



**Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência-GAT**

**AValiação DA REPRESENTAÇÃO DE CONVERSORES DE AEROGERADORES FULL CONVERTER EM ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS**

**RODRIGO BEZERRA VALENÇA(1); ALVARO JOSE PESSOA RAMOS(1); JOSE SANDRO VALENÇA DO NASCIMENTO FILHO(1); DEIBSON JOSE GOMES DE SENA(1); CARMEM LUCIA TAVARES(1); RAISSA(1); ANDESA(1);**

RESUMO

A modelagem de parques eólicos em estudos de transitórios eletromagnéticos no sistema elétrico brasileiro apresenta grandes desafios devido à quantidade de parques eólicos em operação, notadamente na região Nordeste do Brasil onde existe uma grande concentração de parques eólicos em subestações próximas. Um exemplo disso é a região de João Câmara, onde na subestação de João Câmara III está prevista a conexão de 1,4GW de geração eólica. Assim, quando se objetiva realizar um estudo de transitório eletromagnético em uma região com esta característica existe a necessidade de representar os parques eólicos presentes, seja simplificada com fontes ideais ou utilizando modelos dos aerogeradores fornecidos pelos fabricantes para o programa ATP.

Devido a grande complexidade envolvida nas representações de muitos parques eólicos, com diferentes fabricantes e tipos, os conversores dos aerogeradores são frequentemente representados simplificada na simulações de transitórios eletromagnéticos. O presente trabalho se propõe a avaliar os impactos de duas diferentes representações simplificada para os conversores em simulações de transitórios eletromagnéticos utilizando o programa ATP. As simulações realizadas neste trabalho consideram um parque eólico composto por aerogeradores *Full-Converter*, com o conversor do lado da rede representado em detalhes no programa ATP. As tensões e correntes obtidas com esta representação diante de afundamento de tensão e energização de transformador serão comparadas com duas representações alternativas para os conversores. A primeira representação considera a aplicação apenas da tensão de referência vinda do controle diretamente na rede utilizando uma fonte controlada trifásica de tensão. A segunda também utiliza uma fonte trifásica, mas acrescentando lógica PWM e calculando as tensões de saída do conversor usando equações para tentar emular o comportamento do conversor conectado à rede. Com esta segunda representação espera-se ter resultados mais fiéis a representação detalhada, mas com tempo de processamento reduzido.

A avaliação das simulações tem foco no impacto à rede básica e se concentram nos barramentos de 150kV e 31,5kV do parque eólico em análise. São avaliadas tensões e correntes destes barramentos com o parque eólico gerando potência máxima. Com o objetivo de realizar uma avaliação quantitativa das grandezas simuladas será utilizado o desvio médio quadrático como figura de mérito de avaliar as correntes e tensões nas diferentes representações em relação a modelagem detalhada dos conversores.

PALAVRAS-CHAVE

Transitórios eletromagnéticos, *Full-Converter*, *Windturbines*, PMW, Conversores, ATP Program

## 1.0 - INTRODUÇÃO

A maioria dos parques eólicos em operação na região Nordeste é composta por aerogeradores dos tipos *doubly-fed induction generator* (DFIG) e *Full Converter*. Os aerogeradores DFIG possuem o estator da máquina assíncrona diretamente conectado a rede, rotor interligado à rede através de um conversor, que geralmente possui 30% da potência total do aerogerador. O aerogerador do tipo *Full-converter* se conecta à rede através de um conversor com a mesma potência nominal do gerador. A representação destes inúmeros conversores em estudos de transitórios eletromagnéticos se mostra um desafio adicional devido a grande quantidade de elementos necessários à representação das pontes IGBT com suas chaves controladas e diodos em antiparalelo, além da representação da lógica de PWM - *Pulse Width Modulation* dentro do modelo ocasionando uma carga adicional e aumento no tempo de processamento. Assim, frequentemente estes conversores são negligenciados e representados de forma simplificada em simulações de transitórios eletromagnéticos.

O presente trabalho avalia os impactos de duas diferentes representações para os conversores em simulações de transitórios eletromagnéticos utilizando o programa ATP. Será utilizada a representação de um parque eólico composto por 14 aerogeradores *Full-Converter* em detalhes, ou seja, todos os aerogeradores e seus respectivos conversores representados individualmente com suas chaves de comutação, pulsos, lógica PWM, barramento DC, Chopper e filtros AC. O mesmo sistema de controle desenvolvido em linguagem MODELS foi utilizado para modelar os 14 aerogeradores individualmente no programa ATP.

A partir do modelo do parque eólico detalhado, são montadas dois novos modelos com representações simplificadas para os aerogeradores. O primeiro considerando a aplicação apenas das tensões **abc** de referência vindas do controle diretamente na rede utilizando uma fonte controlada trifásica de tensão. A segunda utilizando a mesma fonte, mas acrescentando a lógica PWM para tentar emular o comportamento do conversor conectado à rede.

A avaliação das simulações terá foco no impacto à rede básica e serão concentradas nos barramentos de 150kV e 31,5kV do parque eólico em análise. Serão avaliadas tensões e correntes destes barramentos com o parque eólico gerando potência máxima. As simulações de energização de transformadores e manobra de reator serão realizadas para comparar as alternativas. Com o objetivo de realizar uma avaliação quantitativa das grandezas simuladas será utilizado o desvio médio quadrático como figura de mérito de avaliação das representações.

## 2.0 - DESCRIÇÃO DAS REPRESENTAÇÕES

### 2.1 Modelagem do parque eólico estudado

A avaliação de representações alternativas para os conversores dos aerogeradores implica na necessidade de modelagem de um parque eólico com todos os aerogeradores representados individualmente e seus conversores representados detalhadamente para comparação dos resultados obtidos. Assim, um parque eólico composto por 14 aerogeradores *Full-Converter* foi modelado no programa ATP. A Figura 1 apresenta um diagrama do parque eólico utilizado para as simulações realizadas neste trabalho.

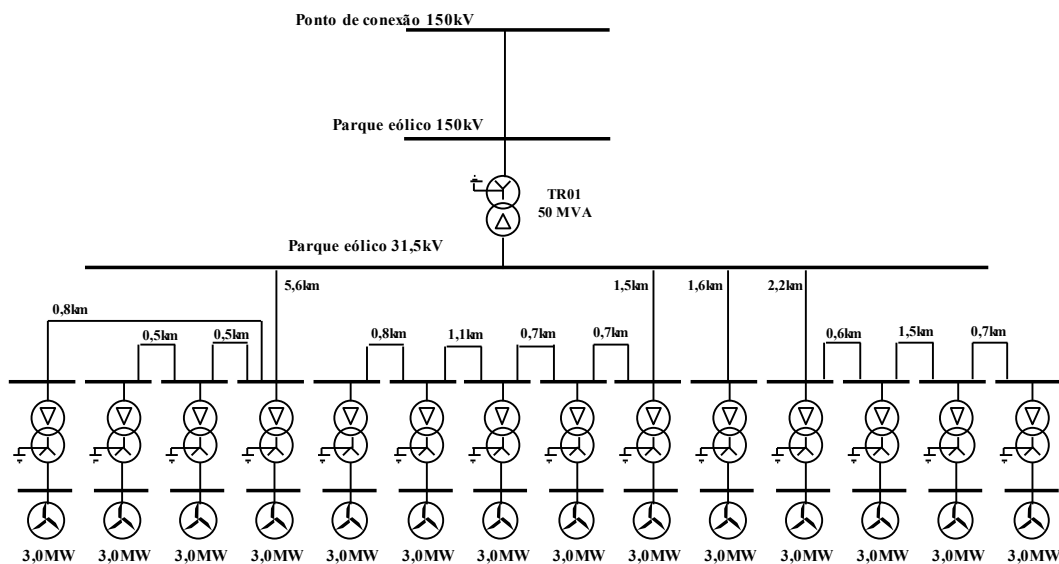


FIGURA 1 – Parque eólico modelado no programa ATP.

As análises são realizadas com a rede do complexo eólico desacoplada do restante do sistema com o objetivo de minimizar a iteração do sistema com a rede do complexo eólico. Assim, é utilizada uma potência de curto-circuito trifásica de 3000MVA no ponto de conexão. A partir do ponto de conexão, toda a rede do complexo é modelada em detalhe. Por simplificação, não são representados os para-raios existentes na subestação. As saturações dos transformadores elevadores dos aerogeradores 31,5/0,65kV de 3,45MVA e do transformador 150/31,5kV de 50MVA foram representadas.

## 2.2 Representação dos conversores

O parque eólico estudado foi representado de três formas diferentes. A primeira representação, denominada representação BASE foi realizada com todos os conversores dos aerogeradores representados individualmente por suas chaves de comutação, pulsos, lógica PWM, barramento DC, Chopper e filtros AC. Outras duas representações denominadas A e B foram realizadas:

A) Representação dos conversores por tensão controlada, que é exatamente a tensão de referência entregue pelo controle. A tensão aplicada à rede não irá possuir nenhum conteúdo harmônico por não ser resultado de comutação de chaves. Com esta representação, espera-se ter uma grande redução no tempo de processamento, mas sendo necessário avaliar o impacto desta nos resultados obtidos em relação à representação BASE.

B) Representação dos conversores por tensão controlada calculada através das equações matemáticas do conversor, onde os estados das chaves definem as tensões a serem aplicadas. Nesta representação, não existe um conversor representado detalhadamente no programa ATP, a tensão resultante tende a ser a mesma do conversor real, mas desprezando-se as quedas de tensão das chaves e tempo morto na simulação. Com esta representação espera-se aliar uma representação mais fiel a representação BASE, mas com tempo de processamento reduzido. As equações utilizadas para esta representação são apresentadas em (1).

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \frac{V_{cc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

## 3.0 - SIMULAÇÕES REALIZADAS

Neste trabalho são analisados dois eventos: Energização de um segundo transformador 150/31,5kV de 50MVA e simulação de um afundamento trifásico de tensão até 70% da tensão nominal no barramento de 31,5kV por 200ms mediante manobra de reator. Para realização das análises é considerado o mesmo conjunto de tempos ( $t_a, t_b$  e  $t_c$ ) para as diferentes simulações considerando a modelagem BASE, A e B. Também são considerados tempos de fechamento diferentes em cada fase ( $t_a \neq t_b \neq t_c$ ) devido aos diferentes tempos entre as fases em um disjuntor real. Com o objetivo de manter um padrão de comparação, são considerados: mesmo tempo total de simulação, mesmo passo e mesma frequência de amostragem para plotagem no arquivo de saída “.pl4”.

As simulações são realizadas com os aerogeradores gerando potência máxima e as grandezas analisadas são: tensão em 150kV/31,5kV e corrente no lado de 31,5kV do TR 150/31,5kV do parque eólico. No caso de energização de transformador também é analisada a corrente de fase e neutro do TR energizado. Como o mesmo evento será analisado com três representações diferentes para os conversores, as comparações estarão concentradas apenas na fase **a** das correntes e tensões. Apesar disso, a análise quantitativa das grandezas é realizada nas três fases. As manobras são realizadas a partir de t=2 segundos.

### 3.1 Energização de transformador

A simulação realizada neste item é a energização de um transformador 150/31,5kV de 50MVA. Os dois transformadores 150/31,5kV possuem mesmos parâmetros e curva de saturação. A Figura 2 apresenta a configuração analisada.

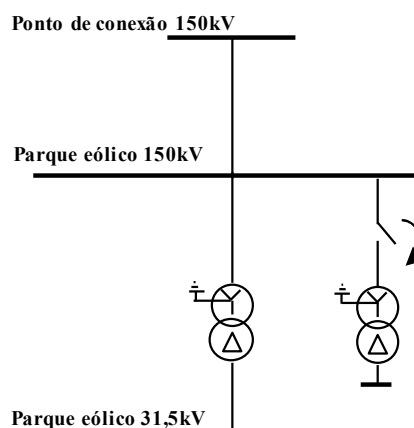


FIGURA 2 – Energização do TR02 150/31,5kV.

A Figura 3 apresenta as tensões no barramento de 150kV do parque eólico para energização do TR02 150/31,5kV comparando a fase **a** das tensões nas representações BASE, A e B.

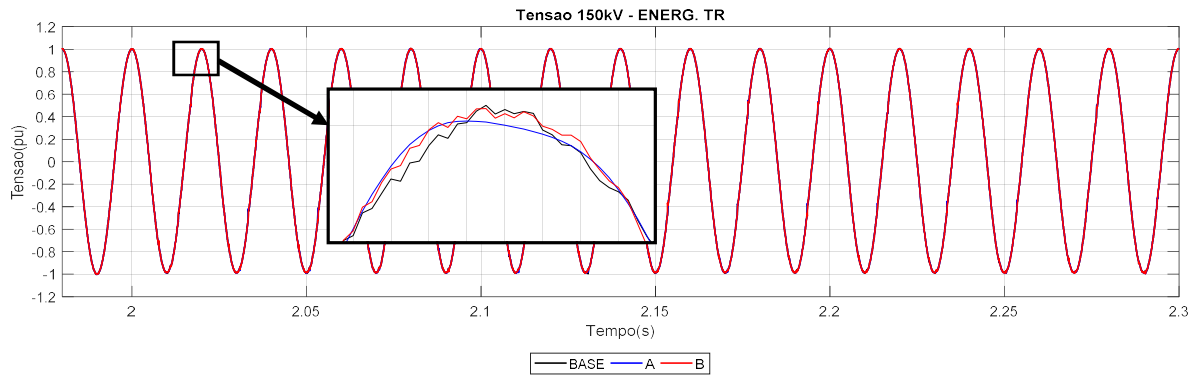


FIGURA 3 – Tensão 150kV para energização do TR02 150/31,5kV.

A Figura 4 apresenta as tensões no barramento de 31,5kV do parque eólico para energização do TR02 150/31,5kV.

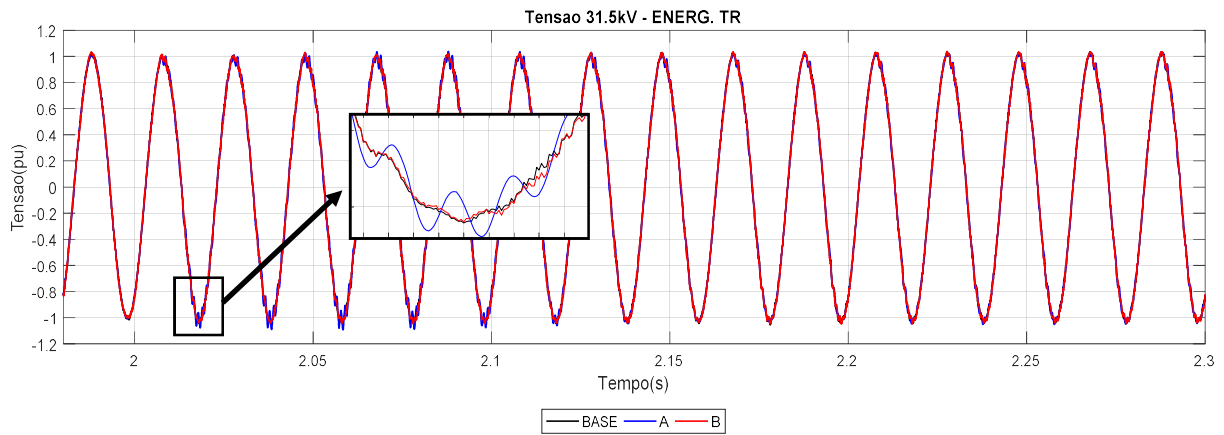


FIGURA 4 – Tensão 31,5kV para energização do TR02 150/31,5kV.

A Figura 5 apresenta as correntes de fase no lado de 31,5kV do TR01 150/31,5kV energização do TR02 150/31,5kV.

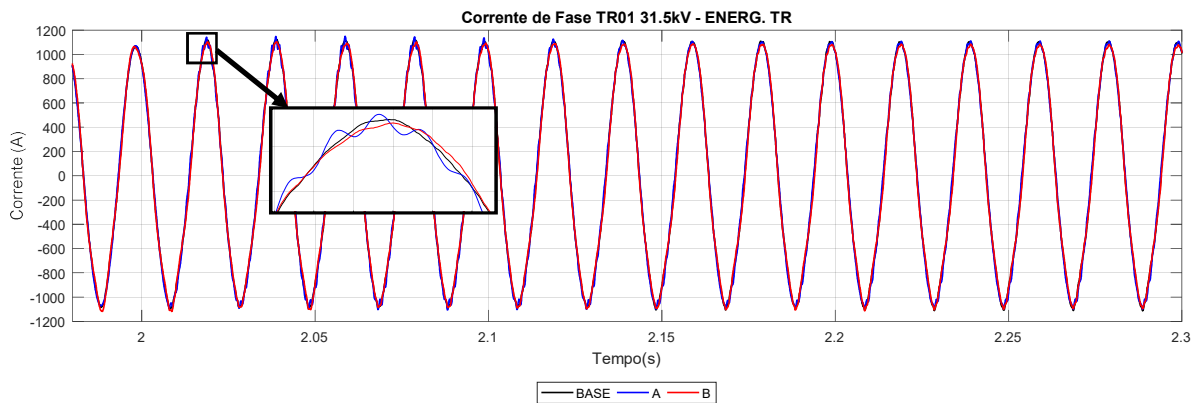


FIGURA 5 – Corrente de fase no lado de 31,5kV do TR01 150/31,5kV energização do TR02 150/31,5kV.

A Figura 6 apresenta a corrente de neutro do TR02 150/31,5kV energizado.

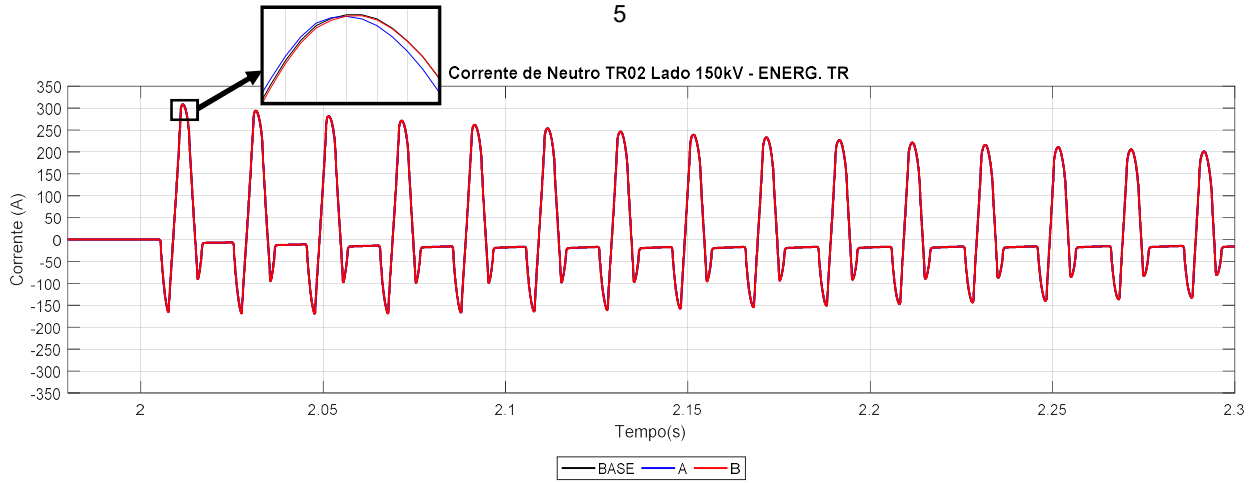


FIGURA 6 – Corrente de neutro lado 150kV do TR02 150/31,5kV energizado.

### 3.2 Afundamento de tensão

A simulação realizada neste item é um afundamento de tensão no barramento de 150kV até 70% da tensão nominal. A Figura 7 apresenta a tensão do barramento de 150kV para as representações BASE, A e B.

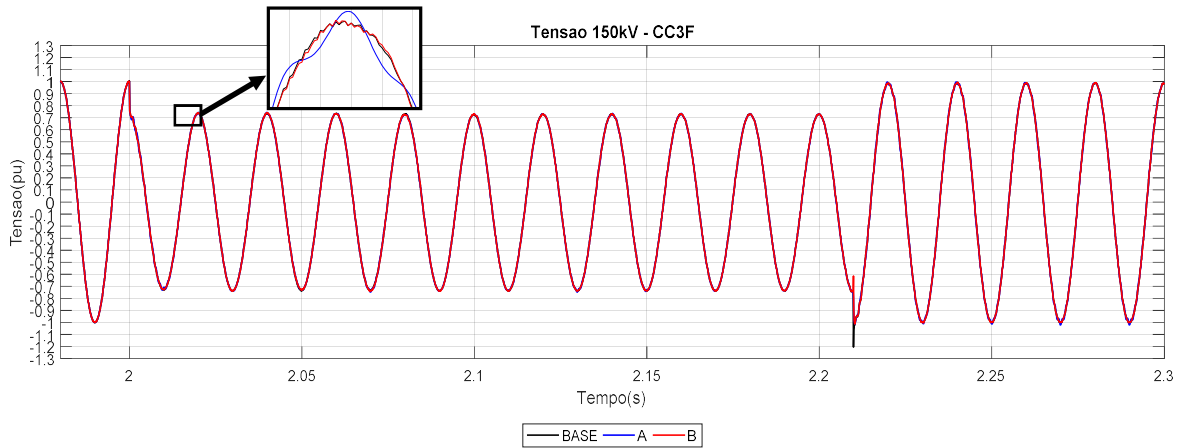


FIGURA 7 – Tensão barramento 150kV para afundamento de tensão até 70% da tensão nominal.

A Figura 8 apresenta as tensões no barramento de 31,5kV do parque eólico para afundamento de tensão até 70% da tensão nominal.

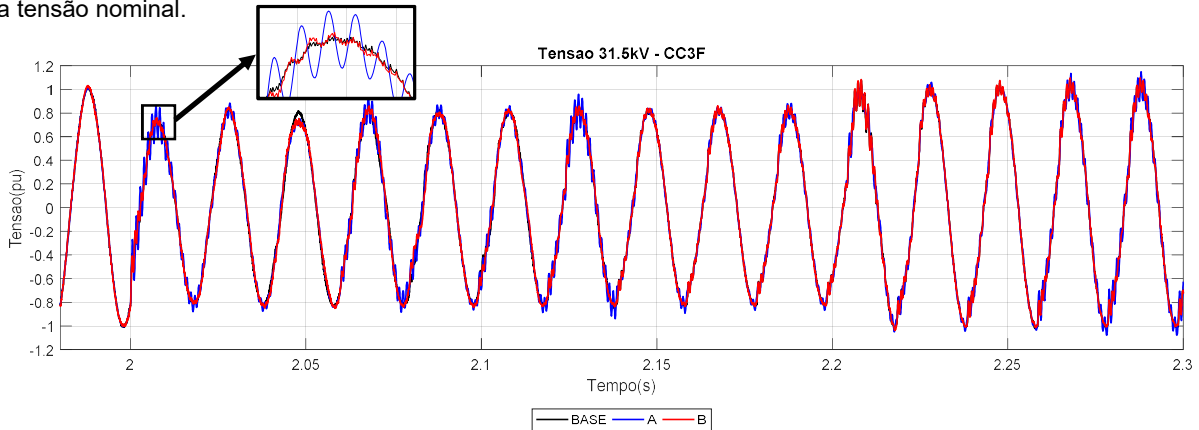


FIGURA 8 – Tensão 31,5kV para afundamento de tensão até 70% da tensão nominal no barramento de 150kV.

A Figura 9 apresenta as correntes de fase no lado de 31,5kV do TR01 150/31,5kV para afundamento de tensão até 70% da tensão nominal no barramento de 150kV.

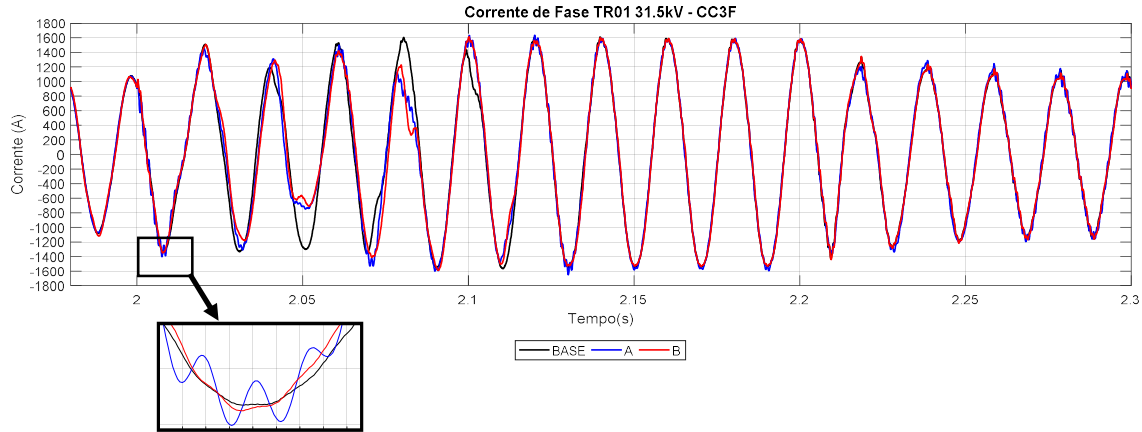


FIGURA 9 – Corrente de fase no lado de 31,5kV do TR01 150/31,5kV para afundamento de tensão até 70% da tensão nominal no barramento de 150kV.

#### 4.0 - ANÁLISE QUANTITATIVA

As análises deste item objetivam quantificar numericamente as diferenças encontradas entre as duas representações A e B e a representação BASE para os conversores. A Figura de mérito utilizada é o Desvio Médio Quadrático (DMQ) em uma janela de 6 ciclos após os eventos de afundamento de tensão no barramento de 150kV e energização de transformador. O cálculo do Desvio Médio Quadrático é mostrado em (2), onde  $y_i$  é o valor de tensão ou corrente na amostra  $i$  para a representação BASE,  $y_i$  o valor da amostra  $i$  para as representações A ou B e  $N$  a quantidade de amostras na janela de 6 ciclos.

$$DMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2}{N}} \quad (2)$$

#### 4.1 Energização de transformador

A Tabela 1 apresenta os valores calculados para tensões e correntes durante a energização do TR02 150/31,5kV.

Tabela 1 – Valores de DMQ para tensões e correntes para energização do TR02 150/31,5kV.

Representação	Tensão 150kV			Tensão 31,5kV			Corrente 31,5kV			Neutro TR02
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	
A	0.0049	1.2157	1.2212	0.0353	1.2305	1.2365	30.92	36.84	27.10	0.1412
B	0.0061	1.2157	1.2216	0.0096	1.2307	1.2376	21.96	17.79	17.38	0.0799

#### 4.2 Afundamento de tensão

A Tabela 2 apresenta os valores calculados para tensões e correntes durante afundamento de tensão até 70% da tensão nominal no barramento de 150kV.

Tabela 2 – Valores de DMQ para tensões e correntes durante afundamento de tensão até 70% da tensão nominal no barramento de 150kV.

Representação	Tensão 150kV			Tensão 31,5kV			Corrente 31,5kV		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
A	0.0067	0.9617	0.9625	0.0626	1.0230	1.0325	216.32	276.80	223.92
B	0.0035	0.9618	0.9630	0.0352	1.0221	1.0358	257.68	287.38	223.19

## 5.0 - CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou comparações de duas formas de representação dos conversores de aerogeradores *Full Converter*. A análise visual das curvas de tensões e correntes indicou que a representação B, que tenta “emular” o conversor, tem melhor desempenho que a representação A que aplica a tensão de referência do controle diretamente na rede através de fonte de tensão controlada.

Apesar de visualmente se verificar distinção entre os resultados, a análise quantitativa das grandezas mostrou valores de DMQ muito próximos para as duas representações indicando que a não representação detalhada do conversor tem pouca influência nos resultados quando se objetiva avaliar o impacto das manobras na rede básica.

## 6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) DOMMEL, H. W. Electromagnetic Transients Program Reference Manual: EMTP Theory Book. Portland, BPA, 1986.
- (2) TAVARES, C. L. Modelagem de aerogeradores de indução de dupla alimentação para estudos de transitório eletromagnético. Dissertação de mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Janeiro 2013.
- (2) SENA, D.; RAMOS Álvaro. Medidas Operativas para Evitar Risco de Autoexcitação em Centrais de Geração Eólica com Aerogeradores Assíncronos Diretamente Conectados. XXII SNPTEE SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Outubro 2013.

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Rodrigo B. Valença, nascido em 02/03/1987 na cidade do Recife-PE, Graduado em engenharia elétrica modalidade Eletrotécnica em 2009 pela Universidade de Pernambuco, Mestrado pela Universidade Federal de Pernambuco. Atua na área de estudos elétricos da ANDESA desde 2010.



Álvaro J. P. Ramos, nascido em 15/02/1951 em Recife, Graduado pela Escola de Engenharia da UFPE em 1973 e Mestrado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá em 1975. Foi chefe da Divisão de Estudos Elétricos Especiais da Operação da CHESF (1988-1998) e atualmente é diretor da ANDESA empresa de consultoria fundada em 1998.



José Sandro V. do N. Filho, nascido em 03/02/1987 na cidade do Recife-PE, Graduado em engenharia elétrica modalidade Eletrotécnica em 2009 pela Universidade de Pernambuco, Mestrado pela Universidade Federal de Pernambuco. Atua na área de estudos elétricos da ANDESA desde 2010.



Dêibson J. G. de Sena, nascido em 24/03/1981 na cidade do Cabo de Santo Agostinho-PE, Graduado em engenharia elétrica modalidade Eletrotécnica em 2007 pela Universidade de Pernambuco, Mestrado pela Universidade Federal de Pernambuco. Atua na área de estudos elétricos da ANDESA desde 2008 e Professor do Centro Universitário – WYDEN UNIFBV desde 2018.



Carmem Lúcia Tavares, nascida em 02/03/1984 na cidade de Toritama-PE, Graduada em engenharia elétrica modalidade Eletrotécnica em 2006 pela Universidade de Pernambuco, Mestrado pela Universidade Federal de Pernambuco. Atua na área de estudos elétricos da ANDESA desde 2007.



Raissa S. Almeida, nascida em 30/07/1990 na cidade do Recife-PE, Graduada em engenharia elétrica modalidade Eletrotécnica em 2014 pela Universidade Federal de Pernambuco. Atua na área de estudos elétricos da ANDESA desde 2015.