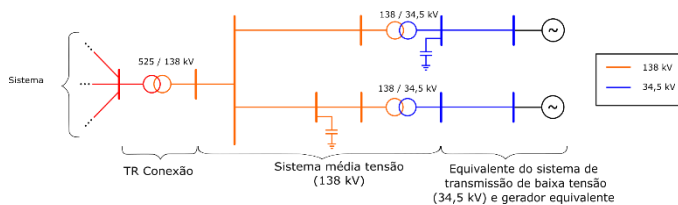


Figura 3 – Sistema equivalente (exemplo de parque com rede de média tensão)

B. Cálculo dos Equivalentes e Resultados

Para a obtenção das redes equivalentes a partir das informações detalhadas de cada parque foi utilizada a ferramenta desenvolvida pela empresa Andesa, a partir da contratação do ONS TR 2.1-001-2014. Esta ferramenta tem por base o artigo da referência [11].

Para exemplificar a aplicação da metodologia e dos critérios apresentados, na referência [7] foram elaboradas redes equivalentes para os parques eólicos dos estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul, com base em informações (parâmetros de linhas, transformadores e aerogeradores) recebidas dos agentes proprietários.

Foi verificada uma redução significativa no número de barras necessárias para representação da rede interna dos parques eólicos de forma equivalente quando comparada à representação detalhada. A redução do número de barras, de 1792 para 60, reflete-se também no número de modelos necessários para simulação no programa de análise de transitórios eletromecânicos que, para os 84 parques analisados, ficou restrito a 30 modelos quando da representação da rede equivalente. Para a representação detalhada, caso fosse representado um modelo para cada um dos aerogeradores, seriam necessários 989 modelos.

A referência [7] também apresenta uma análise qualitativa dos resultados. Tanto para as simulações de fluxo de potência como de transitórios eletromecânicos, foram desprezíveis os desvios observados quando comparados os resultados das duas representações, equivalente e detalhada. Foi verificada também uma redução expressiva do tempo de simulação ao utilizar a representação equivalente. Em um caso onde foi representado todo o SIN e o modelo dinâmico de apenas um parque eólico no Sul do Rio Grande do Sul, o tempo total de simulação foi reduzido de 15 segundos para apenas 3 segundos. Essa redução seria ainda mais significativa se fossem modelados, em ambas as representações, todos os parques eólicos do SIN.

III. REPRESENTAÇÃO EQUIVALENTE DE PARQUES EÓLICOS PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Na simulação digital, o nível de complexidade da representação de equivalentes de parques eólicos (modelagem computacional) depende dos objetivos das simulações e do contexto da análise. Visando representar o desempenho dos sistemas elétricos de potência, tem-se como desafio retratar os diversos equipamentos que o compõe (linhas de transmissão, transformadores, banco de capacitores, reatores, filtros de harmônicos, dentre outros) de forma suficientemente precisa, visando reproduzir os fenômenos físicos inerentes ao processo de transmissão da energia, desde as unidades geradoras até os pontos de consumo.

Os eventos transitórios abrangem uma extensa faixa de frequência (amplo espectro) a depender das características do sistema e da sua causa primária. Por isso, os estudos de transitórios eletromagnéticos demandam um nível de detalhamento rigoroso e suficientemente preciso, para os diversos elementos que o compõem, de forma a representar via simulação, com a maior exatidão possível, os fenômenos físicos associados. Para o caso específico do presente artigo, a faixa de frequência observada são as compreendidas até 3 kHz [12].

Na representação de um sistema de potência, quando existentes e pertinentes, detalham-se geradores, transformadores, linhas de transmissão, equipamentos para controle de tensão, a exemplo de reatores, bancos de capacitores (em derivação e série), compensadores estáticos e síncronos e as cargas [13].

No que concerne à representação da rede interna de parques eólicos, verificam-se uma série de particularidades que tornam sua representação única, quando comparadas às diversas topologias encontradas no sistema elétrico. Uma vez que a rede de média tensão apresenta cabos aéreos, cabos subterrâneos e transformadores elevadores verifica-se que a composição desse sistema apresenta uma resposta em frequência, a qual é imprescindível a sua síntese nos estudos de transitórios eletromagnéticos, especificamente para manobras de energização de linha de transmissão e transformadores, rejeição de geração e curtos-circuitos.

Entretanto, uma representação detalhada da rede dos parques eólicos, juntamente com as turbinas eólicas, filtros (quando pertinente) e transformador elevador, torna o caso praticamente inviável do ponto de vista do esforço computacional. Desta forma, verifica-se a necessidade de uma representação equivalente da rede de média tensão que conecta as turbinas eólicas, considerando uma metodologia que garanta a representação dos fenômenos transitórios associados ao estudo a ser realizado na faixa de frequência desejada.

A. Análise das Metodologias

Para a realização dos estudos de transitórios eletromagnéticos, a representação detalhada das redes internas dos parques eólicos implica em um esforço computacional excessivo. Por outro lado, deve-se garantir que os fenômenos (sobretensões e sobrecorrentes) sejam reproduzidos com a maior fidelidade possível com os eventos em campo (solicitações reais).

Visando alinhar as duas necessidades, busca-se definir uma metodologia para síntese e implementação de equivalentes de parques eólicos para aplicação nos estudos de transitórios eletromagnéticos com o programa computacional ATP [14]. O objetivo é avaliar e propor técnicas de equivalente entre as existentes na literatura internacional que seja mais adequada para uso nestes estudos no ambiente operativo, especificamente para estudos de transitórios eletromagnéticos, válidos para estudos de surto de manobra.

A representação agregada dos parques em estudos de transitórios eletromagnéticos basicamente apresenta dois pontos principais:

- Representação agregada dos aerogeradores: Os modelos de aerogeradores para estudos de transitórios eletromagnéticos com o programa ATP atualmente são fornecidos pelos seus fabricantes. A maioria destes modelos apresenta representação agregada e são itens de entrada para os estudos.
- Representação agregada da rede de média tensão: A representação agregada da rede de média tensão não apresenta metodologia consolidada, mas apresenta várias abordagens diferentes encontradas na literatura e são apresentadas neste estudo.

As metodologias foram levantadas de acordo com a relevância ao tema e com foco na rede de média tensão. Ou seja, as metodologias de modelos agregados e considerações sobre representação no programa ATP não serão objeto deste trabalho.

B. Principais Constatações

Baseado nas análises, conclui-se que as respostas em frequência das redes de média tensão dos parques eólicos podem ser obtidas utilizando o programa HarmZs porque são

obtidos os mesmos resultados que o programa ATP. Além disso, toda a base de dados referente às redes de média tensão dos parques eólicos em operação está disponível para o ONS no formato ANAREDE e esta base pode ser convertida facilmente para o formato HarmZs

Apesar de ser possível o cálculo dos polos e resíduos de uma determinada rede de média tensão utilizando o programa HarmZs, verificou-se que um caminho mais geral para este cálculo é a utilização do método de ajuste vetorial (Vector Fitting). Este método permite o cálculo dos polos e resíduos a partir de uma resposta em frequência como entrada. Desta forma, é possível calcular os polos e resíduos de uma resposta em frequência obtida em qualquer programa de simulação (ATP, HarmZs, ou outro qualquer) e sintetizar um circuito RLC equivalente que representa a mesma resposta e que pode ser utilizado em um programa de simulação de transitórios eletromagnéticos.

A análise das respostas em frequência de redes de média tensão de parques eólicos obtidas mostrou que as mesmas se apresentam basicamente em dois tipos: predominantemente capacitivas e redes com ressonâncias.

Utilizando o método do ajuste vetorial para obtenção de polos e resíduos em redes com característica capacitiva, os polos reais encontrados resultam em uma capacitância que é aproximadamente o somatório de todas as capacitâncias da rede de média tensão e este comportamento se evidencia com o aumento do número de polos utilizados para o fitting.

Para uma rede predominantemente capacitiva a representação apenas do somatório de todas as capacitâncias apresenta um bom fitting em relação à resposta em frequência original para frequências até $\pm 1000\text{Hz}$ ($h \approx 17$). Equivalentes que propõem o somatório das capacitâncias apresentarão resultados razoáveis desde que a resposta em frequência seja predominantemente capacitiva.

A utilização de polos e resíduos calculados a partir de resposta em frequência, com ou sem correção da resistência com a frequência, apresentam resultados de simulação bastante próximos aos resultados do sistema detalhado.

As avaliações indicaram que a representação equivalente dos parques eólicos em sua maioria representa o comportamento de um capacitor equivalente e desta forma, tem-se um modelo simplificado.

Entretanto, em outras situações, a resposta em frequência da rede apresenta pontos de ressonâncias e, para essas situações, uma metodologia mais sofisticada se faz necessária, uma vez que é fundamental sintetizar a resposta em frequência completa.

IV. ASPECTOS DE CONTROLE DE PARQUES EÓLICOS

Face ao aumento da participação da geração eólica no Sistema Interligado Nacional (SIN), o desempenho dos aerogeradores, dos seus controles e do controle centralizado dos parques tem tido papel cada vez mais relevante na operação. Atualmente a possibilidade de controle da injeção e absorção de potência reativa já se apresenta como um recurso importante para controle de tensão, principalmente em regiões onde há escassez de outras fontes de controle.

A partir das análises elaboradas com o auxílio de oscilografias de eventos sistêmicos, tem-se verificado também a influência para o SIN do desempenho dos parques durante faltas, notadamente para os parques constituídos de tecnologias Doubly-Fed Induction Generators – DFIG

(Geradores de Indução Duplamente Alimentados) e Full Converter (Geradores Síncronos conectados à rede através de Inversor). Estas são as tecnologias predominantes no sistema atual, e suas respostas dependem da estratégia de controle adotadas por cada fabricante, inclusive a depender do ponto de conexão do parque eólico. Observa-se em condições de falta, por exemplo, a ocorrência de inversão significativa da potência ativa em aerogeradores DFIG (destaque para os períodos subtransitório e transitório) ou ainda o ilhamento de aerogeradores com carga da distribuidora local ou com outros parques eólicos contendo aerogeradores de diferentes tecnologias.

Neste contexto, tem se tornado indispensável o conhecimento por parte do operador do sistema das lógicas e estratégias de controle dos parques eólicos, principalmente com relação aos recursos disponíveis para operação em tempo real e ao comportamento esperado dos aerogeradores em condição de falta. Para abordar estas questões, no final de 2017, o ONS elaborou uma consulta técnica [6] que foi encaminhada aos fabricantes de aerogeradores que atuam no Brasil. Esta consulta teve como objetivo identificar detalhes dos controles disponibilizados por cada fabricante em suas diferentes plataformas de geração, tanto em relação aos aerogeradores quanto ao parque.

Ao longo do ano de 2018, diversas interações com os fabricantes foram realizadas a fim de esclarecer todas as dúvidas em relação ao funcionamento dos controles disponíveis.

Em paralelo foram realizadas reuniões internas ao ONS nas quais foram discutidos diversos aspectos a serem melhorados na modelagem das usinas eólicas, baseando-se nas trocas de informações com os fabricantes, experiências verificadas na prática e também em normas internacionais, com destaque para a IEC-61400-27-1:2015 [10].

Ainda se pretende que este trabalho forneça subsídios para o aperfeiçoamento da modelagem e representação dos sistemas de controle dos parques eólicos nos estudos de fluxo de potência e de transitórios eletromecânicos, o que levará também ao aprimoramento dos *Requisitos Básicos para Modelagem de Parques Eólicos no Anatem* [5], os modelos para registro dos testes de comissionamento dos parques, e por fim os próprios requisitos dos Procedimentos de Rede (PR) relacionados aos parques eólicos.

A. Principais Constatações sobre a Consulta Técnica aos Fabricantes de Aerogeradores

A consulta técnica encaminhada aos fabricantes foi estruturada de modo a esclarecer detalhes dos controles disponibilizados por cada fabricante nos diferentes modelos e versões de aerogeradores e controladores, sendo que os questionamentos foram divididos em dois grupos:

- **Controle individualizado:** controle intrínseco do aerogerador, no qual são controladas as grandezas elétricas no terminal do mesmo.
- **Controle centralizado:** modo de controle no qual os sinais de comando são enviados de forma centralizada a um determinado grupo de aerogeradores para atingir um valor específico de tensão, potência ativa ou reativa ou fator de potência em um determinado ponto da rede, seja remoto ou interno ao parque.

Os questionamentos elaborados buscaram esclarecer, principalmente, quais as grandezas que podem ser controladas e as constantes de tempo associadas a cada modelo de aerogerador/controlador centralizado, e como se dá a atuação destes controles em situação de defeito no sistema, que possam levar a afundamentos de tensão mais ou menos severos no parque, ou ainda em condições de sub/sobrefrequência. Os fabricantes também foram indagados sobre a possibilidade de parametrizar as respostas dos seus controladores, o que pode ser importante a depender das características do sistema onde será integrado cada parque.

Com este trabalho o ONS pôde aprimorar o relacionamento com os fabricantes, mantendo abertos canais de comunicação para esclarecimento de dúvidas e recebimento de sugestões no que diz respeito ao tratamento e aos requisitos impostos aos aerogeradores e parques pelos PR.

Foi constatado também que os fabricantes estão constantemente aprimorando seus controladores e o desempenho dos aerogeradores, notadamente no que diz respeito ao atendimento da revisão 2016.12 do submódulo 3.6 do PR.

Destacam-se abaixo algumas constatações com relação a aspectos específicos verificadas nas respostas dos fabricantes:

- Com poucas exceções, os fabricantes adotam ajustes padrões para os controladores de todos os aerogeradores da mesma família instalados no Brasil, não sendo feita qualquer distinção para parques conectados em diferentes níveis de curto-circuito.
- Nos parques instalados no Brasil, em geral o controle de tensão centralizado é lento, com tempo de resposta acima de 30 segundos. Alguns parques já estão adotando sistemas de comunicação baseados em fibra ótica dedicada para sua operacionalização, no sentido de reduzir os tempos de latência. Destaca-se a importância de contar com recursos de controle de tensão em tempos reduzidos, da ordem de poucos segundos, que efetivamente possam contribuir no sentido de minimizar a exposição do sistema a situações de subtensão, e até mesmo evitar a ocorrência de corte de carga. Neste sentido, cabe ressaltar a importância reconhecida de explicitar nos PR os requisitos de tempo de resposta específicos para as plantas eólicas, a exemplo do que já existe para a geração convencional.
- No que diz respeito ao ajuste das proteções de sub/sobretensão e sub/sobrefrequência, alguns fabricantes ajustam suas proteções nos valores exatos indicados nos PR. Entretanto, os valores dos PR são requisitos mínimos a serem adotados, sendo recomendado que tais proteções sejam ajustadas explorando-se efetivamente a suportabilidade dos equipamentos, com o objetivo de evitar desligamentos desnecessários que venham a prejudicar o SIN e o próprio parque.
- Com relação à contribuição de potência reativa sob defeito, os fabricantes informaram que esta funcionalidade estava disponível no passado de forma opcional em alguns aerogeradores, e que atualmente tem se tornado padrão devido aos requisitos dos PR. Destaca-se também a importância de que, para os parques aos quais este requisito é cabível, deve haver a possibilidade

de ajuste da inclinação da curva de resposta de corrente reativa em função da tensão terminal.

- No que diz respeito à inércia sintética (requisito para condição de subfrequência), a maioria dos fabricantes informou estar em processo de desenvolvimento dessa funcionalidade, sendo que alguns já estavam em processo de finalização de testes e ajustes para implementação em parques em integração na ocasião das de elaboração deste trabalho. Por outro lado, constatou-se que a aplicação do controle de sobrefrequência apresenta menores dificuldades e desafios, sendo aproveitada parte da estrutura utilizada no controle de potência ativa.
- Alguns fabricantes informaram que possuem certificação internacional de atendimento a requisitos de seus aerogeradores, a partir da realização de testes como por exemplo para o desempenho sob falta. Com relação ao desempenho dos controladores em nível de parque, a avaliação da qualidade e de desempenho seriam realizados apenas após a conclusão do empreendimento.

V. APERFEIÇOAMENTO DOS MODELOS DE PARQUES EÓLICOS PARA ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS

Para a realização de estudos elétricos através de simulação em ambiente computacional, é de fundamental importância que os modelos matemáticos dos componentes da rede reproduzam o comportamento real dos respectivos equipamentos. Do ponto de vista dos parques eólicos, os PR [3] determinam que o agente responsável pelo parque deve enviar o modelo dos equipamentos em formato CDU (ANATEM) para simulação de transitórios eletromecânicos. Além disso, o agente deve demonstrar que o seu modelo representa adequadamente o desempenho de seus equipamentos, por meio de comparações com resultados obtidos em campo, ou com outro modelo validado previamente em outra plataforma de simulação. O ONS tem orientado os agentes a registrarem estas comparações no relatório final de comissionamento, cujo modelo de documento e orientações para elaboração são disponibilizadas pelo ONS, e cuja elaboração é de responsabilidade do agente de geração, conforme o submódulo 21.2 dos PR [3].

A diversidade e complexidade dos controles envolvidos nestes modelos podem levar a problemas de simulação no programa ANATEM, considerando que muitos dos modelos são “traduzidos” de modelos utilizados em outras ferramentas de simulação (ATP, EMTP, PSCAD, etc) onde se requer um nível de representação muito mais detalhado. Neste sentido, o ONS, como gestor da base de dados para simulação de transitórios eletromecânicos e principal usuário dos modelos, vem observando uma série de dificuldades relacionados à modelagem de usinas eólicas, das quais se destacam:

- Inicialização complexa dos modelos, notadamente quando necessitam de ferramentas auxiliares ou de simulações preliminares para ajustes de parâmetros internos ao modelo;
- Falta de robustez de solução em pontos operativos diferentes dos valores nominais de tensão, potência ativa e reativa (valores mínimos, máximos e intermediários);
- Parametrização e modelagem diferentes dos informados na documentação fornecida pelo fabricante;

- Parametrização de controles e proteção incompatíveis com os requisitos estabelecidos nos Procedimentos de Rede para eventos de sobre/subtensão e de faltas no sistema.
- Representação de malhas de controle para condições muito particulares de operação dos aerogeradores, de pouca importância prática na operação, mas com impacto computacional na solução do modelo, como por exemplo malhas para simular condições de vento diferenciadas;
- Envio pelos agentes proprietários de parque eólicos de modelos desatualizados e obsoletos para os aerogeradores, sendo que em alguns casos o ONS já dispõe de versões mais atualizadas e consolidadas, recebidas de outros parques eólicos.
- Falta de documentação detalhada do modelo, dos parâmetros que podem ser ajustados em campo em função da característica da rede e resultados das simulações.

Neste contexto, o ONS vem desenvolvendo, constantemente, trabalhos junto aos fabricantes e agentes proprietários de parques eólicos. Muitos destes trabalhos ocorrem no âmbito da gestão da Base de Dados Oficial de Transitórios Eletromecânicos [4]. Das ações perseguidas no âmbito da representação específica de parque eólicos na base de dados, destacam-se:

- Eliminação de inicialização manual existente em alguns modelos
- Eliminação/simplificação de funções que não levem a perdas significativas na precisão dos resultados
- Busca por enquadrar os modelos dentro de padrões adequados de desempenho computacional
- Busca de representação uniforme de modelos dos aerogeradores de cada fabricante, e, no limite, de todos eles (mesmo que de forma parcial), com vistas a sua integração ao código das ferramentas de simulação, visando a redução dos tempos de simulação e de eventuais dificuldades de convergência no processo de solução, assim como prover maior facilidade e agilidade aos processos de planejamento que envolvem a simulação destas fontes.

Adicionalmente, e no mesmo escopo da consulta técnica realizada junto aos fabricantes de aerogeradores sob aspectos de controle, já mencionada no Item IV, o ONS está realizando um trabalho no sentido de aprimorar os *Requisitos Básicos para Modelagem de Parques Eólicos no Anatem* [5], com base nas respostas de cada fabricante e também na norma IEC-61400-27-1:2015 [10].

A norma IEC 61400-27-1 aborda aspectos de modelagem e controle de aerogeradores/parques eólicos para análises de fluxo de potência e estabilidade eletromecânica em sistema de potência de grande porte a partir do estabelecimento de modelos dinâmicos padrão de acordo com a tecnologia do aerogerador, quais sejam:

- Tipo 1 – Gerador de indução com resistência fixa do rotor (gaiola de esquilo);
- Tipo 2 – Gerador de indução de rotor bobinado com resistência externa variável do rotor;
- Tipo 3 – Gerador assíncrona duplamente alimentado (Doubly-Fed Induction Generators – DFIG); e

- Tipo 4 – Gerador síncrono com velocidade variável conectado à rede por conversor de frequência CA/CC/CA (retificador/inversor) (Full Converter).

Os modelos são concebidos a partir de estruturas modulares genéricas, onde são representadas cada uma das partes que compõem a dinâmica de um aerogerador (Aerodinâmica, Mecânica, Gerador, Proteção e Controle).

A concepção modular deve permitir ainda, a inclusão de novas tecnologias desenvolvidas ou recursos de controles suplementares.

A partir da especificação de quais dinâmicas devem ser representadas para as análises que serão realizadas com o modelo, pode-se recomendar a inclusão de maiores detalhamentos nos modelos ou a exclusão/desconsideração de malhas não necessárias para estes fins.

Alguns aspectos mencionados pela norma IEC 61400-27-1 já vem sendo praticados ou abordados pelo ONS em sua atuação juntos aos agentes e fabricantes de aerogeradores. Dentre eles a necessidade de que os modelos possuam inicialização automática de suas variáveis e sejam submetidos a testes em várias condições operativas. Sobre esta última questão, serão apresentados detalhes no Item VI. Também tem se demonstrado desejável a separação do modelo dos controles individuais dos aerogeradores dos modelos dos controles centralizados dos parques.

A norma IEC 61400-27-1 menciona ainda em diversos pontos sobre uma possível não aderência da resposta de um modelo padrão à resposta de um modelo detalhado do fabricante. Portanto, em caso de utilização de modelos-padrão, seria necessário fazer sua validação a partir de comparações com modelos detalhados específicos de cada aerogerador.

VI. TESTES DE MODELOS DE USINAS EÓLICAS PARA TRANSITÓRIOS ELETROMECAÑICOS

Tendo em consideração os aspectos apresentados no Item V, notadamente em relação à complexidade dos modelos de aerogeradores e parques eólicos, e também em consonância com a norma IEC 61400-27-1, tem-se investido no aprimoramento da avaliação da qualidade destes modelos. Neste sentido, o ONS tem utilizado procedimentos específicos e um conjunto mínimo de testes a serem realizados com cada modelo. Os testes visam verificar se o seu desempenho está adequado aos requisitos mínimos dos PR e se apresenta robustez nas simulações em diferentes pontos de operação, variando-se a tensão terminal e a geração de potência ativa e reativa do aerogerador, em condições de regime normal, operação sob falta (*fault ride-through*) e sob condições de sub/sobrefrequência.

Como as simulações tem o objetivo de avaliar o desempenho apenas do modelo do parque/aerogerador, e não a sua interação com o sistema e impactos para o SIN de sua integração, o que será objeto de análise específica, recomenda-se que as simulações indicadas sejam realizadas com um sistema reduzido, composto de uma impedância e um gerador equivalentes típicos. Para a rede interna do parque também pode-se utilizar uma topologia e parâmetros típicos, uma vez que estas informações não irão impactar no desempenho do modelo.

Os procedimentos para teste que serão apresentados servem também como referência para que os agentes preparem

a documentação relativa aos modelos, a qual que também deve ser enviada ao ONS.

A. Análise de Regime Normal de Operação

Os cenários avaliados neste item visam verificar se o modelo apresenta bom funcionamento para todos os pontos de operação de potência ativa, reativa e tensão que o parque pode operar continuamente, os quais devem estar em consonância com os PR [3], sem atuação de controles que levem à alteração do ponto de operação e proteção que leve à desconexão do parque.

Desta forma, recomenda-se a realização de simulações, no mínimo, nos cenários da Tabela I (combinando tensões e potências ativas e reativas diferentes), sem evento por um tempo total de simulação de 60 segundos:

TABELA I
CENÁRIOS PARA AVALIAÇÃO EM REGIME NORMAL DE OPERAÇÃO

Tensão Terminal				
0,90 pu (1)	0,95 pu	1,00 pu	1,05 pu	1,10 pu (1)
✓	✓	✓	✓	✓
		Potência Reativa		
		Mínima	Máxima	Nula
Potência ativa	Máxima	✓	✓	✓
	80%	✓	✓	✓
	15%	✓	✓	✓
	Nula ⁽²⁾	✓	✓	✓
Modos de Controle Centralizado				
Potência Ativa		Potência Reativa		Tensão (3)
✓		✓		✓

Notas:

1. Para tensões de 0,90 p.u. e 1,10 p.u., avaliar apenas com potência reativa mínima e máxima.
2. Caso o aerogerador possua capacidade de gerar/absorver potência reativa em cenários de potência ativa nula
3. Quando aplicável

Como trata-se de um conjunto mínimo de testes a serem realizados, podem ser simulados opcionalmente outros cenários que sejam de interesse, e que, por exemplo, levem o aerogerador a habilitar diferentes estratégias de controle que não tenham sido testadas nos cenários propostos.

B. Operação em Condição de Falta (*Fault Ride-Through*)

Em situações de eventos no sistema que levem a condições de sub/sobretensão, deverá ser verificado se o modelo do aerogerador atende pelo menos os requisitos dos PR [3], ou seja, se pode operar em todos os pontos da Figura 4.

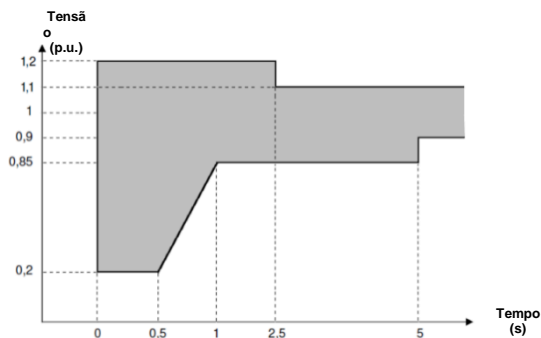


Figura 4 – Requisitos de suportabilidade a subtensões e sobretensões dinâmicas. Submódulo 3.6 dos PR

Há ainda o requisito que, durante defeitos na rede, os aerogeradores deverão contribuir com injeção de corrente reativa para contribuir na recuperação de tensão. As centrais de geração devem ser capazes de dar suporte de tensão à rede elétrica para tensões inferiores a 85%, através da injeção de corrente reativa adicional, pelo menos até a sua capacidade nominal, conforme a Figura 5. A instalação deve ser capaz de suprir a corrente reativa em não mais de 30 milissegundos (tempo de resposta do controle)

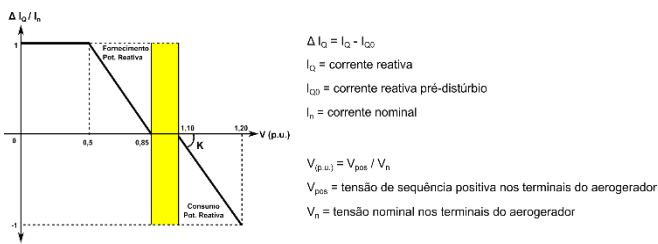


Figura 5 – Requisitos de injeção de Corrente Reativa sob defeito [3]

Em relação à potência ativa, o aerogerador deve recuperar-se a 85% do valor pré-falta em até 4 segundos após a recuperação da tensão a 85% da tensão nominal.

Os testes realizados neste item visam verificar o comportamento do aerogerador durante eventos no sistema, se este atende, pelo menos, aos requisitos dos PR [3] e ainda comparar o seu comportamento e as lógicas de controle com as informadas em documentação pelo agente responsável pelo parque. Desta forma recomenda-se a realização de um conjunto testes com, no mínimo, os cenários descritos na Tabela II, aplicando-se em cada caso, eventos que levem a tensão nos terminais do aerogerador aos valores da Tabela III. Nesse aspecto, recomenda-se avaliar ainda o modelo nos pontos da curva LVRT própria do aerogerador que, em geral, admite condições mais severas do que as indicadas na Figura 4. Realizar avaliação com tempo de simulação de 60 segundos, sendo o distúrbio aplicado no tempo de simulação de 1 segundo.

TABELA II
CENÁRIOS PARA AVALIAÇÃO EM CONDIÇÃO DE FALTA (FAULT RIDE-THROUGH)

Tensão Terminal

	0,95 pu	1,00 pu	1,05 pu
	✓	✓	✓
	Potência Reativa		
	Mínima	Máxima	
Potência ativa	Máxima	✓	✓
	Nula ⁽¹⁾	✓	✓

Nota:

- Se o aerogerador não possuir capacidade de gerar/absorver potência reativa com potência ativa nula, simular com potência ativa mínima

TABELA III

CENÁRIOS PARA AVALIAÇÃO SOB FALTA (FAULT RIDE- THROUGH)

Tensão Sustentada (%)	Duração do evento (s)
120%	2,5
85%	5
20%	0,5
~ 0% ⁽¹⁾	0,2

Nota:

- Esta simulação visa verificar se irá atuar a proteção de desconexão do aerogerador

Caso o aerogerador possa operar com diversos modos de controle (controle de tensão, de potência reativa, de fator de potência, etc) os testes devem ser realizados para cada um desses modos.

C. Operação em Condição de Frequência Não-Nominal

Em situações de eventos no sistema que levem a condições de sub/sobfrequência, visando minimizar o desligamento dos parques enquanto o sistema ainda se recupera a partir da sua capacidade própria de regulação, deverá ser verificado se o modelo do aerogerador atende pelo menos os seguintes requisitos dos PR [3]:

- Frequência entre 58,5 Hz e 62,5 Hz: Operação Contínua, sem desconexão;
- Frequência entre 56 Hz e 58,5 Hz ou entre 62,5 Hz e 63 Hz: permitida a desconexão, porém com tempo mínimo de 10 segundos;
- Frequência abaixo de 56 Hz ou acima de 63 Hz: permitida a desconexão instantânea.

Adicionalmente, a partir do Leilão de Energia 002/2015 [5] e da Revisão 2016.12 dos PR [3] foi introduzido o requisito de inércia sintética, o qual contribui para a regulação primária de frequência do SIN em condição de subfrequência e também o requisito de participação no controle de sobrefrequência. Para verificar o atendimento dos modelos em relação a estes requisitos, que encontram-se detalhados no submódulo 3.6 do PR [3], recomenda-se a realização de testes, no mínimo nos cenários da TABELA IV, com um tempo total de simulação de 60 segundos e distúrbio provocado no tempo de simulação de 1 segundo.

TABELA IV

CENÁRIOS PARA AVALIAÇÃO EM REGIME DE SUB/SOBRERFREQÜÊNCIA

Potência Reativa		Tensão Terminal
Mínima	Máxima	1,00 pu

Potência ativa	Máxima	✓	✓	✓
	Nula ⁽¹⁾	✓	✓	

Nota:

- Se o aerogerador não possuir capacidade de gerar/absorver potência reativa com potência ativa nula, simular com potência ativa mínima

Os eventos a serem simulados são:

- Acréscimo de carga no sistema para reduzir a frequência a 56 Hz e, considerando a regulação primária do sistema, recuperada a frequência para valores estabilizados em 58,5 Hz em 20 segundos.
- Rejeição de carga no sistema para elevar a frequência a 66 Hz e, considerando a regulação primária do sistema, recuperada a frequência para valores estabilizados em 63 Hz em 10 segundos.

Caso o Parque Eólico possa operar com diversos modos de controle (Controle de Tensão, Controle de Potência Reativa e Controle de Fator de Potência, etc) os testes devem ser realizados para cada um desses modos.

Outros pontos de operação podem ser simulados opcionalmente (tensão diferente da nominal, outros cenários de despacho de potência ativa, e variações de frequência mais rigorosos caso o aerogerador suporte), notadamente se promoverem alteração na estratégia de controle do aerogerador.

D. Ferramentas de Apoio e Registro dos Resultados

Tendo em vista o número significativo de casos de fluxo de potência e de arquivos para simulação dos eventos para análise de transitórios eletromecânicos que devem ser elaborados foi desenvolvida pelo ONS uma ferramenta no programa Excel com o objetivo de auxiliar as análises e a geração dos cenários (arquivo .SAV para o software ANAREDE) e de arquivos (.STB) para execução das simulações no ANATEM.

máquina ou gerador de indução) e os parâmetros de configuração do modelo;

- Cenários de tensão, potência ativa e reativa a serem avaliados e definição de quais cenários serão utilizados para avaliação de regime permanente ou sob falta;
- Pontos da curva de suportabilidade de tensão adotada.

A partir de uma lista de cenários informados pelo analista (Figura 7), a ferramenta gera uma lista de todos os casos originados da combinação dos diferentes valores de tensão, potência ativa e reativa. Nesta lista (Figura 8) pode-se escolher quais cenários serão utilizados para as análises de regime normal e de afundamento de tensão. Vislumbra-se a sua expansão também para gerar os casos a serem utilizados nos testes de variação de frequência (previstos nos novos requisitos dos PR) e de diferentes modos de controle. A ferramenta cria então automaticamente os arquivos de fluxo de potência (.SAV) e de estabilidade eletromecânica (.STB), já contendo os eventos e a associação com os arquivos de fluxo de potência adequados para cada situação.

Cenários a serem avaliados				
Tensão (pu):	0,900	0,950	1,000	1,050
Potência Ativa (%):	0	50	100	
Potência Reativa (%):	0	-100	100	

Figura 7 – Definição dos cenários pelo analista

Cenários Avaliados							
Nome	Caso	Tensão [pu]	UG [MW]	UG [MVar]	Regime	LVRT	Nome do Modelo
V90PZerQZer	2	0,900	0,000	0,000	x		Modelo 1
V95PZerQZer	3	0,950	0,000	0,000	x		Modelo 1
V100PZerQZer	4	1,000	0,000	0,000	x		Modelo 1
V105PZerQZer	5	1,050	0,000	0,000	x		Modelo 1
V90PZerQMin	6	0,900	0,000	-1,000	x		Modelo 1
V95PZerQMin	7	0,950	0,000	-1,000	x		Modelo 1
V100PZerQMin	8	1,000	0,000	-1,000	x	x	Modelo 1
V105PZerQMin	9	1,050	0,000	-1,000	x		Modelo 1

⋮
(Continua, contemplando os 36 cenários possíveis)

Figura 8 – Lista dos cenários gerados e respectiva associação a cada análise

O tratamento dos dados para utilização desta ferramenta, a sua execução, e posteriormente a utilização do ANATEM para executar as simulações em lote despende um tempo do analista inferior a 5 minutos.

Além da definição dos testes a serem realizados, o ONS propõe também uma padronização de documento para registro destas análises contemplando, não só o resultado dos testes, mas também informações técnicas dos aerogeradores, parques e controles, e cujo sumário é apresentado na Figura 9

TESTE DE MODELOS PARA TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS DE USINAS EÓLICAS														
Caso Base do Sistema Equivalente		N:\2023\Participação em seminários\OTV\SEFOR\União Modelos Aerogerador\Apelo\CADU_2023\LVRT_EDUCA_LPWF						Carregar	Exportar					
Informações da Usina Eólica		<p>Nome: EDUCA1</p> <p>Fabricante Aerogerador: 2000</p> <p>Modelo Aerogerador: DOL 2 MW</p> <p>Número de Aerogeradores: 30</p> <p>Modo de Controle: Tensão</p> <p>Gerar/Absorver Potência Reativa com Vento Nulo: Não</p>												
Potência Ativa (MW):		Máxima: 600		Mínima: 0		Total do Parque: 18000								
Potência Reativa para Vento Nulo (MVar) (Pwr-F: 0 MW):		Máxima: 0,24		Mínima: -0,24		Total do Parque: 7,2								
Potência Reativa (MVar):		Máxima: 0,25		Mínima: -0,25		Total do Parque: 7,5								
Barra Aerogerador (UNAREDE):		1000		4,84		42,24								
Impedância vista da barra do Aerogerador:		R1 (Ω): 0,000		X1 (Ω): 0,000		R2 (Ω): 0,000		X2 (Ω): 0,000						
Comando para associação do aerogerador ao modelo:		DF NT		Fonte Shunt										
DFNT		Und	(Mc)	(R ou G)	(X ou B)	(Shas)								
DFNT		38	98229											
DFNT (R) Qr T (EPN) (FQh) Mod 1 No 1* (R em G) (X em B) (Shas)		9949 10 1 100 100 15 99001a		2										
99999														
Curva de LVRT		Padrão		Modelos do Aerogerador		Cenários Avaliados								
Pontos		Tensão [pu]	Tempo [s]	Nome	Cenário	Padrão	Nome	Caso	Tensão [pu]	UG [MW]	UG [MVar]	Regime	LVRT	Modelo
Ponto 1		1,0	2,00	EDUCA1	V100PZerQMin	x	V90PZerQZer	2	0,900	0	0	x		DOL_000

Figura 6 – Tela principal da ferramenta desenvolvida

Esta ferramenta requer que o analista informe:

- Rede elétrica contendo o sistema a partir da qual serão realizadas as simulações;
- Dados dos aerogeradores, incluindo fabricante, modelo, número de unidades do parque, capacidade, modo de controle e número da barra de conexão do aerogerador;
- Modelos (.CDU) para representação no programa de transitórios eletromecânicos e informações associadas, incluindo o tipo do modelo (carga dinâmica, fonte shunt,

Sumário		
1	INTRODUÇÃO E OBJETIVO	5
2	PREMISSAS E CRITERIOS	5
3	DADOS	5
3.1	Sistema Equivalente	5
3.2	Dados do Aerogerador	6
3.3	Modelo de Transitório Eletromecânico do Aerogerador	8
3.4	Modos de Controle Disponíveis	8
3.5	Comportamento durante afundamentos de Tensão	8
4	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	8
4.1	Regime Normal de Operação	8
4.2	Comportamento durante Eventos no Sistema	10
4.2.1	Afundamentos de tensão	10
4.2.2	Variação na frequência	12
5	CONCLUSAO	13
6	PENDENCIAS	13
7	ANEXOS	13
7.1	Representação detalhada do Sistema interno do Parque Eólico	13
7.2	Curvas das análises de Regime Normal de Operação	13
7.2.1	Modo de Controle de Tensão	13
7.2.2	Modo de Controle de Reativo	15
7.2.3	Modo de Controle de Fator de Potência	16
7.3	Curvas das análises do comportamento do aerogerador durante eventos no Sistema	17
7.3.1	Modo de Controle de Tensão	17
7.3.2	Modo de Controle de Potência Reativa	19
7.3.3	Modo de Controle de Fator de Potência	21
8	REFERENCIAS	23
	Lista de figuras e tabelas	24

Figura 9 – Sumário do documento para registro dos resultados e principais características dos aerogeradores

VII. REQUISITOS DE MODELAGEM DE PARQUES EÓLICOS PARA REPRESENTAÇÃO NO PROGRAMA ATP

Os parques eólicos que se conectam ao SIN normalmente são compostos por aerogeradores de velocidade variável, que utilizam conversores de frequência. Por este motivo, a modelagem agregada (sistema equivalente) e desagregada (representação individual) destes parques torna-se uma tarefa complexa, demandando um conhecimento aprofundado do equipamento modelado, das diretrizes e critérios para realização de estudos de transitórios eletromagnéticos e do programa ATP.

Diante do apresentado, verifica-se ser de grande relevância definir requisitos básicos necessários para o desenvolvimento e implementação também dos modelos estudos de transitórios eletromagnéticos, visando a integração segura dos respectivos parques, possibilitando uma análise adequada do impacto dos mesmos sobre o SIN, e seus rebatimentos sobre os parques.

A referência [8] apresenta os critérios e premissas exigidas atualmente para modelagem no ATP de parques eólicos pelo ONS para estudos de transitórios eletromagnéticos.

Pela própria característica envolvida na realização dos estudos de transitórios eletromagnéticos, a complexidade na execução da modelagem se torna evidente, o que torna bastante relevante o detalhamento da metodologia apresentada em [8] para elaboração dos modelos.

A. Aspectos Gerais

No caso dos estudos de transitórios eletromagnéticos, todas as simulações deverão ser realizadas utilizando o programa ATP (Alternative Transients Program), conforme consta no Submódulo 18.2 nos Procedimentos de Rede [3].

Cabe ressaltar que ao entregar o modelo ao ONS, o mesmo poderá ser disponibilizado para qualquer agente do setor elétrico, possibilitando a representação deste empreendimento em outros estudos de transitórios eletromagnéticos [8].

B. Requisitos de Simulação

A referência [8] apresenta requisitos gerais de simulação no programa ATP para estudos de transitórios eletromagnéticos. Entre os requisitos, alerta-se que o arquivo deverá ser capaz de ser simulado tanto na versão do ATP (modo texto), quanto na versão gráfica, denominada ATPDraw. Os modelos entregues, o tempo de simulação, o passo de simulação e os intervalos de plotagem dos resultados deverão estar aptos a representar os fenômenos transitórios dos parques e elementos para vários estudos no sistema elétricos.

Destaca-se, ainda, que o modelo do parque para o programa ATP deve ser inicializado o mais rápido possível (tempo em torno de 200 a 300 milissegundos). Sugere-se também o uso do comando \$PARAMETER para os ajustes sistêmicos, para evitar que em caso de alteração do ajuste sistêmico seja necessário alterar o código do controle em várias seções diferentes do código, por exemplo.

C. Requisitos de Modelagem

Também são apresentados nas referências [8] e [9] diretrizes específicas para modelagem de elementos no ATP. São definidos a linguagem a ser utilizada (preferencialmente MODELS/ATP) e as duas opções para entrega das informações, no formato aberto ou formato caixa preta (black-box), com as respectivas exigências de cada formato.

Segundo explicitado na referência, o modelo deverá ser entregue inserido em um caso base, contemplando o sistema elétrico no qual o parque será conectado, sendo ainda elencados os critérios para definição das barras de fronteira. Também deverão ser considerados os parâmetros reais dos transformadores e das linhas de transmissão que compõe o parque eólico.

Os agentes deverão entregar dois tipos de modelos para os parques, um agregado e outro desagregado, de acordo com os seguintes requisitos apresentados nas referências [8] e [9].

D. Requisitos dos Estudos

Quando da realização por parte do agente dos estudos de transitórios eletromagnéticos de integração dos parques, as simulações (manobras, contingências e curto-circuito) deverão ser consultadas formalmente junto ao ONS. As manobras realizadas no estudo de integração dos parques têm impacto direto sobre a Rede Básica, sobretudo nas instalações circunvizinhas, sendo necessário quantificar as solicitações transitórias frente aos ajustes de proteção e integridade dos equipamentos/instalações.

Os casos utilizados para a realização dos estudos podem não ser os mesmos aos utilizados para o desenvolvimento dos modelos. Para a definição das barras de fronteira, devem-se escolher pontos da rede nos quais o circuito equivalente, representado pelas impedâncias de curto-circuito (próprias e de transferência), tenha uma influência mínima sobre o comportamento transitório do restante do sistema, representado em detalhes.

As análises realizadas devem ser feitas considerando os parques eólicos próximos representados e com geração máxima (nominal). Caso não seja factível simular estes parques com máxima geração, dada a dificuldade em representar os parques de forma agregada, deve-se a representação das usinas presentes na vizinhança da manobra, como uma fonte tipo 14 em série com o equivalente de curto-circuito obtido com um programa para obtenção de um equivalente na frequência fundamental [8].

Nos estudos, devem ser observadas as diretrizes e critérios para estudos de transitórios eletromagnéticos dispostos no Submódulo 23.3, itens 9 e 10, dos Procedimentos de Rede [3]. Vale ressaltar que as tensões pré-manobras devem respeitar os valores convergidos para o caso base de regime permanente ou aqueles definidos pelos estudos de estabilidade eletromecânica. Deve-se realizar a análise considerando a condição de carga Leve ou Mínima, conforme informado nos casos base em formato ANAREDE. Caso seja possível, devem ser utilizados os limites máximos permissíveis na barra de manobra (1,100pu nos barramentos 500kV e 1,100pu nos barramentos 230 kV em vazio e 1,050pu quando em carga), contanto que esses limites não sejam violados nos demais barramentos do sistema [3].

O foco do estudo é sistêmico, ou seja, o objetivo é avaliar os impactos causados pela inserção do empreendimento na operação da Rede Básica. Desta forma, recomenda-se que sejam analisadas as grandezas listadas em [8].

São também definidas em [8] os aspectos relacionados à validação do modelo, que é de responsabilidade exclusiva do agente proprietário e deverá ser feita com o modelo real do equipamento, comprovadas por resultados de simulação em comparação com resultados de medição.

VIII. CONCLUSÕES

Foram apresentados neste trabalho um conjunto de ações que o ONS vem desenvolvendo para aprimorar a qualidade dos estudos elétricos impactados pela presença massiva de parques eólicos.

O trabalho que vem sendo desenvolvido, o qual conta também com o apoio de fabricantes e proprietários de parques eólicos, proporcionou diversos subsídios para o aperfeiçoamento da modelagem dos parques eólicos nos estudos de fluxo de potência e de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos. Da mesma forma, a consulta a normas internacionais e as discussões internas ao ONS sobre aspectos vivenciados na prática dão grande respaldo qualitativo às diversas ações realizadas.

Conforme já mencionado, os assuntos aqui abordados são fruto de um trabalho permanente do ONS e tem caráter dinâmico, sendo que eventualmente, à luz de novas pesquisas e avanços da tecnologia, pode-se atualizar os critérios e diretrizes aqui apresentados, sendo que estes sempre estão balizados e devidamente fundamentados nos Procedimentos de Rede.

REFERÊNCIAS

- [1] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Boletim Mensal de Geração Eólica – Dezembro/2018.” [Online]. Disponível:

- http://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Boletim_Eolica_dez_2018.pdf [Acesso em fevereiro 2019].
- [2] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “Banco de Informações de Geração – BIG”, [Online]. Disponível: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. [Acesso em 01/02/2019].
- [3] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Procedimentos de Rede,” dezembro 2016. [Online]. Disponível: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. [Acesso em novembro 2018].
- [4] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Representação da Geração Eólica do SIN nas Análises de Transitórios Eletromecânicos - Instruções e Dados para Simulação - Dezembro 2018,” [Online]. Disponível: https://agentes.ons.org.br/avaliacao_condicao/casos_eletromecanicos.aspx. [Acesso em fevereiro 2019].
- [5] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), ONS NT-0197-2015, “Requisitos básicos para modelagem de parques eólicos no Anatem”, dezembro de 2015.
- [6] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), CARTA ONS-0080/DPL/EG/2017, “Consulta técnica sobre aspectos de controle e proteção sistêmica de aerogeradores e contras geradoras eólicas”, 26 de dezembro de 2017.
- [7] A.N.C. Albuquerque, A. R. Gaspar, A.D.R. Medeiros, S. Einsfeld, E.T.M. Colaço, F.C. Medeiros, A.S. Neto, F.M.C. Ferreira, P.E.M. Quintão, T.F.G. Mundstock. “Análise Comparativa entre a Representação Detalhada e Equivalente da Rede Interna de Parques Eólicos do SIN nas Análises de Fluxo de Potência e Transitórios Eletromecânicos”, XIV SEPOPE, outubro 2018.
- [8] Neto, A.S., F.M.C. Ferreira, “Requisitos de Modelagem de Parques Eólicos e Fotovoltaicos para Representação no Programa ATP”, XIV SEPOPE, outubro 2018.
- [9] Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, “ONS RE 3-0114/2015 Requisitos Básicos para Modelagem e Simulação de Parques Eólicos no Programa ATP”.
- [10] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 61400-27-1:2015, “Wind turbines - Part 27-1: Electrical simulation models - Wind turbines”, 13 de fevereiro de 2015.
- [11] E. Muljadi, C.P.Butterfield, A. Ellis, J. Mechenbier, J. Hochheimer, R. Young, N. Miller, R. Delmerico, R. Zavadil, and J.C. Smith. Equivalencing the Collector System of a Large Wind Power Plant, NREL/CP-500-38940 – January 2006.
- [12] Juan A. Martinez-Velasco, Power System Transients -Parameter Determination, CRC Press, 2010.
- [13] Allan Greenwood, Electrical Transients in power Systems, Wiley, 1970
- [14] Leuven EMTP Center, ATP - Alternative Transient Program - Rule Book, Herverlee, Belgium, July 1987.