

Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

Aperfeiçoamento da Modelagem de Parques Eólicos para Estudos Elétricos com Base em Interações com Fabricantes e em Normas Internacionais

**ANDERSON ROTAY GASPAR(1); ANDRÉ DELLA ROCCA MEDEIROS(1); ANDRÉ NASCIMENTO CAVALCANTI DE ALBUQUERQUE(1); ANTONIO FELIPE DA CUNHA DE AQUINO(1); ARLINDO LINS DE ARAÚJO JÚNIOR(1); FLAVIA MARIA CAVALCANTI FERREIRA(1); HAROLD GEBIEN FILHO(1); JOSÉ MARIO MAMFRIN CAPANO JUNIOR(1); MONICA FALCÃO SOUTO(1); PEDRO HENRIQUE LOURENÇO DOS SANTOS(1).
ONS(1)**

RESUMO

Em função da crescente participação dos parques eólicos na matriz eletro-energética brasileira, o aprimoramento de sua modelagem tem se tornado imprescindível para a obtenção de resultados adequados dos estudos elétricos. Também se torna premente a necessidade de aperfeiçoar as diretrizes e critérios para a elaboração dos modelos para as simulações dinâmicas. A concepção e a análise destes modelos, bem como a avaliação dos resultados de estudos obtidos com seu uso requer o conhecimento do comportamento dinâmico real dos parques eólicos e dos seus controladores. Desta forma, este trabalho tem por objetivo apresentar as principais constatações, destacando possíveis aperfeiçoamentos para a modelagem dos parques eólicos nos estudos de fluxo de potência e transitórios eletromecânicos, com base em interações com fabricantes de aerogeradores e em Normas Internacionais. Como consequência, espera-se assegurar que os resultados obtidos em ambiente de estudo tornem-se cada vez mais aderentes ao comportamento real dos equipamentos, fornecendo subsídios adequados para a operação do Sistema Interligado Nacional – SIN.

PALAVRAS-CHAVE

Geração Eólica, Procedimentos de Rede, Requisitos de Modelagem, Controle Centralizado, Testes de Modelos

1.0 - INTRODUÇÃO

Os Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (1) estabelecem que os agentes responsáveis pelas unidades geradoras a serem conectadas ao SIN devem fornecer ao ONS os modelos matemáticos dos equipamentos de sua propriedade, em formato apropriado para utilização no programa ANATEM (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL), os quais serão incorporados à base de dados de simulação de transitórios eletromecânicos do SIN, administrada pelo ONS. O agente deve ainda demonstrar que o modelo fornecido é representativo do comportamento real, comparativamente aos resultados de testes de campo (comissionamento) ou de simuladores de tempo real, cuja validação foi previamente demonstrada. Além dos modelos é necessário o envio dos resultados dos testes de campo (comissionamento) (6), que serviram de base de comparação para a resposta obtida pelo programa ANATEM no processo de validação.

Em especial para usinas eólicas, a diversidade e complexidade dos controles podem levar a dificuldades para solução de simulações no programa ANATEM, considerando também que muitos dos modelos fornecidos são “traduzidos” de modelos utilizados em outras ferramentas de simulação (PSS-E, PSCAD-EMTDC, ATP, etc).

Neste sentido destacam-se algumas dificuldades que vêm sendo observadas:

- Inicialização complexa, notadamente quando necessitam de ferramentas auxiliares ou de simulações preliminares para ajustes de parâmetros internos ao modelo.
- Pouca robustez de solução do modelo 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 e pouca importância na prática da operação, mas com impacto computacional na solução do modelo, como exemplo, fenômenos de rajada de vento.
- Falta de documentação detalhada do modelo, com ênfase para a informação relativa aos parâmetros que podem ser alterados em campo em função da característica da rede e de resultados das simulações.

Desta forma, observa-se que, muitas vezes, não há uma adequada aderência da modelagem apresentada com as necessidades associadas aos estudos de estabilidade eletromecânica.

Neste contexto, o ONS promoveu uma série de discussões junto aos fabricantes de aerogeradores para conhecer em maiores detalhes, os controles dos parques eólicos. A partir deste contato, foi identificada a necessidade da realização de uma consulta mais estruturada sobre o assunto, sendo, a seguir, enviado a todos os fabricantes de aerogeradores que atuam no Brasil um questionário sobre os aspectos de controle e o comportamento dos aerogeradores. Adicionalmente, foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre aspectos de modelagem de parque eólicos para estudos de transitórios eletromecânicos, que culminou com a decisão de tornar como referência a Norma IEC 61.400-27-1 – “Modelagem e controle de aerogeradores/parques eólicos para análises de fluxo de potência e estabilidade eletromecânica em sistema de potência de grande porte”(4).

Destas ações, buscou-se estabelecer diretrizes aos fabricantes e agentes que poderão ser fornecidas de forma a adequar a representação dos parques eólicos na base de dados de transitórios eletromecânicos, com vistas ao equacionamento dos problemas já mencionados.

Neste sentido, este trabalho apresentará as principais constatações obtidas, destacando possíveis aperfeiçoamentos para a modelagem dos parques eólicos nos estudos de fluxo de potência e transitórios eletromecânicos (5)(7).

2.0 - DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E DO QUESTIONÁRIO PARA OS FABRICANTES DE AEROGERADORES

Face ao aumento da participação da geração eólica na matriz eletro-energética do SIN, o desempenho dos aerogeradores, dos seus controles e do controle centralizado dos parques têm tido papel cada vez mais relevante na operação. Atualmente a possibilidade de realização de controle centralizado 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.

De análises elaboradas com o auxílio de oscilografias em eventos sistêmicos, tem-se verificado a influência para o desempenho do SIN dos parques eólicos 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 das fontes eólicas atualmente instaladas no SIN, e suas respostas dependem da estratégia de controle adotadas por cada fabricante e, do ponto de conexão do parque eólico. Em condições de falta observou-se, 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, com ênfase para os recursos disponíveis para operação em tempo real e o comportamento esperado dos aerogeradores em condição de falta. Para abordar estas questões, no final de 2017 o ONS elaborou uma consulta técnica (3) que foi encaminhada aos fabricantes de aerogeradores que atuam no Brasil. Esta consulta teve como objetivo identificar os detalhes dos controles disponibilizados por cada fabricante, em suas diferentes plataformas de geração, tanto em relação aos modos de controle dos aerogeradores (individualizado), quanto aos modos de controle do parque como um todo (centralizado).

Ao longo do ano de 2018, diversas interações com os fabricantes foram realizadas, a fim de esclarecer todas as dúvidas existentes em relação ao funcionamento dos controles disponíveis. Em paralelo foram realizadas reuniões internas ao ONS nas quais foram discutidos diversos aspectos a serem aprimorados 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 (4).

2.1 Síntese do Questionário Elaborado para os 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 o esclarecimento de dúvidas e recebimento de sugestões, no que diz respeito ao tratamento e aos requisitos impostos aos aerogeradores e parques pelos Procedimentos de Rede.

De forma a equalizar o entendimento e melhor documentar o comportamento de aerogeradores e parques eólicos no que diz respeito a recursos e controles, foram elaboradas tabelas contendo a consolidação dos principais resultados advindos das respostas aos questionários enviados aos fabricantes. A seguir apresentam-se os modelos de tabela que foram adotados para inclusão das informações recebidas:

Tabela 1 – Modelo da tabela síntese dos resultados do controle individualizado (a nível de aerogerador)

	FABRICANTE
Disponibilidade de recursos (PADRÃO/OPCIONAL/DISPONÍVEL)	
Controle de Potência Reativa	
Controle de Fator de Potência	
Operação com vento nulo	
Injeção de corrente reativa em modo falta	
Controle de subfrequência (Inércia sintética)	
Controle de sobrefrequência	
Características do controle	
Terminal Considerado (Alta ou baixa do TR elevador)	
Curva (IxV, QxV, PxV) ou breve descrição de como o parque atua frente a afundamento/elevação de tensão	
Condições para entrada no modo falta afundamento/elevação de tensão (pickup/temporização)	
Condições para saída no modo falta afundamento/elevação de tensão (pickup/temporização)	
Curva de capacidade para operação com vento nulo, caso haja alteração?	
Curva ou uma descrição sucinta de como o parque atua frente a eventos de subfrequência	
Para atender a subfrequência existe uma folga no gerador?	
Após algum tempo ele passará reduzirá a Potência prévia?	
Curva ou uma descrição sucinta de como o parque atua frente a eventos de sobrefrequência	
Consumo de Potência ativa durante defeito	

Tabela 2 – Modelo da tabela síntese dos resultados do controle individualizado (a nível de parque)

	FABRICANTE
Disponibilidade de recursos (PADRÃO/OPCIONAL/DISPONÍVEL)	
Controle de Tensão	
Controle de Potência Reativa	
Controle de Fator de Potência	
Controle de Potência Ativa	
Características do controle	
Tensão considerada	
Temporização (intencional ou não) do controle	
Taxa de resposta dos controles	
Possibilidade de bloqueio para afundamento/elevação de tensão / conflito com controle individualizado	
Controle de potência ativa com desligamento de aerogeradores	

Tabela 3 – Modelo da tabela síntese dos resultados do controle para ANATEM

	FABRICANTE
Enviou Modelo	
Versão	
Modelo genérico	
Inicialização interna	
Enviou parametrização para cada parque	
Modelo separado aerogerador / parque	
Modelo TCDU	
Opcionais habilitáveis (Vento Nulo, Inércia Sintética, controle de parque, etc)	

2.2 Pesquisa Bibliográfica - Norma IEC 61400-27-1 (4)

A IEC 61400-27-1 aborda aspectos de modelagem e controle de aerogeradores/parques eólicos para análises de fluxo de potência e estabilidade eletromecânica em sistemas de potência de grande porte. Esta Norma estabelece modelos dinâmicos padrão para a representação de aerogeradores em estudos de estabilidade transitórios eletromecânico. Os modelos são concebidos a partir de uma estrutura modular genérica, conforme ilustrado na Figura 1.

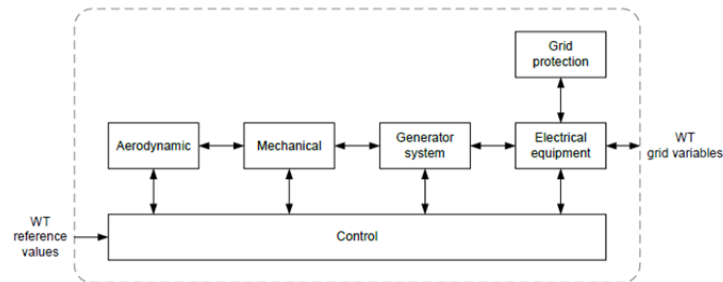


Figura 1 – Estrutura modular genérica de modelos para a representação de aerogeradores em estudos de estabilidade transitórios eletromecânico

É disponibilizada na referida Norma uma biblioteca com diferentes representações para cada um dos módulos da Figura (Aerodinâmico, Mecânico, Gerador, Proteção e Controle), e a partir dela, são definidos os modelos 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).

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

2.2.1 Especificações Gerais

Neste tópico da Norma são explicitadas as especificações que balizaram a concepção dos modelos dinâmicos do aerogerador e as condições operativas para as quais ele deve funcionar de forma adequada:

- Quatro categorias de aerogeradores existentes no mercado;
- Estrutura modular;
- Uso em estudos de estabilidade de sistemas de potência (sequência positiva) considerando as seguintes condições:
 - ✓ Resposta a curto-circuito simétrico no sistema de transmissão, situações em que a tensão pode chegar temporariamente à zero e de distúrbios de frequência na rede;
 - ✓ Sensível a modos de oscilação eletromecânicos (na faixa de 0,2 a 4 Hz);
 - ✓ Possibilidade de alterações nos valores de referência do sistema de controle do aerogerador.
- Variações de frequência na rede elétrica (recomendado +/- 6% da frequência nominal do sistema);
- Suportar numericamente situações com variações bruscas de ângulo de fase;
- Operar de forma contínua para faixas de tensão em regime permanente entre 0,85 p.u. e 1,15 p.u.;
- As proteções de sobre/subtensão e sobre/subfrequência devem ser modeladas, a fim de permitir uma representação realística da desconexão do aerogerador;
- As dinâmicas dos PLL (Phase Locked Loop) não estão incluídas nos modelos padrão por serem uma ordem de grandeza mais rápidas que as do controlador de potência da turbina;
- A inércia do conjunto turbina-gerador e a interação do modo mecânico torsional com o modo elétrico do sistema de transmissão devem ser levados em consideração nas situações em que possam ter influência significativa nas oscilações de potência;
- O modelo deve representar corretamente a capacidade de geração e absorção de potência reativa do aerogerador, bem como suas limitações;
- Também são feitas recomendações em relação ao funcionamento dos modelos nas ferramentas de simulação para tempos de simulação entre 10 e 30s, tais como:
 - ✓ Funcionamento de forma estável com passos de tempo de integração de ½ ciclo (0,00833s para 60 Hz);
 - ✓ Utilização de constantes de tempo mínima de duas vezes o passo de integração. Para passos de integração de ¼ de ciclo (0,00416s para 60 Hz), a constante de tempo mínima, seria de 0,0833s. Caso

alguma constante de tempo seja modificada para atender esse requisito, a precisão do modelo pode ser afetada;

- ✓ Os modelos devem ser auto-inicializados em condições de potência nominal ou parcial;
 - ✓ Condições externas, como a velocidade do vento, devem ser levadas em consideração implicitamente através da potência aerodinâmica disponível;
 - ✓ Os modelos devem ser numericamente robustos, para que possam ser aplicados em sistemas de nível de curto-circuito altos e baixos. Os fabricantes de equipamentos devem estabelecer a relação de curto-circuito mínima e/ou as condições do sistema para as quais o modelo é aplicável;
- Os modelos devem ser especificados através de diagramas de blocos, com explicação dos componentes não lineares, equações e condições de inicialização de forma a permitir a implementação em qualquer ferramenta computacional.

A Norma ressalta que os modelos padrão de aerogerador utilizam modelos genéricos para os sistemas de proteção e controle, o que pode provocar diferenças de resposta em relação aos sistemas específicos dos fabricantes.

2.2.2 Categorização de Parâmetros

A Norma faz uma categorização dos parâmetros dos modelos de aerogerador, como:

- Dependente de tipo (geralmente associados ao gerador, partes mecânicas e conexão elétrica);
- Dependente de projeto (ajustes de controle em função dos procedimentos de rede, por exemplo);
- Dependente do ponto de operação (faixa de potência reativa em função da potência ativa, potência ativa disponível em função do vento, por exemplo).

Esses parâmetros devem ser classificados e fornecidos pelos fabricantes. Essa classificação irá facilitar uma possível adequação do modelo original em relação a um modelo padrão.

2.2.3 Estrutura Modular

A Norma apresenta estruturas distintas para cada um dos quatro tipos de aerogerador apresentados. É mencionado que em determinadas situações a representação modular de um aerogerador pode ser diferente em função do fenômeno e do tipo de estudo a ser realizado. Por exemplo, em determinadas situações uma máquina do Tipo 3, pode ser representada por uma estrutura similar a uma máquina do Tipo 4. Dessa forma, deve-se avaliar o impacto das diversas malhas de controle no desempenho geral do equipamento para que se possam fazer possíveis simplificações visando melhorar o desempenho computacional dos modelos.

2.2.4 Modelos Detalhados dos Módulos

São fornecidas representações para os seguintes módulos:

- Módulo Aerodinâmico: são apresentadas três representações: torque aerodinâmico constante, modelo de primeira ordem e modelo de segunda ordem;
- Módulo Mecânico: é apresentado um modelo de duas massas;
- Modelos de Gerador: a Norma não especifica um tipo de modelo de gerador assíncrono e recomenda que seja adotado o modelo padrão da ferramenta de simulação utilizada. São especificados mais dois modelos de gerador para máquinas do Tipo 3 e um modelo para máquinas do Tipo 4;
- Modelos de Controle: são apresentados dois tipos de controle de pitch, controle da resistência do rotor de máquina de indução, controle de potência para máquinas do Tipo 3, dois controles de potência para máquinas do Tipo 4, controle genérico de potência reativa e representação das proteções.

Deve ser avaliada a aderência desses módulos em relação aos modelos disponibilizados pelos Agentes.

3.0 - PRINCIPAIS CONSTATAÇÕES

3.1 Consulta Técnica aos Fabricantes de Aerogeradores

De uma maneira geral a consulta técnica foi bastante proveitosa para o ONS e para os fabricantes, destacando-se os seguintes aspectos:

- O ONS pôde estreitar a relação com os fabricantes por meio do esclarecimento de várias de suas dúvidas e pela abertura de um canal para fornecer informações a respeito de suas necessidades e receber sugestões no que diz respeito ao tratamento e aos requisitos impostos aos aerogeradores e parques eólicos pelos Procedimentos de Rede.
- Foi constatado ainda que, para a maioria dos fabricantes a base de engenharia está sediada no exterior, o que impõe dificuldade para a fluidez na troca de informações e aumenta o tempo para resposta dos

questionamentos do ONS.

- Foi observado que entre os fabricantes há diferentes níveis de entendimento relativos aos requisitos constantes nos Procedimentos de Rede, em especial no submódulo 3.6 e que, neste sentido, cabem algumas adequações ao texto para detalhar melhor alguns dos requisitos. Ainda com relação aos Procedimentos de Rede, mais especificamente no que diz respeito à revisão 2016.12 do submódulo 3.6, verificou-se que alguns fabricantes ainda estão se adequando aos novos requisitos.
- Alguns fabricantes comentaram que para atendimento a alguns dos itens da nova versão do submódulo 3.6 dos Procedimentos de Rede, seus equipamentos precisam somente de pequenas adequações em firmware ou hardware.
- Do correto entendimento do comportamento dos controles dos aerogeradores e parques eólicos, notadamente frente a variações das grandezas elétricas do sistema, pôde-se estabelecer um panorama de como cada plataforma de aerogeradores funciona, esclarecendo alguns pontos que, somente pela leitura da documentação usualmente fornecida para os estudos pré-operacionais, ainda permaneciam em aberto.
- Constata-se que há situações em que o fabricante é responsável pelos aerogeradores e pela rede interna do parque e o proprietário da usina pelo sistema coletor que faz a interface com a rede elétrica, podendo, este último, implementar estratégias de controle específicas para sua instalação em função dos recursos existentes.
- Não há entre os fabricantes um conhecimento aprofundado das ferramentas de simulação do CEPEL, comprometendo o entendimento, a troca de informações e a modelagem mais adequada/otimizada dos controles nestes programas computacionais, notadamente no programa ANATEM, via arquivos “.CDU”, assim como a respectiva documentação para análise do desempenho destes controles por parte do ONS.

A seguir algumas constatações com relação a aspectos específicos dos aerogeradores são apresentadas:

- **Ajustes dos aerogeradores:** Os fabricantes adotam um único ajuste para todos os aerogeradores da mesma família instalados no Brasil, salvo raríssimas exceções. Essa constatação é bastante importante e deve ser considerada na estratégia a ser adotada pelo ONS em relação à gestão de modelos de mesmo fabricante, mas fornecidos por diferentes agentes.
- **Controle de tensão:** Somente um fabricante comentou que existe a possibilidade de ter controle de tensão a nível de aerogerador e somente é aplicado quando opera de forma individualizada sem a necessidade de controle de parque, neste caso. Nos parques instalados no Brasil, salvo algumas exceções, o controle de tensão centralizado é lento, com tempo de resposta acima de 30s. Alguns parques já estão adotando sistemas de comunicação baseados em fibra ótica para sua operacionalização, no sentido de reduzir os tempos de latência. Não obstante, a versão vigente dos Procedimentos de Rede onde já é descrito em “controle contínuo da tensão”.
- **Controle de potência reativa ou fator de potência:** Foi comentado que o controle centralizado de potência reativa ou fator de potência ainda é uma forma mais utilizada, visando também a redução de perdas elétricas no sistema de escoamento interno do parque.
- **Suportabilidade LVRT e HVTR:** Todos os fabricantes atendem a curva de suportabilidade de subtensão (LVRT) e sobretensão (HVTR) definidas no submódulo 3.6 dos Procedimentos de Rede e ainda em alguns casos são capazes de operar com tensões muito mais severas do que o definido como requisito mínimo. Vale ressaltar que mesmo sendo capazes de operar com faixas de tensão maiores alguns ajustam suas proteções para os valores definidos nos Procedimentos de Rede.
- **Tensão para habilitar o modo de controle sob falta:** Observa-se que não havia no passado uma padronização de qual tensão (tensão de fase, monofásica, trifásica, sequência positiva) era utilizada para habilitar o modo falta, notadamente no que diz respeito a contribuição de potência reativa sob defeito. Porém os fabricantes comentaram que já estão utilizando a sequência positiva, conforme definido nos Procedimentos de Rede.
- **Contribuição de potência reativa sob defeito:** Os fabricantes comentaram que a contribuição de potência reativa sob defeito era, em alguns casos, um recurso opcional e que é limitado às características dos conversores, porém sua resposta quando solicitada pelo sistema é muito rápida. Para os novos aerogeradores já seria um padrão, devido aos requisitos mínimos exigidos.
- **Inércia Sintética (subfrequência):** A maioria dos fabricantes ainda está desenvolvendo essa funcionalidade, sendo que aqueles que já estão integrando aerogeradores com este requisito ainda estão em fase de testes e ajustes.
- **Controle de sobrefrequência:** Foi comentado pelos fabricantes que o controle de sobrefrequência é mais fácil de ser habilitado tal como já é realizado para um controle de potência ativa.
- **Comprovação do atendimento a requisitos e controles:** Alguns fabricantes comentaram que possuem certificação internacional de atendimento a requisitos de seus aerogeradores, a partir da realização de testes em campo a exemplo do desempenho sob falta. Outros testes de comissionamento/desempenho, em nível de parque, seriam realizados após a conclusão do empreendimento.

3.2 Principais Constatações sobre Aspectos de Modelagem para Estudos de Transitórios Eletromecânicos

3.2.1 Norma IEC 61400-27-1

Boa parte das recomendações citadas na Norma já vem sendo praticadas pelo ONS. Atualmente, os modelos são testados para diferentes condições operativas a exemplo da metodologia apresentada em (8) e é recomendado que seja auto inicializado para quaisquer pontos de operação. Contudo, além dos testes de funcionamento, deve ser verificado com os fabricantes/consultores a existência de especificidades na modelagem em função da aplicação destes modelos para analisar fenômenos com respostas em constantes de tempo aplicadas ao desempenho eletromecânico.

Outro trabalho que deve ser realizado é a identificação dos módulos presentes em cada modelo, de cada fabricante. A partir da especificação de quais dinâmicas devem ser representadas para cada tipo de análise, pode-se recomendar a inclusão de maiores detalhamentos nos modelos ou a exclusão/desconsideração de malhas não necessárias para os estudos realizados pelo ONS. Pode-se inclusive considerar uma representação distinta do mesmo modelo em função da análise a ser realizada.

Como desenvolvimento futuro, recomenda-se estabelecer métricas para avaliação do desempenho computacional dos modelos, de forma a obter uma maior eficiência nas simulações, não obstante a necessidade de validação dos modelos com a comparação de simulação com curvas reais de campo.

Por fim, a Norma menciona em diversos pontos sobre uma possível não aderência da resposta de um modelo padrão em comparação ao modelo detalhado do fabricante. Assim, é necessário fazer uma avaliação dos modelos disponibilizados pelos Agentes para identificar a viabilidade da utilização de um modelo padrão sem prejuízos de representatividade.

3.2.2 Aspectos Gerais para Modelagem

De uma maneira geral, e mesmo que existam diversos firmwares para equipamentos de um mesmo fabricante, o comportamento dos aerogeradores não se altera muito, desde que considerada a mesma tecnologia (DFIG ou Full converter), excetuando-se alguns recursos que um parque pode dispor a mais ou a menos que outro. Desta forma, a modelagem por fabricante poderá ser única por tecnologia, deixando livre a habilitação ou não de recursos extras disponíveis na máquina (Windfree, Inércia Sintética, Qextend, etc).

Por fim poderá ser vislumbrada até mesmo uma modelagem única padrão por tecnologia (DFIG e Full converter)(3) que poderá ser incorporada em linguagem de máquina (built-in) no programa ANATEM.

Em análises de regime permanente, utilizando programas de fluxo de potência como o Anarede, usualmente se espera que o sistema já esteja em situação estável, após atuação de todos os controles. Porém, como preconiza o item 5.2.6 (a) do submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede do ONS (2), também são realizadas simulações onde se deseja obter a resposta do sistema imediatamente após o desligamento de elemento(s) do sistema. Neste caso, verifica-se o comportamento do sistema logo após a atuação dos controles rápidos, ou seja, até 20 segundos. Nesta situação considera-se apenas a atuação da regulação de tensão em barras controladas por unidades geradoras, compensadores síncronos e estáticos, e de Sistemas Especiais de Proteção – SEP. Não deve ser levado em consideração, por exemplo, a atuação dos comutadores sob carga dos transformadores, inclusive os que possuem a comutação automática (relé 90), entre outros.

Desta forma, para a modelagem nos programas de fluxo de potência, somente deve-se modelar usinas eólicas como barra de geração – PV (especificação de potência ativa e tensão), caso a atuação do controle de tensão seja rápida (inferior a 10s). Para as usinas que não dispõem de controles de tensão rápidos, como medida paliativa visando o ajuste dos casos bases de simulação, poderá ser utilizada a barra dessas fontes como PV, porém ao final do ajuste retornar para barra PQ (especificação de potência ativa e reativa). Será analisado com o CEPEL a possibilidade de implementação de comando/opção para bloquear, seletivamente, o fornecimento de reativo (QLIM), tal como já é realizado para bloquear os transformadores com comutação sob carga variável (CTAP D).

A modelagem dos aerogeradores no programa ANATEM é realizada de três formas:

- Gerador de indução com dupla alimentação (Gerador assíncrono) com controles definidos pelo usuário para o controle de turbina e para os controles de conversor (DMDF e DDFM);
- Fonte de corrente shunt controlada (DFNT);
- Carga dinâmica controlada (DLDN).

A modelagem do controle de parque poderá estar separada da modelagem do controle do aerogerador, visto que nem todos os parques dispõem deste recurso e que o controle de parque pode ser, em alguns casos, fornecido por um fabricante terceiro. A Norma menciona que está sendo elaborada uma versão que trata especificamente do controle de parque, a IEC 61400-27-2 que poderá balizar a elaboração de um controle de parque padrão.

Mesmo que não seja factível a implementação de um modelo genérico, por conta de especificidades dos controles, pode ser definido módulos padrão que tenham similaridade entre os diversos fabricantes (proteção, por exemplo).

É necessária a atualização dos modelos em função da evolução das ferramentas de simulação, sempre que forem disponibilizados mais recursos para realizar a implementação dos diagramas de bloco. Também deve ser levada em consideração na concepção dos modelos, a utilização dos códigos de otimização automática do ANATEM, recurso este disponível nas últimas versões. Esse recurso elimina de forma automática as malhas de controle inativas, permitindo manter a flexibilidade dos modelos, sem prejuízo dos tempos de processamento.

4.0 - CONCLUSÃO

Em virtude do aumento da participação das fontes de 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.

Neste contexto, o ONS promoveu uma série de discussões junto aos fabricantes de aerogeradores, realizando uma consulta mais estruturada sobre o assunto, na forma de questionário e, adicionalmente, uma pesquisa bibliográfica sobre os aspectos de modelagem de parque eólicos para estudos de transitórios eletromecânicos, adotando como referência a Norma IEC 61.400-27-1 – “Modelagem e controle de aerogeradores/parques eólicos para análises de fluxo de potência e estabilidade eletromecânica em sistema de potência de grande porte”.

Destas ações, foram obtidos subsídios para orientação aos fabricantes de aerogeradores e aos agentes visando adequar a representação dos parques eólicos na base de dados de transitórios eletromecânicos de forma mais fidedigna possível ao comportamento real relativo ao fenômeno em que estão sendo analisados, aliada a uma codificação que proporcione um desempenho computacional adequado, tendo-se em vista a grande proliferação de parques eólicos no SIN.

Da mesma forma, o conhecimento mais detalhado dos modos de controle também permitiu definir uma representação mais adequada desta fonte nos estudos de fluxo de potência e identificar aperfeiçoamentos em sua representação neste âmbito de estudo, assim como recomendar alterações nos modos de controle, visando um melhor desempenho do sistema em diversas condições operativas.

Por fim, a partir deste trabalho foi identificada a necessidade de seu desdobramento em diversas ações, as quais se encontram em andamento, e proporcionarão benefícios para a adequada representação também de parques fotovoltaicos de grande porte, que já começaram a ser instaladas no Brasil.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1). Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Submódulo 3.6 dos Procedimentos de Rede - Recomposição da Rede de Operação após perturbação,” dezembro 2016. [Online]. Disponível: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. [Acesso em abril 2014].
- (2). Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Submódulo 23.3 dos Procedimentos de Rede - Recomposição da Rede de Operação após perturbação,” dezembro 2016. [Online]. Disponível: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. [Acesso em abril 2014].
- (3). 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.
- (4). International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 61400-27-1:2015, “Wind turbines - Part 27-1: Electrical simulation models - Wind turbines”, 13 de fevereiro de 2015.
- (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), “Modelo de Relatório Comissionamento de Parques Eólicos – Versão 2”, dezembro de 2017.
- (7). Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), ONS DPL 335/2018, “Representação da geração eólica do SIN nas análises de transitórios eletromecânicos – instruções e dados para simulação”, dezembro de 2018.
- (8). A. R. GASPAR, A.D.R. MEDEIROS, A.N.C. ALBUQUERQUE, W.CORREA, A.C. NETTO, A.S. NETO, F.M.C. FERREIRA, L.M.S. ABREU, P.E.M. QUINTÃO, P.H.L. SANTOS; “Avaliação do Desempenho de Modelos de Aerogeradores para Estudos de Transitórios Eletromecânicos”; XIV SEPOPE; 2018; Recife/Brasil.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rotay Gaspar – Nascido no Rio de Janeiro/RJ em 11/08/1981. Possui graduação em Engenharia Elétrica (2005) pela Universidade Federal Fluminense, especialização em Proteção de Sistemas Elétricos (2007) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e especialização em Sistemas de Energia Elétrica CESE (2008) pela Universidade Federal de Itajubá. Desde 2003 trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, atuando hoje na Gerência de Engenharia Sul, em Florianópolis.

André Della Rocca Medeiros – Nascido em Lages/SC em 02/01/1969. Possui Graduação (1991), Mestrado (1993) e Doutorado (2003) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina e especialização em Administração CAISE/MBA pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2009). Desde 2000 trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS atuando hoje como gerente da Gerência de Engenharia Sul, em Florianópolis.

André Nascimento Cavalcanti de Albuquerque – Nascido em Pato Branco/PR em 20/02/1987. Possui graduação em Engenharia Elétrica (2008) pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, e mestrado em Engenharia Elétrica (2011) pela Universidade Federal de Santa Catarina. Desde 2011 trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, e atua na Gerência de Engenharia Sul, em Florianópolis.

Antonio Felipe da Cunha de Aquino – Engenheiro eletricitista formado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ em 1999, com mestrado (2000) e doutorado (2012) em engenharia elétrica pela COPPE/UFRJ. Possui pós-graduação *latu sensu* em Proteção de Sistemas Elétricos pela UFRJ (2003) e MBA em Administração pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ (2009). Trabalhou por 20 anos no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS com análise de sistemas de potência. Em 2019 ingressou na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), como professor adjunto do Departamento de Energia Elétrica e Eletrônica.

Flávia Maria Cavalcante Ferreira – Nascida em Recife/PE em 12/07/1972. Possui Graduação (1996) e Mestrado (1998) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco e especialização em Administração CAISE/MBA pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2011). Desde 2000 trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, e atualmente atua como engenheira na Gerência de Engenharia do Norte e Nordeste, em Recife.

Haroldo Gebien Filho – Nascido no Rio de Janeiro/RJ em 16/01/1959. Possui graduação em Engenharia Elétrica (1981) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, especialização em Sistemas de Energia Elétrica – CESE (1997) pela Universidade Federal de Itajubá. Desde 2000 trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, onde atualmente atua na Gerência de Engenharia Sul, em Florianópolis

José Mario Mamfrin Capano Junior – Nascido em Porto Alegre/RS em 09/07/1965. Possui Graduação (1987) em Engenharia Elétrica pela UFSC, Pós-Graduação/Especialização em Controle e Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência (1993) pela UFSC e MBA em Administração de Negócios (CAISE) pela PUC-RJ (2006). Trabalha como Engenheiro Eletricista na área de Sistemas de Potência desde 1987, na Promon Engenharia, Eletrosul Centrais Elétricas e a partir de 2000 no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, onde atuou como Engenheiro Sr, Coordenador e Gerente das áreas de Programação Eletroenergética, Hidrologia, Programação de Intervenções, Planejamento da Operação, Proteção e Estudos Especiais do Núcleo Sul, em Florianópolis, sendo que desde 2013 atua como Especialista na Gerência de Engenharia do ONS, em Florianópolis.

Monica Falcão Souto – Nascida em Garanhuns/PE em 16/05/1959. Possui Graduação (1981) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Pernambuco e Pós-graduação em Análise de Sistemas de Potência na Universidade Federal de Campina Grande (1989). Desde 2000 trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS e atualmente atua como engenheira na Gerência de Engenharia do Norte e Nordeste, em Recife.

Pedro Henrique Lourenço dos Santos – Nascido em Resende/RJ em 11/12/1984. Possui graduação em Engenharia Elétrica (2010) e mestrado em Engenharia Elétrica (2014) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Desde 2010 trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, e atualmente atua na Gerência de Planejamento de Curto Prazo, no Rio de Janeiro.