

Comité de Estudio CE – Título del Comité de Estudio CE

**ASPECTOS METODOLÓGICOS E DE MODELAGEM EM ESTUDOS DE
TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS COM GRANDE
CONCENTRAÇÃO DE PARQUES EÓLICOS**

DÊIBSON SENA*
ANDESA
BRASIL

ÁLVARO RAMOS
ANDESA
BRASIL

RODRIGO VALENÇA
ANDESA
BRASIL

JOSÉ SANDRO VALENÇA*
ANDESA
BRASIL

***Resumo** – A modelagem de aerogeradores e rede “coletora” em média tensão de parques eólicos para estudos de Transitórios Eletromagnéticos (TEM) é um assunto bastante pertinente e de ampla discussão no setor elétrico brasileiro, que tenta ponderar a fidelidade de sua representação com o esforço computacional associado em simulações digitais. Esse trabalho apresenta algumas metodologias de representação do sistema de média tensão e dos aerogeradores para estudos de TEM com o programa ATP (Alternative Transientes Program) de um Complexo Eólico com 231MW de potência instalada. Para avaliar os resultados das metodologias, foram realizadas diversas simulações digitais com o ATP, comparando a representação detalhada do sistema de média tensão do Complexo Eólico com as metodologias com foco na resposta em frequência. Adicionalmente, foram realizadas simulações no domínio do tempo com os aerogeradores fornecidos pelo fabricante e comparados com sua representação por fonte de tensão e fonte de corrente para manobras de equipamentos, como energização de transformadores analisando as semelhanças e diferenças entre as metodologias abordadas.*

***Palavras chave:** ATP – Transitórios Eletromagnéticos – Vector Fitting – Aerogeradores – Impedância Harmônica*

1 INTRODUÇÃO

A modelagem de aerogeradores e rede “coletora” de média tensão de parques eólicos para estudos de Transitórios Eletromagnéticos é um assunto bastante pertinente e de ampla discussão no setor elétrico brasileiro que tenta ponderar a fidelidade de sua representação com o esforço computacional associado nas simulações digitais em programas como o ATP/EMTP, PSCAD entre outros. Alguns fabricantes fornecem os modelos dos aerogeradores juntamente com a representação do sistema de média tensão na forma de equivalentes. Outros fabricantes fornecem apenas o modelo dos aerogeradores, que por sua vez, são extremamente complexos e detalhados. Esses modelos complexos associados a uma expressiva rede de média tensão exigem um alto esforço computacional que, para uma representação detalhada de um parque eólico em um sistema de transmissão com grande concentração de geração eólica, é impraticável para estudos de TEM devido aos limites computacionais dos programas. Desta forma, faz-se necessário uma representação mais simplificada ou equivalente da rede “coletora” e dos aerogeradores.

Esse trabalho apresenta algumas metodologias e/ou formas de representação do sistema de média tensão e dos aerogeradores para estudos de TEM com o programa ATP de um Complexo Eólico com 231MW de potência instalada conectado a um sistema de transmissão com elevada concentração de geração eólica.

2 REPRESENTAÇÕES DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO E DO COMPLEXO EÓLICO

2.1 Configuração do Sistema Elétrico de Transmissão

A Figura 1 apresenta um diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico de transmissão representado para estudos de Transitórios Eletromagnéticos de baixa frequência como energização de transformadores, rejeição de carga, manobras de reatores, chaveamento de banco de capacitores e outros, considerando parâmetros reais das linhas de transmissão e transformadores com suas curvas de saturação cujos modelos computacionais estão no formato do programa ATP [1].

A configuração do sistema de transmissão do SIN (Sistema Interligado Nacional) foi baseada nos casos bases de referência de fluxo de potência e curto circuito disponíveis no *site* do ONS (Operador Nacional do Sistema) no horizonte de 2015 em carga mínima com o sistema em condição normal de operação.

As linhas de transmissão que interligam as diversas subestações do SIN foram modeladas por parâmetros distribuídos. Os equivalentes de curto-circuito dos barramentos de fronteira foram obtidos do programa ANAFAS/CEPEL [2] e representados por um circuito RL mutuamente acoplados conforme as diretrizes em [3]. Os transformadores modelados através do “*Saturable Transformer – ATP*”. As gerações hidráulicas foram representadas por fontes de tensão ideais “*Type 14 – ATP*” atrás de suas respectivas reatâncias subtransitórias. Os reatores de linha, de barra e cargas foram representados por circuitos RLC concentrados. As gerações eólicas conectadas nesse sistema, com exceção do Complexo Eólico, foram representadas por fontes de correntes ideais “*Type 14 – ATP*” dada à indisponibilidade dos modelos reais dos aerogeradores.

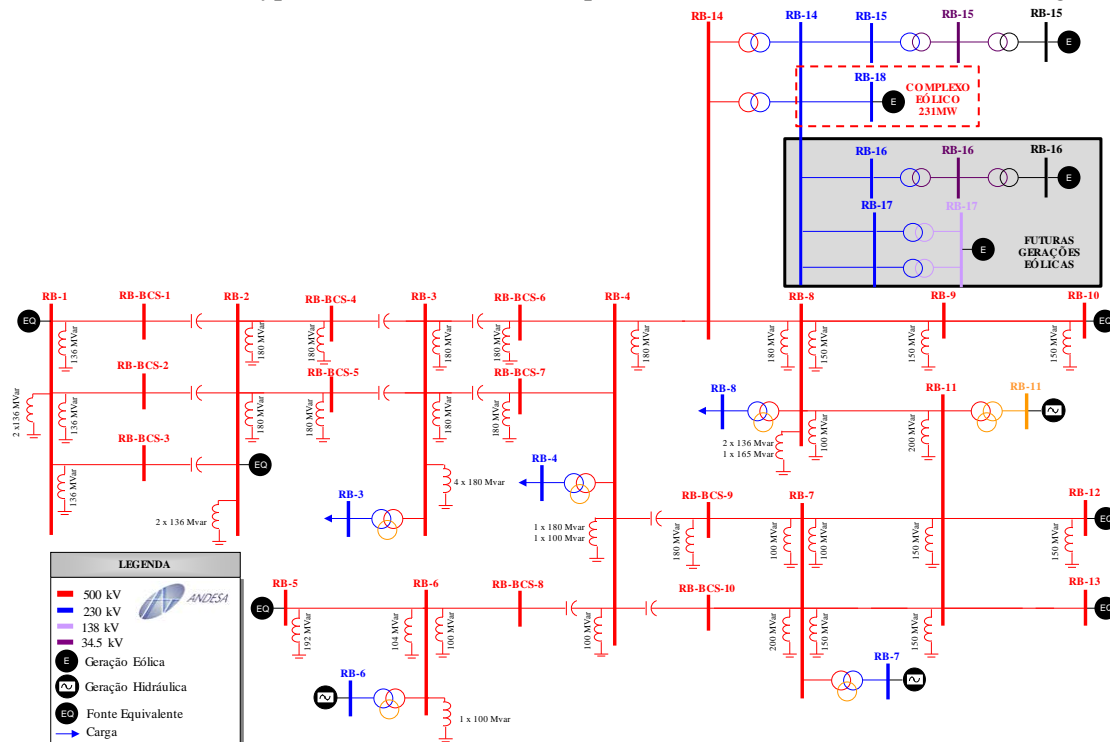


Fig. 1. Diagrama unifilar da configuração simplificada do Sistema Elétrico de transmissão

2.2 Configuração e Conexão do Complexo Eólico

O Complexo Eólico é conectado ao SIN no barramento RB-14 através de uma linha de transmissão aérea em 230kV com 77km de extensão e é composto por dois transformadores 230/34,5kV – 120MVA (TR1 e TR2). Os barramentos em 34,5kV são separados e constituem os barramentos “coletores” da rede de média tensão. Este Complexo é composto por 8 parques eólicos que somados possuem 132 aerogeradores, sendo 67 conectados ao TR1 e 65 ao TR2 que são interligados através de cabos aéreos de média tensão com seus respectivos transformadores elevadores individuais. A Figura 2 apresenta o diagrama unifilar com a configuração do Complexo Eólico e sua conexão ao SIN. Devido ao número expressivo de elementos que compõem o Complexo Eólico, a rede “coletora” foi desenhada com poucas unidades de aerogeradores. As formas de representação e modelagem da rede coletora do Complexo Eólico que é composta por cabos de média tensão, transformadores individuais e aerogeradores serão apresentadas no item 3.

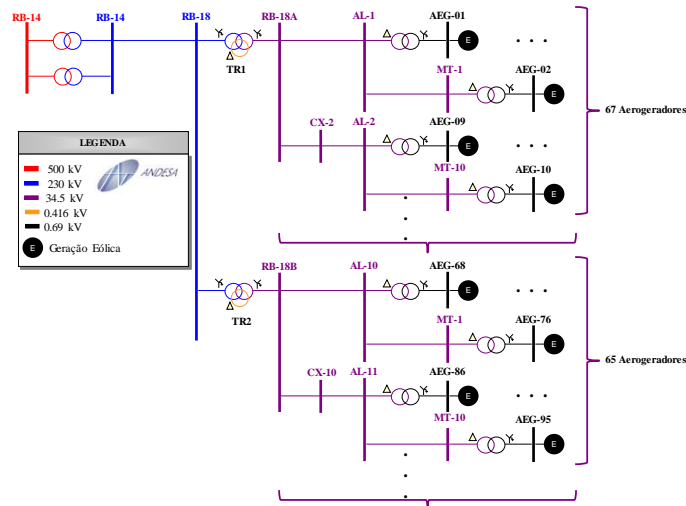


Fig. 2. Diagrama unifilar da configuração simplificada e conexão do Complexo Eólico

3 REPRESENTAÇÃO DA REDE COLETORA E DOS AEROGERADORES

A representação de sistemas de transmissão com grande quantidade de parques eólicos instalados e em operação é um grande desafio com relação a estudos de transitórios eletromagnéticos (TEM). Nestes estudos, o detalhamento dos elementos que compõem o sistema é de extrema importância para a fidedignidade das simulações e conclusões das análises realizadas. Diante disso, procura-se sempre a representação detalhada desses elementos em estudos de TEM, mas quando se analisa sistemas com grande quantidade de parques eólicos, as representações detalhadas tanto do sistema quanto dos parques eólicos, tornam-se impraticáveis devido à limitação da capacidade dos programas computacionais de simulação.

Em geral, os parques eólicos são compostos por uma grande quantidade de aerogeradores conectados através de transformadores individuais que são interligados por cabos de média tensão. A representação detalhada dessa rede “coletora” e dos aerogeradores com seus sistemas de controle associados acarretam em elevados tempos de processamentos para as simulações digitais, o que motiva a busca por formas de representações simplificadas ou equivalentes de parques eólicos em sistemas com grande concentração de geração eólica, haja vista que os estudos exigidos pelo ONS são sistêmicos e tem o objetivo de quantificar as solicitações transitórias impostas aos SIN na entrada em operação de parques eólicos.

Na literatura existem diversas formas de representação de equivalentes de redes, mas nesse trabalho serão apresentadas três metodologias distintas, quais são:

1. **Metodologia 1:** Fornecida pelo fabricante dos aerogeradores que considera a maior distância elétrica entre o aerogerador e o barramento “coletor” do sistema de média tensão;
2. **Metodologia 2:** Representação dos principais alimentadores como linhas de transmissão a parâmetros distribuídos e uma capacitância equivalente dos demais cabos no barramento de média tensão;
3. **Metodologia 3:** Representação da rede “coletora” através da síntese de circuitos RLC obtidos a partir da resposta em frequência utilizando pólos e resíduos calculados através da ferramenta “*Vector Fitting*”.

3.1 REDE COLETORA

Com o objetivo de comparar as metodologias com relação à variação de frequência, foram realizadas análises de resposta em frequência utilizando a rotina “*Frequency Scan*” do ATP para avaliar a impedância harmônica vista do ponto de conexão e dos barramentos coletores para as 3 metodologias:

a) **Metodologia 1**

O fabricante dos aerogeradores fornece o modelo do Complexo Eólico de forma equivalente desde o ponto de conexão até os aerogeradores. Essa metodologia utilizada pelo fabricante representa a máxima distância elétrica entre o aerogerador e a subestação “coletora”. A Figura 3 apresenta um diagrama unifilar para exemplificar a implementação dessa metodologia e seus cálculos inerentes.

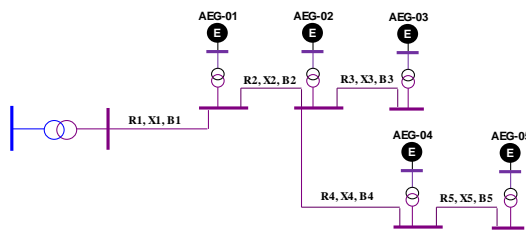


Fig. 3-(a). Rede “coletora” de média tensão representada detalhadamente

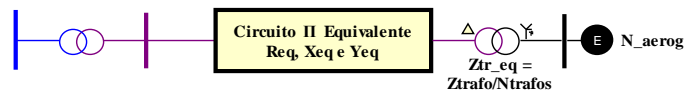


Fig. 3-(b). Rede “coletora de média tensão representada pela metodologia 1

As reatâncias e resistências dos cabos de média tensão são multiplicadas pelo número de aerogeradores que compõem um determinado alimentador e são normalizadas pelo número total de aerogeradores do mesmo. A capacitância equivalente é o somatório de todas as capacitâncias da rede de média tensão. Os transformadores individuais são representados por um único transformador equivalente cuja impedância é dividida pelo número de transformadores.

b) Metodologia 2

Essa metodologia tem como ideia principal a representação dos primeiros alimentadores da rede “coletora” de média tensão. Os cabos desses alimentadores são modelados como linhas de transmissão a parâmetros distribuídos e conectados em paralelo na existência de mais de um alimentador. As resistências e reatâncias dos demais cabos são desprezadas. A capacitância equivalente é o somatório das capacitâncias dos cabos remanescentes, ou seja, que não pertencem aos primeiros alimentadores. Esta representação depende muito da característica de cada rede coletora, podendo apresentar resultados mais ou menos fieis de acordo com as distâncias nos primeiros alimentadores. A Figura 4 apresenta um diagrama unifilar para exemplificar a implementação dessa metodologia.

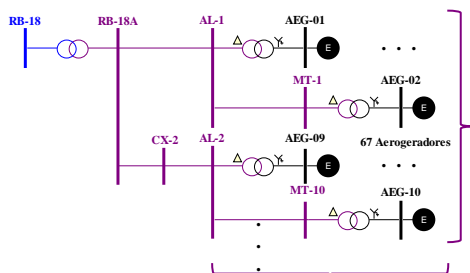


Fig. 4-(a). Rede “coletora” de média tensão representada detalhadamente

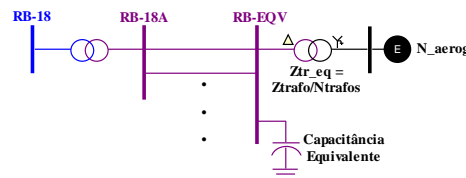


Fig. 4-(b). Rede “coletora de média tensão representada pela metodologia 2

c) Metodologia 3

Essa metodologia esta baseada na síntese de circuitos RLC obtidos analiticamente a partir de pólos dominantes e resíduos associados. Os cálculos dos pólos e resíduos podem ser obtidos a partir da resposta em frequência da impedância de sequência positiva da rede “coletora” representada detalhadamente, utilizando o programa HarmZs/CEPEL [4] ou ferramenta de ajuste vetorial, utilizada neste trabalho, “*Vector Fitting*” [5-6]. A função de transferência da rede pode ser representada por um somatório de frações parciais e este somatório representa as impedâncias primitivas do sistema detalhado que se deseja equivaler. A escolha da quantidade de pólos para aproximação da rede é realizada de forma a tentar representar os pólos dominantes da função de transferência, que são aqueles que possuem os maiores módulos de resíduos associados. Uma quantidade de pólos pequena e que represente os pólos dominantes permite representar bem a resposta em frequência da rede completa sem resultar em uma grande quantidade de elementos nos circuitos RLC sintetizados. Os cálculos analíticos dos parâmetros dos circuitos RLC e sua representação podem ser observados em [7].

Os circuitos são conectados aos barramentos de conexão da rede “coletora” formando um sistema equivalente. A Figura 5 apresenta um diagrama unifilar para exemplificar a implementação dessa metodologia.

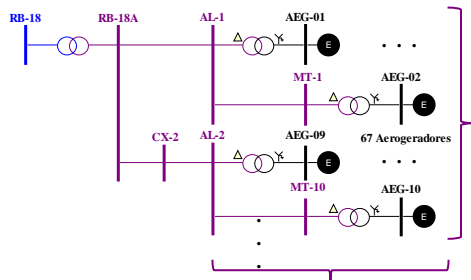


Fig. 5-(a). Rede “coletora” de média tensão representada detalhadamente

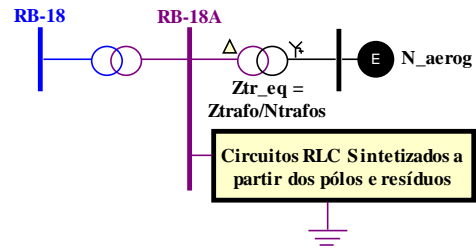


Fig. 5-(b). Rede “coletora de média tensão representada pela metodologia 3

3.2 AEROGERADORES

Outro tema bastante discutido no setor elétrico brasileiro é a forma de representação de aerogeradores para estudos de TEM. O ONS exige que os fabricantes disponibilizem os modelos específicos dos aerogeradores que possibilitem a representação de parques eólicos no programa ATP e devem atender alguns requisitos, tais como:

- Possibilitar a representação dos parques eólicos com “n” unidades por um aerogerador equivalente;
- Reproduzir o comportamento das tensões e correntes nos terminais do aerogerador, quando submetido a defeitos ou manobras no SIN (estudos sistêmicos);
- Ser capaz de reproduzir o comportamento dos aerogeradores e seus controles e proteção em condições de "ilhamento" dos parques eólicos (rejeição de geração).

Alguns fabricantes fornecem seus modelos extremamente detalhados acarretando elevados tempos de processamento nas simulações digitais e uma representação mais simplificada poderia atender as exigências do ONS tendo em vista que os estudos de TEM são sistêmicos. Nesse trabalho foram analisadas três formas de representação de aerogeradores para estudos de TEM que estão descritas a seguir:

- a) Os aerogeradores representados pelo modelo real fornecido pelo fabricante com todo sistema de controle e proteção implementados em “black box”;
- b) Os aerogeradores representados como fonte de tensão ideal;
- c) Os aerogeradores representados como fontes de corrente ideal.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

4.1 Análises no Domínio da Frequência

Com o objetivo de avaliar os resultados das metodologias abordadas para representação de sistemas equivalentes de média tensão de parques eólicos para estudos de TEM, foram realizados estudos de resposta em frequência de sequência positiva utilizando a rotina “Frequency Scan” do ATP. Todas as análises foram realizadas na faixa de 60Hz a 3000Hz com amostragem de 1Hz.

A Figura 6-(a) apresenta o diagrama unifilar simplificado da rede “coletora” de média tensão do Complexo cujos parques eólicos conectados ao TR1 (67 aerogeradores) foram representados detalhadamente para ser a base de comparação com as metodologias abordadas. Os cabos de média tensão com comprimentos iguais ou superiores a 2km foram representados como linhas de transmissão a parâmetros distribuídos e os inferiores a 2km como circuitos Π equivalentes. Os transformadores individuais modelados através do “Saturable Transformer – ATP”. A Figura 6-(b) apresenta a impedância harmônica vista do barramento RB-18A. Nessa análise foi representada apenas a rede “coletora” de média tensão para avaliar o comportamento da resposta em frequência observando possíveis ressonâncias séries ou paralelas.

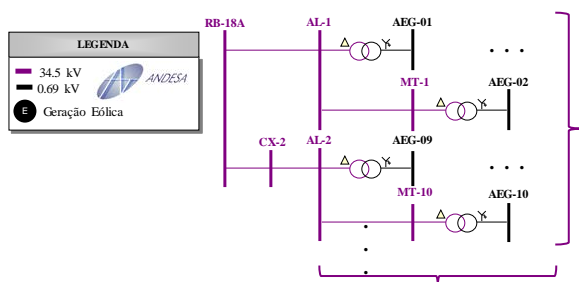


Fig. 6-(a). Rede “coletora” do Complexo Eólico representada detalhadamente

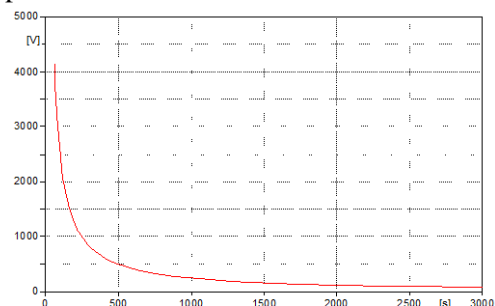


Fig. 6-(b). Impedância harmônica do RB-18A com a rede “coletora” representada detalhadamente

Verifica-se que o comportamento da rede “coletora” tem uma predominância capacitiva (*smooth functions*) sem ressonâncias séries ou paralelas. Nesse caso, as metodologias 1, 2 e 3 para esses tipos de rede cuja predominância é capacitiva apresentam resultados semelhantes e satisfatórios de resposta em frequência. Esse fato foi constatado, pois a partir dessa resposta em frequência, foram sintetizados os circuitos RLC da metodologia 3 e o valor da capacitância encontrado nos cálculos analíticos ficou muito próximo do valor do somatório das capacitâncias dos cabos de média tensão. Analisando outros parques eólicos conectados em distintos pontos do sistema, observa-se uma semelhança entre suas redes “coletoras” de média tensão que apresentam um comportamento com predominância capacitiva e assim, as metodologias 1 e 2 podem ser suficientes para serem utilizadas em estudos de TEM cujas redes apresentam esse comportamento. No caso de rede “coletoras” que apresentarem ressonâncias, a metodologia 3 é a mais indicada. Outro fato importante observado na literatura é que para redes que apresentem ressonâncias na faixa de 60Hz a 660HZ, as metodologias 1e 2 apresentam resultados satisfatórios.

A Figura 7-(b) apresenta a impedância harmônica vista do ponto de conexão (RB-18) comparando a rede “coletora” representada detalhadamente (curva vermelha) com as metodologias 1,2 e 3 de equivalência ou simplificação (curva verde, rosa e azul, respectivamente).

Observa-se que as curvas de resposta em frequência das metodologias 2 e 3 praticamente se sobrepõem as curvas da representação detalhada. Para a metodologia 1, verifica-se um amortecimento na magnitude da curva, mas as faixas de frequências são praticamente as mesmas. Esse amortecimento do pico das curvas é explicado, pois na obtenção do circuito Π equivalente, a resistência tem o maior valor comparado às outras metodologias. Dessa forma, para a representação deste Complexo Eólico em estudos de TEM, sob o ponto de vista de resposta em frequência, qualquer metodologia representa com fidelidade o sistema completo.

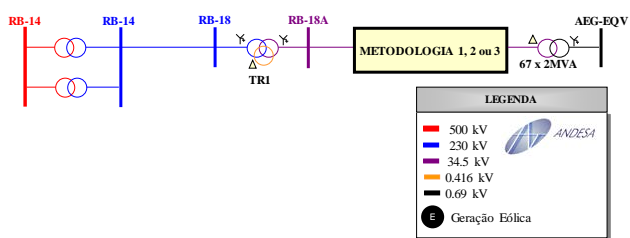


Fig. 7-(a). Sistema Complexo com a Rede “coletora” representada pelas metodologias 1, 2 e 3

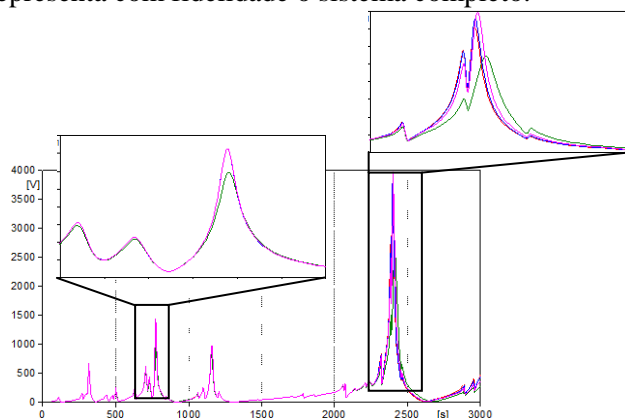


Fig. 7-(b). Impedância harmônica do RB-18 (representação detalhada e metodologias abordadas)

4.2 Análises no Domínio do tempo

Após as análises dos resultados de resposta em frequência das metodologias abordadas, foram realizadas diversas simulações digitais com o programa ATP no domínio do tempo para avaliar os resultados e formas de representação de tais metodologias comparando com a representação detalhada do Complexo Eólico.

As análises estão divididas em duas partes:

- **Parte 1:** Comparação do sistema da rede “coletora” de média tensão do Complexo Eólico representado detalhadamente com as metodologias abordadas de simplificação ou equivalência da rede “coletora” considerando o modelo real dos aerogeradores fornecidos pelo fabricante.
- **Parte 2:** Comparação do modelo real dos aerogeradores fornecidos pelo fabricante com a representação destes através de Fontes de Tensão e Fontes de Corrente considerando a rede “coletora” de média tensão representada detalhadamente.

4.2.1 Energização do Transformador TR2 do Complexo Eólico

Nesse item será analisado a energização em vazio do transformador TR2 230/34,5kV – 120MVA considerando o transformador TR1 230/34,5kV – 120MVA energizado em carga com a máxima geração possível. O sistema encontra-se na configuração normal de operação e em condição de carga mínima. A tensão de pré-manobra no barramento de 230kV (RB-18) foi de 1,03pu (fase-terra). Os parques eólicos do Complexo que estão conectados ao TR1 totalizam 116 MW de potência instalada e foram representados pelo modelo fornecido pelo fabricante, tanto na representação detalhada quanto nas metodologias.

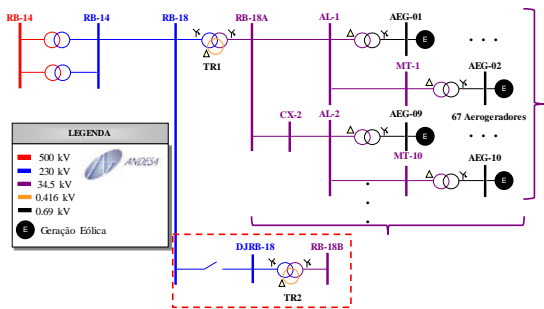


Fig. 8-(a). Rede “coletora” de média tensão representada detalhadamente

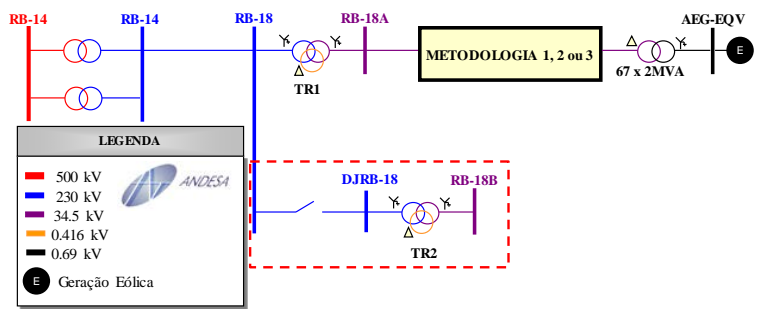


Fig. 8-(b). Rede “coletora de média tensão representada pelas metodologias abordadas

Nas Figuras 9 (a-d) apresentam o desempenho da representação detalhada (curva vermelha), Metodologia 1 (curva verde), Metodologia 2 (curva rosa) e Metodologia 3 (curva azul). Observa-se um comportamento satisfatório e dentro do esperado das tensões e correntes obtidas para esse tipo de manobra. As discretas diferenças são verificadas quando da ampliação das curvas tanto das tensões (Figuras 9-(a e b)) quanto das correntes de fase (Figura 9-(c)) e de neutro (Figura 9-(d)). Essa simulação corrobora com as respostas obtidas e metodologias abordadas nas análises de resposta em frequência. Assim, quando disponível apenas o modelo real de aerogeradores conectados em redes cuja predominância é capacitiva, as metodologias 2 ou 3 apresentam resultados semelhantes para estudos sistêmicos, ou seja, manobras externas aos parques eólicos. A metodologia 1 é geralmente é fornecida por alguns fabricantes de aerogeradores.

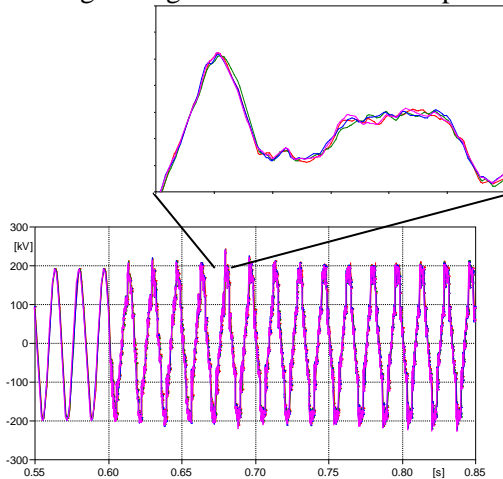


Fig. 9-(a). Tensão (fase “a”) fase-terra pico do barramento de 230kV (RB-18)

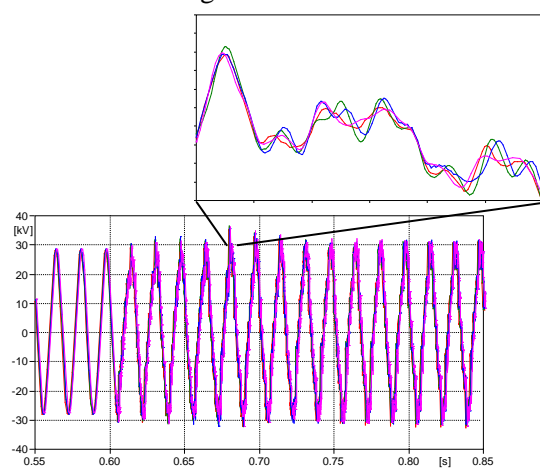


Fig. 9-(b). Tensão (fase “a”) fase-terra pico do barramento de 34,5kV (RB-18A)

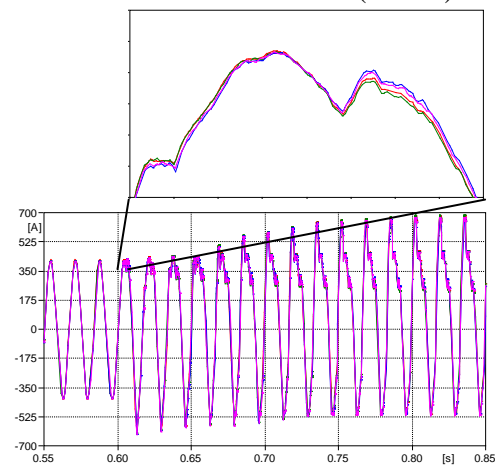


Fig. 9-(c). Corrente (fase “a”) de fase do TR1 durante a manobra de energização do TR2

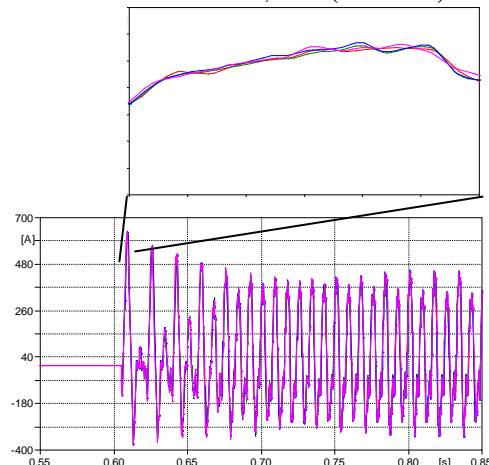


Fig. 9-(d). Corrente de neutro do TR1 durante a manobra de energização do TR2

Na indisponibilidade dos modelos reais dos aerogeradores, uma forma de representação é a utilização de fontes ideais de tensão ou corrente. Para avaliar as semelhanças e diferenças na forma de representação dos aerogeradores, foi realizada a simulação de energização do TR2 nas condições mencionadas anteriormente,

comparando o modelo real do aerogerador fornecido pelo fabricante com sua representação por fontes ideais de tensão e corrente (parte 2 das análises). As Figuras 10-(a-b) apresentam os resultados da simulação de energização do TR2. Observa-se que a representação por fonte de corrente (curva azul) reproduz com maior semelhança o modelo real fornecido pelo fabricante (curva vermelha) para esse Complexo Eólico. A representação dos aerogeradores por fontes ideais de tensão (curva verde), diante dos resultados apresentados, mostrou-se discretamente mais conservadora em relação ao modelo fornecido pelo fabricante. As análises realizadas devem ser mais exploradas realizando-se comparações com outros modelos reais fornecidos por distintos fabricantes, mas para a representação por fontes de corrente dos parques eólicos conectados na circunvizinhança do sistema na ausência dos modelos reais poderá ser suficiente.

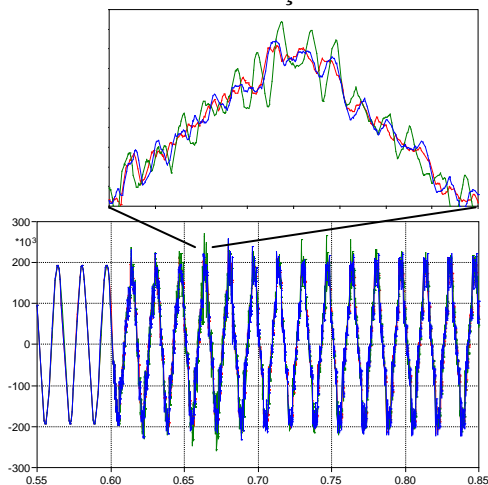


Fig. 10-(a). Tensão (fase “a”) fase-terra pico do barramento de 230kV (RB-18)

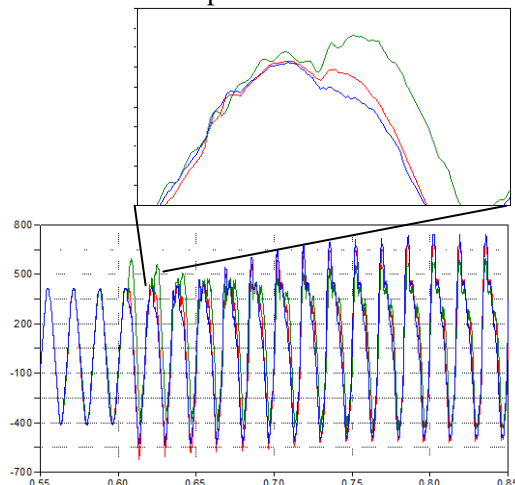


Fig. 10-(b). Corrente (fase “a”) de fase do TR1 durante a manobra de energização do TR2

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentadas 3 metodologias de representação de sistemas de média tensão de parques eólicos e aerogeradores para estudos de TEM. Um Complexo Eólico conectado a um sistema de transmissão com elevada concentração de geração eólica foi analisado. A rede “coletora” do Complexo, sob o ponto de vista de resposta em frequência, apresentou um comportamento de redes com predominância capacitiva e nas análises comparativas entre o sistema detalhado e as metodologias abordadas, os resultados foram satisfatórios, levando a conclusão que, para redes cujo comportamento tem predominância capacitiva, sua representação utilizando as metodologias 2 e 3 são suficientes para estudos sistêmicos de TEM. A Metodologia 1 geralmente é fornecida por alguns fabricantes. Em rede “coletoras” que apresentam ressonâncias séries ou paralelas, a metodologia 3 é a mais indicada, embora não tenha sido analisada nesse estudo e fica como sugestão para trabalhos futuros.

Para os aerogeradores, a representação por fontes ideais de corrente mostraram-se muito semelhantes quando comparadas com o modelo real fornecido pelo fabricante dos aerogeradores do Complexo. Ainda sim, faz-se necessário uma pesquisa mais aprofundada para tal representação.

6 REFERÊNCIAS

- [1] LEUVEN EMTP CENTER, “ATP – Alternative Transient Program – Rule Book”, Herverlee, Belgium, 1987.
- [2] ANAFAS – Análise de Faltas – Versão 7.0.0 – Manual do Usuário, Set. 2016.
- [3] Procedimentos de Rede, “Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos – Submódulo 23.3”, Rev. 2, Dez. 2010.
- [4] HarmZs – CEPEL – Versão 3.0 – Minuta do Manual de Utilização do Programa, Jul. 2016.
- [5] B. Gustavsen and A. Semlyen, “Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting”, *IEEE Trans.* Vol. 14, N 3, pp. 1052-1061, Jul. 1999.
- [6] B. Gustavsen and A. Semlyen, “Enforcing Passivity for Admittance Matrices Approximated by Rational Functions”, *IEEE Trans.* Vol. 16, N 1, pp. 97-104, Fev. 2001.
- [7] S. L. Varricchio, F. C. Véliz, F. D. Freitas e N. Martins, “Síntese de Equivalentes Dinâmicos de Redes Elétricas Multi-Conectadas”, em XII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica – SEPOPE, Rio de Janeiro, Mai. 2012.