

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE DO IMPACTO NOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMA DE
SUBTRANSMISSÃO CAUSADO PELA CONEXÃO DE PARQUES EÓLICOS**

por

Gedson Bohrer Ibañez

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, outubro de 2022



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE DO IMPACTO NOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO EM SISTEMA DE
SUBTRANSMISSÃO CAUSADO PELA CONEXÃO DE PARQUES EÓLICOS**

por

Gedson Bohrer Ibañez

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Flávio Antonio Becon Lemos
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Professor Doutor Roberto Chouhy Leborgne

Banca examinadora:

Professora Doutora Bibiana Maitê Petry Ferraz – DELAE/UFRGS
Professor Doutor Daniel da Silva Gazzana – Interdisciplinar/UFRGS
Professor Doutor Roberto Chouhy Leborgne – DELAE/UFRGS

Porto Alegre, 10 de outubro de 2022

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à Gabriela, cuja força, persistência e dedicação por incontáveis vezes se somaram às minhas, às vezes até as repondo. Todas as suas virtudes são eternas, assim como a história que juntos iremos escrever.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido possível sem o apoio e suporte de meus pais, Márcia e Gedson. Agradeço infinitamente por sempre me instigarem a conhecer o novo e a buscar fortalecer o que de melhor vejo no mundo e em mim.

Aos meus avós maternos, Vânia e Alberto, por terem cuidado de mim em diversos momentos e por reforçarem os ideais que carrego até hoje. Aos meus avós paternos, Liège e Ênio, agradeço pelo carinho contínuo e apoio incondicional. Se minhas bases são sólidas, devo isso a vocês e como instruíram meus pais.

À minha irmã, Luiza, por ser uma constante lembrança do que de melhor existe nesse mundo. Há 19 primaveras tenho orgulho de acompanhar e participar da linda trajetória da sua vida.

Ao Túlio, um irmão que ganhei na graduação, estendo um grande agradecimento. Suas calorosas palavras e preciosos conselhos me acompanharão para sempre.

Agradeço aos professores Maicon e Mariana, por disponibilizarem o assunto de análise deste trabalho e pela colaboração.

Por fim, agradeço ao professor Roberto. Os conhecimentos adquiridos ao longo da graduação foram unidos em sua disciplina e foram explicados com a devida paixão pelo assunto.

IBAÑEZ, G. B. **Análise de Impacto nos Níveis de Curto-Circuito em Sistema de Subtransmissão Causado pela Conexão de Parques Eólicos.** 2022. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

O presente trabalho analisa o comportamento de um sistema de 138 kV com presença de um parque eólico na rede elétrica do Rio Grande do Sul quando do evento de um curto-circuito. O parque eólico em questão tem incremento de potência previsto para 2023, com inserção de 57 MW na rede. O estudo é feito com a utilização de modelos simplificados de geradores de indução duplamente alimentados e geradores síncronos conectados à rede diretamente a partir de conversor *back-to-back* para a modelagem da planta eólica. São consideradas faltas fase-terra e falta trifásica no estudo proposto, ambas com conexão sólida. O *software ATPDraw* é utilizado para modelar o sistema e realizar as simulações numéricas desejadas. É constatada a viabilidade da conexão do sistema, com ressalvas em relação aos níveis de corrente de curto-circuito na barra 9751.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem, Parque Eólico, Aerogerador, Turbina Eólica, Curto-Circuito, ATP.

IBAÑEZ, G. B. Short-Circuit Analysis in Subtransmission System Due to Wind Farm Insertion. 2022. 22 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

This work presents an analysis for the behaviour of an electrical power system of 138 kV coupled with a wind farm in the grid of Rio Grande do Sul under short-circuit. The wind farm subject to analysis in this work has a power increment due in 2023 which will elevate its rated power to 57 MW. The study utilizes simplified models for doubly-fed induction generators and synchronous generators with back-to-back converters to simulate a wind farm. Single-phase faults and three-phase faults are considered. The numerical solutions for the simulations of the system are obtained with the ATPDraw software. The connection of the wind farm with its increment in rated power is considered feasible, save for some noteworthy undesirable values in bus 9751.

KEYWORDS: Modeling, Wind Farm, Wind Generator, Wind Turbine, Short-Circuit, ATP.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Justificativa.....	2
1.3	Objetivos	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1	Origens do estudo.....	2
2.2	Parques eólicos e aerogeradores.....	3
2.3	Aerogerador tipo III.....	5
2.4	Aerogerador tipo IV	6
2.5	Curtos-circuitos em sistemas de potência.....	6
2.6	Modelagem de turbina eólica tipo III para curto-circuito.....	8
2.7	Modelagem de turbina eólica tipo IV para curto-circuito	9
3	ESTUDO DE CASO	10
3.1	Equivalentes de Thévenin.....	11
3.2	Transformadores.....	12
3.3	Linhas de transmissão	13
3.4	Circuito <i>splitter</i>	14
3.5	Impedância <i>shunt</i>	14
3.6	Aerogeradores e PEOLs	14
4	METODOLOGIA	17
5	SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	18
5.1	Barra 9751	18
5.2	Barra 2094	19
5.3	Barra 1232	19
6	CONCLUSÃO	20
6.1	Sugestões de trabalhos futuros	20
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21
	APÊNDICES	23

1 INTRODUÇÃO

Segundo dados levantados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no Balanço Energético Nacional (BEN), a geração de energia elétrica a partir de energia eólica cresceu em 458% entre os anos de 2014 e 2019 (EPE, 2020), alcançando a marca de 55.986 *GWh* gerados em 2019. Ainda segundo dados da EPE para o ano de 2019, a potência instalada a partir de parques eólicos atingiu o patamar de 15.378 *MW*, representando um avanço de 6,9% em relação ao ano anterior. Conforme o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) em dados apresentados em 2020, o Brasil possui 165 *GW* de potência elétrica instalada, dos quais aproximadamente 9% correspondem à atuação de energia eólica. O trabalho de Rucks (2012) põe em perspectiva o avanço dessa fonte de energia: se hoje a participação de energia eólica corresponde a 9% da potência elétrica instalada, em 2012 este valor era de 1,2%.

De acordo com dados da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEEólica) de 2019, o Brasil registra 601 parques eólicos. A ABEEólica estima que existam 4,6 *GW* de energia eólica sendo instalados ou contratados no Brasil, representando um número de projetos de 184 novas usinas eólicas. Existem ainda 751 projetos cadastrados a partir de leilões, que podem ser registrados até 2023. A previsão é de que o Brasil alcance 19,67 *GW* em potência instalada até o ano de 2023 e alcance o patamar de 20 *GW* entre os anos de 2024 e 2025.

Tal ascensão da energia eólica pode ser observada em outras partes do mundo, tais como a Alemanha. Segundo Grossi, Heim e Waterson (2014), a utilização de energia por fonte eólica na Alemanha teve um avanço de 26% no período compreendido entre os anos de 2010 e 2012. O estudo correlaciona, também, o acidente nuclear de Fukushima, ocorrido em 11 de março de 2011, ao movimento de elevação da utilização de energias renováveis, tais como solar e eólica. Em 25 de maio de 2011, o periódico britânico *The Guardian* apresentou uma matéria na qual expunha a cisão que deu-se na Europa em termos de visão de sua geração de energia, uma vez que os povos da região passaram a exercer pressão aos seus respectivos governos para extinguirem o uso de energia nuclear. A organização empresarial alemã *Bundesverband der Energie und Wasserwirtschaft* (BDEW), forte norteadora da política energética alemã, apresentou em 2019 um estudo informando que, dentre os anos de 2008 e 2018, houve um incremento de aproximadamente 281% na participação da geração de energia por fontes eólicas (englobando usinas *on* e *offshore*), aumento este correspondente a aproximadamente 72,5 *TWh*, validando o cenário de crescimento observado por Grossi, Heim e Waterson (2014).

1.1 Motivação

Uma vez que o uso de energia eólica está em ascensão, o estudo relacionado a essa área torna-se extremamente atraente, não somente por sua aplicação em uma área de alta atividade como também por agregar conhecimento em uma área em crescimento. Dentre as possibilidades de estudo no campo de geração eólica está a análise de faltas em pontos próximos a parques eólicos (PEOLs). Dado o mencionado aumento na penetração de parques eólicos, é possível que haja um incremento na potência de curto-circuito nos pontos de conexão dos PEOLs, levando a novos estresses nas barras que estão eletricamente próximas ao ponto de curto. O conhecimento dessas novas exigências ao sistema é de suma importância para a correta identificação de pontos vulneráveis, a fim de que sejam feitos os corretos dimensionamentos de equipamentos de proteção ou previsão de reforços para os novos níveis de curto-circuito do sistema. É possível também avaliar como a modelagem das máquinas que compõem o PEOL afeta a potência de curto-circuito, principalmente considerando-se sistemas nos quais a potência de curto-circuito é baixa, tais quais em sistemas de subtransmissão. Os principais distúrbios que podem surgir em sistemas com afundamento de tensão são, de acordo com Tormam (2019), variações de tensão, desequilíbrios, flutuações na tensão e inserção de harmônicos indesejados no sistema, distorcendo as formas de onda de tensão e corrente.

1.2 Justificativa

Um levantamento do comportamento de sistemas em situação de falta elétrica permite melhor entendimento sobre este fenômeno, garantindo, subsidiando maneiras de lidar com situações nas quais esta operação crítica possa ser observada. Visto que um curto-circuito pode provocar propagação de distorções harmônicas indesejadas pelos circuitos do sistema, ou mesmo gerar transientes que durem mais ciclos do que o recomendado, a correta identificação de como se processa uma falta elétrica é vital no momento de se projetar ou escolher um aerogerador, bem como preparar a rede para suportar essa sobrecarga: segundo Rucks (2012), o estudo também visa à obtenção de atuação e parametrização otimizadas para os relés de proteção.

Aronovich (2019) destaca que o fluxo de potência em um sistema é, geralmente, unidirecional, com a tensão reduzindo à medida que a carga se distancia eletricamente do gerador ou do transformador (salva a presença de efeito Ferranti nas linhas de transmissão); tais quedas de tensão são consideradas no próprio projeto da rede, seja em sua concepção ou em eventuais reforços estruturais. Reis (2015) completa dizendo que o levantamento dos níveis de tensão nos barramentos da rede em estudo deve estar inserido nos padrões de qualidade da ANEEL, tendo faixas de classificação para a tensão em cada ponto do sistema sendo comparadas aos níveis exigidos pelo PRODIST, separando os níveis de tensão em adequadas, precárias ou críticas.

Com isso, este trabalho apresenta abordagens sobre as estruturas e componentes que constituem os aerogeradores dos tipos gerador de indução duplamente alimentado e gerador síncrono com conversor *back-to-back*, apresentando modelagens que sirvam como base de análise elétrica. Por fim, são efetuadas simulações numéricas com o intuito de analisar as correntes de curto-circuito provenientes de afundamentos de tensão nos terminais de PEOLs para faltas simétricas (falta trifásica) e assimétricas (faltas fase-terra).

1.3 Objetivos

Deseja-se observar o comportamento de um sistema de subtransmissão de 138 kV frente a um evento de curto-circuito nos terminais de um PEOL e em pontos ao seu entorno, averiguando os impactos causados ao longo do sistema e determinando-se os níveis das correntes de curto-circuito que serão inseridas. Para isso, faz-se necessário adotar uma modelagem desse sistema e efetuar simulações de modo a observar como reagem, ao longo da duração da falta, os elementos que o compõem. Propõe-se também determinar o intervalo de tempo até que o sistema recupere patamares aceitáveis de operação, de modo a proporcionar mais uma ferramenta em estudos de coordenação de proteção.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aqui constam os trabalhos que são utilizados para iniciar e agregar conhecimento ao estudo, apresentados em uma ordem que melhor convém para o entendimento do panorama geral do trabalho ao leitor. São apresentados modelos elétricos para parques eólicos utilizando geradores de indução duplamente alimentados e geradores síncronos, visto que possuem vasta utilização no Rio Grande do Sul e vantagens em relação à faixa de velocidades operacionais, como será discutido mais à frente. Além disso é feita uma análise na bibliografia recente para embasar e explicitar assuntos pertinentes ao estudo.

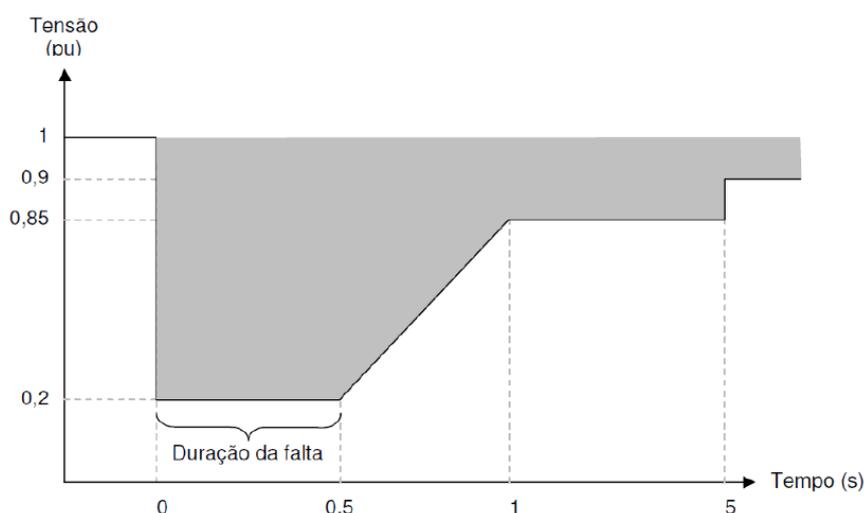
2.1 Origens do estudo

Este trabalho baseia-se no estudo apresentado por Resener *et al.* (2012), no qual foi analisada uma parte do sistema elétrico do Rio Grande do Sul que comporta um PEOL de 30 MW no município de Palmares do Sul. O PEOL em questão está conectado a um sistema radial de 138 kV.

O presente trabalho apresenta um estudo para um incremento no sistema do PEOL de Palmares do Sul, no qual foram inseridos 27 MW adicionais, totalizando uma usina eólica de 57 MW de potência instalada. Resener *et al.* (2012) comprovaram uma adequada performance do sistema com o PEOL original, atestando a viabilidade da conexão; este trabalho tem o mesmo objetivo, mas voltado para a ampliação de potência proposta para a usina eólica de Palmares do Sul, prevista para 2023. Além disso, uma nova linha de transmissão entrará em operação, de modo a melhor escoar a energia incrementada ao parque eólico de Palmares do Sul.

É interessante citar o artigo de Moraes *et al.* (2014) que, além de acrescentar ao estudo de curto-circuito em parques eólicos, aponta que os aerogeradores de um PEOL devem permanecer em operação de acordo com a curva de *low voltage ride-through* (LVRT), apresentada na Figura 1.

Figura 1 – Curva de *Low Voltage Ride-Through*



Fonte: Moraes *et al.*, 2014.

Essencialmente, a curva de *ride-through* indica que, enquanto durar a falta e houver afundamento de tensão, caso a tensão nos terminais da central se mantiver acima da curva (região sombreada) apresentada, a central é obrigada a manter sua operação normal; caso o nível de tensão esteja abaixo da curva, a operação é facultativa e, normalmente, desaconselhada.

2.2 Parques eólicos e aerogeradores

Um PEOL é composto por um conjunto de geradores operados a partir de turbinas eólicas, máquinas capazes de converter em energia elétrica a energia cinética proveniente do vento. Esta é uma forma de conversão energética dita renovável, visto que não depende de escalas temporais de grande porte para que sejam repostos os recursos originários da fonte de energia, tal como a sedimentação de matéria orgânica a altas pressões e temperaturas para a formação de petróleo. Ainda assim, destaca-se que qualquer processo de conversão energética possui algum impacto ambiental, de modo a alertar o leitor sobre eventuais falácias de implicações nulas de um energético quanto à sua presença em um ambiente. A confecção do maquinário necessário para gerenciar um parque eólico e suas conexões, bem como suas manutenções, acarreta efeitos poluidores diversos. Os parques eólicos também causam poluição sonora e, dado o espaço necessário para sua instalação, poluição visual. Com isso, é comum que a instalação de plantas eólicas se dê em locais afastados de centros urbanos. Dito isso, a energia eólica apresenta-se como uma alternativa consistente de geração de energia elétrica, dada a natureza constante de ação dos ventos (como determinado a partir de estudos estatísticos), da complementaridade com a energia solar (outra fonte de energia renovável em ascensão), como observado por Camponogara (2019) e dos níveis de conversão de energia: segundo a lei de Betz, é possível efetuar a conversão (teórica) de, no máximo,

59,26% da energia cinética proveniente do vento, valor acima dos 33,7% de conversão máxima teórica para a energia solar, como previsto pelo limite de Shockley-Queisser¹.

Salvucci (2018) informa que a utilização de PEOLs possuem um comportamento e influência nas redes elétricas diferentes de outras fontes de energia, dada a alta e frequente variabilidade da ação dos ventos – a geração distribuída em micro e minigeração utilizando energia solar fotovoltaica também apresenta alta variabilidade; contudo, sua utilização em instalações e usinas de menor porte abrange estudos mais rotineiramente voltados para sistemas de baixa tensão. Um PEOL pode estar sujeito a uma variação de 10% a 15% em sua potência de saída em intervalos por vezes inferiores a 15 minutos, com a possibilidade de apresentar diferenças ainda maiores em eventos mais raros, tais como os de curtos-circuitos (Sulvacci, 2018). Essas mudanças abruptas podem comprometer a frequência do sistema, impacto considerado extremamente severo em redes mais fracas, tais quais sistemas de subtransmissão, com menor robustez que sistemas com tensões superiores a 230 kV. Em tempos anteriores, tamanha era a preocupação em assegurar a frequência da rede que o desligamento total das usinas eólicas era prática comum, comprometendo a geração de energia do sistema como um todo e arriscando submeter os consumidores no final do sistema a uma menor capacidade de utilização de energia e possíveis sobretensões em suas redes.

Diferente do impacto na frequência da rede, que tem caráter global no sistema (Salvucci, 2018), o controle de tensão deve ser efetuado localmente, dando-se maior foco para a solução deste problema no próprio nó do sistema ou pelos elementos de seu entorno.

Uma vez que o vento apresenta variação não só de sua direção, mas também (e principalmente) de sua intensidade, máquinas síncronas tiveram uso limitado na energia eólica até os modelos mais atuais de aerogeradores. Segundo Rucks (2012), deve-se prover uma forma de conexão suave à rede (tarefa possível graças ao uso de *soft-starters*) para que haja um desvio de velocidade quando as hélices da turbina forem expostas a eventos de elevada turbulência ou fortes rajadas de vento, de modo a limitar uma eventual sobrecarga mecânica no sistema do aerogerador. Ressalta, também, que é possível maximizar a energia extraída pela turbina se sua velocidade de rotação seguir a velocidade do vento, mantendo-se uma relação fixa e linear entre ambas.

De modo a agrupar as turbinas eólicas de forma organizada - e catalogar não somente seus tipos, mas também o avanço tecnológico de seus modelos - convém se referir a elas como sendo de um dos tipos abaixo citados:

- **Tipo I:** Turbina com gerador de indução com rotor em gaiola de esquilo;
- **Tipo II:** Turbina com gerador de indução com rotor bobinado e resistência de rotor controlada;
- **Tipo III:** Turbina com gerador de indução com dupla alimentação;
- **Tipo IV:** Turbina com gerador síncrono de velocidade variável com conexão à rede através de conversor eletrônico de potência (*back-to-back*).

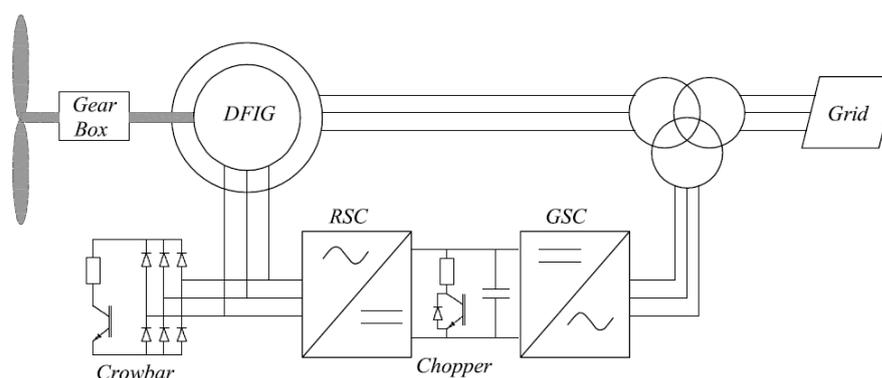
O presente trabalho aborda somente as turbinas referentes aos tipos III e IV, visto que possuem maior abrangência e utilização no estado do Rio Grande do Sul. As turbinas referentes aos tipos I e II ainda são utilizadas, mas até mesmo sua tecnologia já se mostra relativamente antiquada quando comparadas aos modelos mais atuais: como exemplo disso, cita-se o fato de que os geradores das turbinas tipo I e II trabalham com bancos de capacitores fixos, necessários para diminuir a absorção de energia reativa no sentido rede-turbina, mantendo-se níveis adequados para o fator de potência do parque eólico (Sulla, 2012). Sulvacci (2018) adiciona a esta visão, alertando que esses tipos de turbinas apresentam maior impacto na estabilidade de tensão do sistema justamente por não possuírem mecanismos de controle tão refinados quanto os de turbinas III e IV, impulsionados pela utilização de eletrônica de potência para fazerem o ajuste de inserção de potência ativa e reativa na rede.

¹ Estudos recentes indicam a possibilidade de extrapolar o limite de Shockley-Queisser, utilizando materiais tais como o grafeno; contudo, visto que esta tecnologia ainda não se apresenta comercialmente difundida ou mesmo viável, mantém-se a comparação feita no corpo do texto entre os limites de conversão para energias eólica e solar.

2.3 Aerogerador tipo III

Este tipo de turbina eólica utiliza um gerador de indução duplamente alimentado (DFIG²) para converter a energia cinética do vento. É capaz de operar em uma faixa de velocidades, conferindo-lhe bom uso para turbinas eólicas, dada a natureza variável da ação dos ventos. Nesse tipo de turbina, o estator é conectado diretamente à rede, bem como o rotor; este, contudo, é conectado à rede elétrica com a utilização de um conversor *back-to-back*, sistema utilizado para acoplar redes de potência operadas de forma assíncrona ou para conexões de redes com diferentes frequências, quando não há necessidade para uma linha de transmissão em corrente contínua. A Figura 2 apresenta um esquema de uma turbina tipo III.

Figura 2 – Esquema representativo de uma turbina eólica tipo III.



Fonte: Sulla, 2012.

Esse tipo de turbina pode operar com fluxo de potência bidirecional através do rotor, com potência entrando no rotor quando a turbina opera a velocidades sub-síncronas (baixa entrada de potência mecânica) ou com fluxo de potência reverso a velocidades super-síncronas. Sulla (2012) conclui que, com alta entrada de potência mecânica, parte dessa potência é repassada à rede através do estator e, a outra parte, através do conversor *back-to-back*.

Uma das vantagens deste tipo de turbina deve-se ao fato de que, graças ao conversor conectado ao rotor (na Figura 3, encontra-se denominado como RSC, *Rotor Side Converter*), é possível controlar a injeção de potência ativa e reativa na rede elétrica através do estator. Pode-se estabelecer um ajuste independente das potências ativa e reativa ao ajustar a tensão aplicada ao rotor, de modo que a corrente do estator pode ser controlada, permitindo entrega de potência reativa à rede. Esse sistema permite um bom acompanhamento para o fator de potência do parque eólico, portanto.

Outra vantagem das turbinas de tipo III é que o sistema com conversor *back-to-back* somente necessita ser dimensionado para suportar aproximadamente 30% da potência nominal do gerador. Essa categoria de turbina opera com escorregamentos que variam entre $-0,3$ a $0,3$, o que lhes confere uma alta gama de velocidades operacionais.

Sulla (2012) ressalta que a principal ressalva na utilização de turbinas tipo III deve-se à sua sensibilidade a distúrbios na rede elétrica. Afundamentos de tensão na rede (tais como os que ocorrem em eventos de curto-circuito) podem ocasionar picos elevados de corrente no rotor do aerogerador. Como dito por Muljadi e Gevorgian (2011), os componentes de eletrônica de potência que compõem os conversores são dimensionados para suportarem apenas capacidades nominais de corrente e tensão DC da barra à qual estão acoplados. O sistema *crowbar* apresentado na Figura 2 é comumente utilizado para proteger o conversor de sobretensões e avarias por superaquecimento dos componentes de eletrônica de potência.

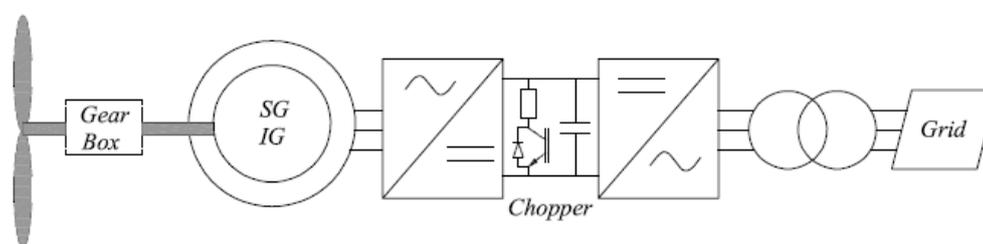
² O termo DFIG (do inglês, *Doubly-Fed Induction Generator*) se refere ao gerador de indução com dupla alimentação. Ainda que a sigla esteja associada ao nome em inglês do gerador, a terminologia “DFIG” é bem aceita no meio da engenharia e difundida ao longo da bibliografia que compõe os estudos de máquinas elétricas. Portanto, a partir desta instância, a sigla DFIG será a única terminologia adotada no trabalho.

Ainda de acordo com Sulla (2012), o sistema de proteção *crowbar* pode não ser suficiente (atuando de forma isolada) para satisfazer a curva de LVRT, uma vez que, durante uma falta, a tensão no *link* DC costuma aumentar, visto que o rotor passa a contribuir com energia. O circuito *chopper*, usando uma resistência, é utilizado para dissipar parte dessa contribuição de energia e controlar a tensão do capacitor do *link* DC.

2.4 Aerogerador tipo IV

A turbina eólica referente ao tipo IV é capaz de operar com ampla variação de velocidade – segundo Sulla (2012), as turbinas do tipo IV possuem uma faixa de velocidades operacionais maior do que as turbinas do tipo III. É colocada em uma conexão em série com um conversor *back-to-back*, de modo que a rede elétrica não está diretamente conectada ao gerador, como se pode notar a partir da Figura 3.

Figura 3 – Esquema representativo de uma turbina eólica do tipo IV.



Fonte: Sulla, 2012.

O conversor próximo ao gerador controla a velocidade do gerador, de modo a otimizar a conversão do potencial eólico. Já o conversor próximo à rede elétrica é responsável por controlar a tensão do capacitor do *link* DC ao ajustar a alimentação de potência ativa à rede, ao mesmo tempo em que é capaz de controlar de forma independente a injeção de potência reativa.

Ainda segundo Sulla (2012), este tipo de turbina possui maior facilidade de controle frente a afundamentos de tensão na rede elétrica, quando comparada à turbina do tipo III, uma vez que a queda de tensão não causa um evento transiente, de forma direta, ao gerador. Contudo, esse tipo de turbina possui a desvantagem que, na impossibilidade de transmitir potência ativa à rede, há um aumento da tensão do capacitor do *link* DC. Neste caso, utiliza-se uma resistência *chopper* para dissipar potência.

2.5 Curtos-circuitos em sistemas de potência

Este trabalho aborda eventos de curtos-circuitos decorrentes de todos os tipos de faltas, simétricas e assimétricas. Distinguem-se aqui os conceitos de falta e curto-circuito, sendo este o fenômeno no qual ocorre uma conexão do sistema a uma impedância de diminuto valor entre pontos de potenciais diferentes (MEDEIROS, 2017) e aquele, a categorização de eventos simétricos – todas as fases apresentam o mesmo comportamento durante o curto-circuito – e assimétricos – as fases se comportam de formas diferentes entre si *no conjunto trifásico* (duas fases podem ter o mesmo comportamento, mas irão *necessariamente* diferir da terceira e última fase, por definição).

Kindermann (2010) oferece uma visão que indica, a partir de porcentagens, *onde e quais tipos* de curtos-circuitos são mais comuns. De acordo com seu estudo, para o sítio do curto-circuito:

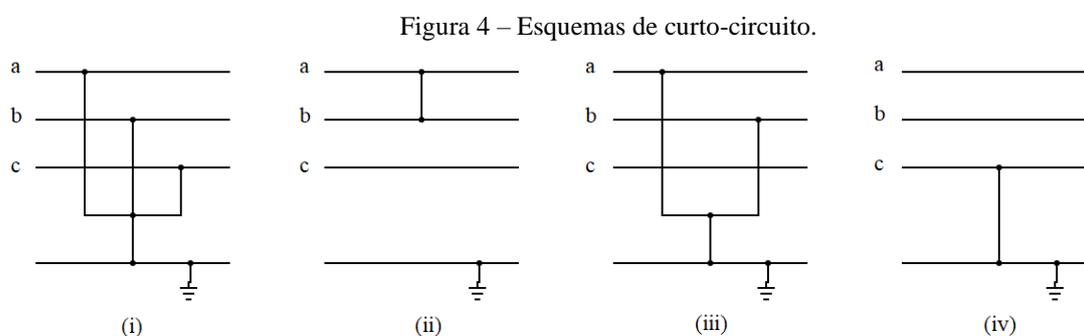
- i. 89% dos eventos ocorrem em linhas de transmissão;
- ii. 6% dos eventos ocorrem no local de geração (ponto de estudo deste trabalho);
- iii. 5% dos eventos ocorrem em subestações.

Para a catalogação de ocorrência de curto-circuito, Kindermann (2010) sugere:

- i. 63% dos eventos como sendo curtos-circuitos do tipo fase-terra;
- ii. 16% dos eventos como sendo curtos-circuitos do tipo fase-fase-terra;
- iii. 15% dos eventos como sendo curtos-circuitos do tipo fase-fase;
- iv. 6% dos eventos como sendo curtos-circuitos do tipo trifásico.

Observa-se que a ocorrência de faltas simétricas (curto-circuito trifásico) é rara, comparada com os outros tipos de curtos-circuitos; pois: é improvável imaginar que uma descarga atmosférica ou um surto devido a uma manobra no sistema cause uma falha que atinja as três fases do sistema de forma igual. Desta forma, curtos-circuitos fase-terra são os mais comuns, uma vez que descargas atmosféricas tendem a ser altamente localizadas.

A Figura 4 apresenta um diagrama que denota a configuração de como se dá uma ocorrência de cada curto-circuito. Nota-se, como já previamente mencionado, que todos os esquemas são solidamente aterrados, não possuindo, com isso, uma impedância que conecte o local de falta à terra.



A partir do que é apresentado na Figura 4, observa-se que:

- i. Indica uma falta simétrica (curto-circuito trifásico) com ligação à terra em curto-circuito franco (ou solidamente aterrado);
- ii. Indica um curto-circuito fase-fase;
- iii. Indica um curto-circuito fase-fase-terra;
- iv. Indica um curto-circuito fase-terra.

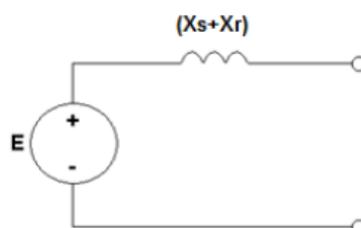
O estudo de curto-circuito em máquinas elétricas possui uma série de etapas; com isso, o refinamento necessário em cada passo do processo de análise é de suma importância, dada a possibilidade de uma propagação de erros poder contaminar etapas de avaliação futuras. Contudo, algumas simplificações podem ser tomadas para tornar a análise do estudo menos trabalhosa. A principal consideração que cabe ser descrita agora é que todos os tipos de curto-circuito que são analisados neste estudo são decorrentes do que se diz falta solidamente aterrada. Nesse tipo de falta, desconsidera-se a existência da impedância de falta Z_f no local do curto-circuito. Segundo Medeiros (2017), o valor dessa impedância é, em muitos casos, de difícil obtenção; até mesmo valores típicos são de difícil aquisição, e sua precisão pode ser duvidosa. Contudo, sua ausência no modelo possui um ponto benéfico para a análise: diminui-se a impedância equivalente do circuito em questão, acarretando valores de correntes de curto-circuito maiores do que as que acontecem na realidade. Esse excesso de corrente adiciona um coeficiente de segurança no estudo, dando fim a um melhor dimensionamento dos equipamentos elétricos.

2.6 Modelagem de turbina eólica tipo III para curto-circuito

De acordo com Williams e Karlson (2012), ao contrário do que foi apresentado na Figura 2 (esquema para melhor compreensão dos possíveis componentes constituintes de um aerogerador tipo III), apenas um dos dois tipos de proteção (*crowbar* ou *chopper*) está ativo em um dado momento. Com isso, a modelagem da turbina eólica depende em qual sistema será utilizado.

Os primeiros modelos de turbinas do tipo III utilizavam um sistema *crowbar* que é ativado durante os primeiros momentos do curto-circuito. Esse sistema redireciona a corrente de curto-circuito - de modo a impedir sua entrada no conversor de potência - ao realizar um curto nos enrolamentos do rotor. Com a remoção do circuito do conversor de potência, a turbina passa a se comportar como uma turbina dos tipos I e II (uma fonte de tensão atrás da soma das reatâncias do estator e do rotor da máquina), como apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Modelo de sequência positiva para curto-circuito em turbina eólica do tipo III com proteção *crowbar*.

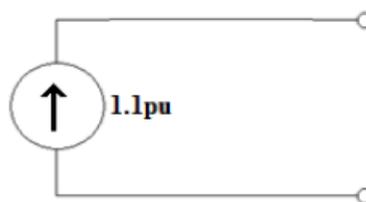


Fonte: Williams e Karlson, 2012.

O circuito equivalente de sequência negativa para qualquer máquina se comporta como o de sequência positiva, apenas retirando-se quaisquer fontes presentes na topologia do circuito. Uma vez que, segundo Sulla (2012), geradores de indução não são comumente aterrados, não há representação de circuito equivalente de sequência zero a ser feito.

Modelos mais recentes de turbinas do tipo III utilizam um circuito *chopper* para proteger o conversor próximo ao rotor. Este sistema permite uma melhor conexão à rede em situações de baixa tensão (*low voltage ride-through*), mantendo o conversor próximo ao rotor operando, ainda que limitando a corrente, com o intuito de proteger os componentes de eletrônica de potência do conversor. Com isso, Sulla (2012) propõe o circuito equivalente apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Modelo de sequência positiva para curto-circuito em turbina eólica do tipo III com proteção *chopper*.



Fonte: Williams e Karlson, 2012.

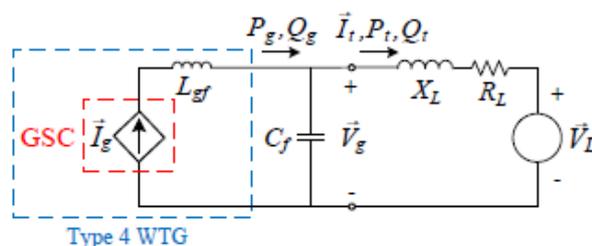
A fonte de corrente prevista na Figura 6 não é uma entrada constante de corrente no valor de $1,1 pu$. Ela é um valor limite para a corrente de curto-circuito, de modo que correntes com maior amplitude farão com que a máquina seja desacoplada da rede, acionando-se o circuito de proteção *chopper*. O valor de corrente de curto-circuito 10% acima da corrente nominal é comumente referenciado na bibliografia referente à turbina do tipo III; contudo, Howard (2013) indica que os limites de corrente geralmente ficam situados na faixa de $1,1 pu$ a $1,4 pu$.

2.7 Modelagem de turbina eólica tipo IV para curto-circuito

Ainda segundo apresentado por Williams e Karlson (2012), a modelagem de turbinas eólicas do tipo IV não é determinada pelas características do gerador, mas sim pelas características do conversor de potência ao qual a turbina é acoplada. Como dito previamente, os componentes de eletrônica de potência são sensíveis às altas correntes e elevadas cargas térmicas que poderiam ser a eles impostas em um evento de curto-circuito.

Para Rucks (2012), o conversor de tensão utilizado como intermediário entre o gerador e a rede (vide Figura 3) é similar a um gerador síncrono, visto que pode ser modelado como uma tensão seguida de uma indutância, com a amplitude e a fase dessa tensão determinando a potência ativa e reativa fornecida pelo gerador. Contudo, uma vez que essa tensão é sintetizada por intermédio de modulação PWM, é possível efetuar um alto controle da tensão, conferindo à corrente de saída do gerador uma boa condição para ser controlada. Segundo Howard (2013), o gerador e o conversor ao seu lado podem ser presumidos como desconectados da rede, não tendo então impacto no comportamento de curto-circuito de um aerogerador tipo IV. Uma vez que o conversor do lado da rede está diretamente a ela acoplado e, dada a precisão de controle de injeção de potência de um conversor, é possível modelar a turbina a partir da Figura 7.

Figura 7 – Detalhe da modelagem do conversor (em vermelho) e da turbina tipo IV (em azul).

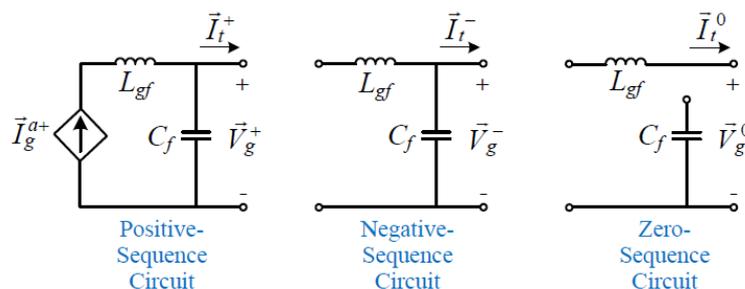


Fonte: Howard (2013).

Os componentes à direita do circuito, com o subíndice L se referem a uma carga que representa, a partir de um equivalente de Thévenin, o sistema ao qual a turbina está acoplada. A fonte é a corrente injetada pela turbina à rede, L_{gf} e C_f se referem à indutância de filtro e à capacitância de filtro do conversor conectado à rede, respectivamente.

Como mostrado em azul na Figura 7, o circuito referido é equivalente ao circuito de sequência positiva. Ainda de acordo com Howard (2013), dado que as correntes de referência são fornecidas exclusivamente por valor de corrente contínua, os controladores de corrente permitem que somente a corrente de sequência positiva circule pelo conversor acoplado à rede. Contudo, se o capacitor shunt do filtro do conversor for utilizado, pode haver circulação de corrente de sequência negativa. Presumindo que o conversor seja um sistema de três fios, não há parcela de sequência zero na corrente resultante. Com isso, apresentam-se na Figura 8 os modelos de sequência para o aerogerador do tipo IV.

Figura 8 – Circuitos de sequência positiva, negativa e zero da turbina eólica tipo IV.



Fonte: Howard (2013).

Dada a capacidade de controle de corrente para uma turbina tipo IV (graças ao conversor), o mínimo valor para a corrente de pico de curto-circuito desta máquina é, efetivamente, $0 A$. Concluída a modelagem das máquinas que serão utilizadas neste trabalho, convém apresentar a Tabela 1, proveniente do estudo de Muljadi e Gevorgian (2011), na qual são apresentados valores máximos e mínimos para a amplitude máxima da corrente de curto-circuito para as turbinas eólicas dos tipos III e IV:

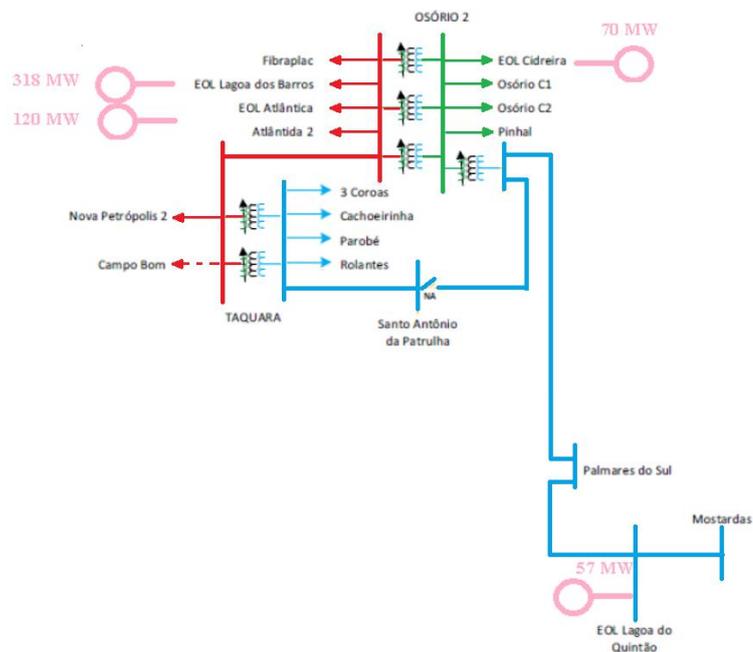
Tabela 1 – Valores máximos e mínimos previstos para curto-circuito

Corrente de Curto-Circuito	Tipo III	Tipo IV
Máxima	$2\sqrt{2} \frac{V_S}{X'_S} I_{nom}$	$1,1 I_{nom}$
Mínima	$1,1 I_{nom}$	0

3 ESTUDO DE CASO

O sistema de subtransmissão analisado é radial e atende de duas a três subestações, dependendo da configuração de operação, e possui 7 barras de análise. Faz sua conexão ao Sistema Interligado Nacional (SIN) através da Subestação de 230 kV Osório 2 (OSO2). A conexão do PEOL se dá a partir da subestação 34,5/138 kV Lagoa do Quintão (LAQ), como apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Diagrama unifilar do sistema de subtransmissão. Em verde, segmentos de 69 kV; em azul, segmentos de 138 kV; em vermelho, segmentos de 230 kV.



³ Reforça-se que esta fórmula pode ser usada para DFIGs com atuação de proteção *crowbar*. Para um DFIG que tenha um sistema de proteção *chopper*, a corrente é limitada a um valor previamente estipulado, tal qual um aerogerador do tipo IV.

Como este trabalho utiliza somente aerogeradores síncronos e DFIGs em sua análise, o posicionamento de Morais *et al* (2014) torna-se interessante: os aerogeradores em questão podem ser modelados a partir do comportamento elétrico dos conversores de potência. Ainda segundo Morais *et al* (2014), as seguintes características, pertinentes a conversores, podem ser adotadas:

- i. O conversor permite um controle que busca a manutenção da potência elétrica ativa de saída do aerogerador durante eventos de falta elétrica;
- ii. Ainda que faltas elétricas desequilibradas (assimétricas) sejam consideradas, conversores somente contribuem com a corrente de sequência positiva, limitando o número de modelos e circuitos necessários para a solução do problema;
- iii. Como visto na Tabela 1 da seção 2.7, apresentam limite superior de corrente;
- iv. O sistema em si pode ser desconectado caso a tensão alcance níveis abaixo de valores previamente selecionados para serem mantidos durante operação normal.

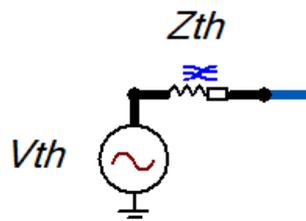
Como apresentado por Ramos (2011), a corrente de curto-circuito pode ser analisada em dois estágios: o de regime transitório no início da falta, gerando uma corrente dita assimétrica, e o de regime permanente, no qual a corrente de curto-circuito torna-se simétrica. A assimetria entre as correntes nesses dois períodos pode ser medida através do fator de assimetria, uma relação entre a corrente assimétrica e a corrente simétrica. Essa relação é dependente do momento no qual acontece a falta (modelada a partir do ângulo de tensão no momento da falta, ou ângulo de incidência) e do quociente entre a parcela reativa e a parcela resistiva da rede (relação X/R). Conforme o ponto da falta se afasta da central geradora, há um decaimento na relação X/R, diminuindo o fator de assimetria e aproximando os valores de corrente de curto-circuito entre os regimes transitório e permanente. Neste trabalho serão analisados os comportamentos da corrente de curto-circuito, tanto simétrica quanto assimétrica, nas barras próximas ao PEOL, avaliando o impacto que a máquina e o momento do curto têm no restante do sistema.

Dada a extensa natureza do SIN, modelar o sistema elétrico com muito detalhamento não é de todo vantajoso: o maior interesse deste trabalho é ver como se comporta o entorno do parque eólico quando do evento de um curto-circuito; pontos muito distantes fogem a essa análise. Soma-se a isso o fato de que o esforço computacional pode ser elevado caso a simulação incorpore muitas barras e elementos elétricos. Para contornar isso, usou-se o *software* ANAFAS para obter equivalentes Thévenin que representam o sistema atrás das barras de Osório 2 (OSO2) e Taquara (TAQ).

3.1 Equivalentes de Thévenin

É possível modelar a impedância de Thévenin a partir de impedâncias de sequência, recurso utilizado e apresentado na Figura 1.

Figura 10 - Equivalente de Thévenin usado no *ATPDraw* para representar a rede elétrica na conexão em 138 kV.



A fonte de tensão do equivalente de Thévenin depende da tensão da barra de análise. No caso deste trabalho, circuitos conectados a barras de 138 kV e 69 kV foram reduzidos, sendo essas as tensões dos equivalentes.

A impedância do equivalente de Thévenin foi modelada no *software ATPDraw* a partir de uma linha de transmissão RL. O modelo em questão utiliza somente valores para resistência e impedância reativa nas sequências zero e positiva, visto que somente esses dados estão disponíveis no ANAFAS. Internamente, o *ATPDraw* trabalha, neste caso, com impedâncias de sequência negativa de valor igual às de sequência positiva.

O *ATPDraw* trabalha internamente com impedâncias de linha de transmissão com unidade de Ω/m . Estabeleceu-se um comprimento para a linha de um metro. A Tabela 2 apresenta os dados dos equivalentes de Thévenin.

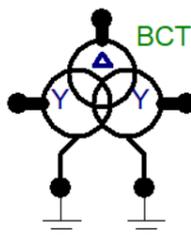
Tabela 2 – Dados dos equivalentes de Thévenin.

Descrição	Equivalente de 138 kV	Equivalente de 69 kV
Tensão (kV)	138	69
Impedância de Sequência Zero (Ω)	$1,03684 + j8,03638$	$0,13274 + j1,19611$
Impedância de Sequência Positiva (Ω)	$1,79611 + j11,44372$	$0,58889 + j6,23215$

3.2 Transformadores

O *ATPDraw* permite a adição de transformadores a partir do modelo BCTRAN. Uma vez que o transformador BCTRAN não necessita a incorporação de dados como curva de saturação ou geometria do núcleo, seu uso é conveniente para a simulação de faltas. O modelo para o transformador encontra-se na Figura 11.

Figura 11 – Modelo de transformador BCTRAN de três enrolamentos usado no *ATPDraw*.



Por comodidade, os dados dos transformadores são apresentados separadamente em dois grupos: transformadores de dois enrolamentos e transformadores de três enrolamentos.

Para os transformadores de dois enrolamentos, ressalta-se que um deles possui ambos terminais descritos como Y-aterrado. Essa configuração não costuma ser a mais indicada, uma vez que podem haver sobretensões por presença de harmônicas, principalmente as de ordem múltipla de três. Contudo, conforme foram feitos os equivalentes no ANAFAS, o programa optou por modelar parte do equivalente como um transformador Y-Y conectando diretamente as barras de 138 kV de Taquara (barra 2094) e a barra de 69 kV de Osório (barra 1232). Seguem os dados para os transformadores de dois enrolamentos utilizados.

Tabela 3 – Dados usados para o transformador Y-aterrado Y-aterrado de dois enrolamentos.

Barras		Sequência Positiva		Sequência Zero			
De	Para	Tensão Primário (kV)	Tensão Secundário (kV)	Impedância (%)	Perdas (kW)	Impedância (%)	Perdas (kW)
2094	1232	138	69	27,185	371,30	41,472	1.062,27

A seguir são apresentados os dados para o restante dos transformadores de dois enrolamentos do estudo. Todos os transformadores expressos na Tabela 4 possuem configuração Y- Δ .

Tabela 4 – Dados usados para os transformadores de dois enrolamentos.

Barras		Y	Δ		Sequência Positiva		Sequência Zero	
De	Para	Tensão Primário (kV)	Tensão Secundário (kV)	Defasagem	Impedância (%)	Perdas (kW)	Impedância (%)	Perdas (kW)
1321	10123	69	34,5	0°	16,22	180,32	15,525	172,67
9751	83585	138	34,5	30°	24,424	282,67	20,758	282,67

A seguir são apresentados os dados dos transformadores de três enrolamentos.

Tabela 5 – Dados usados para o transformador de três enrolamentos conectado à barra 1244.

Primário – Barra 1244		Secundário – Barra 1232		Terciário – Barra 82762		Defasagem
Tensão (kV)	Configuração	Tensão (kV)	Configuração	Tensão (kV)	Configuração	
138	Y	69	Y	13,8	Δ	30°
		Sequência Positiva		Sequência Zero		
		Impedância (%)	Perdas (kW)	Impedância (%)	Perdas (kW)	
Primário-Secundário		21,598	108	21,796	90,8	
Primário-Terciário		38,012	375,32	38,012	375,32	
Secundário-Terciário		12,958	375,32	12,958	375,32	

3.3 Linhas de transmissão

As linhas de transmissão do sistema poderiam ser modeladas a partir de modelos pi-equivalentes, mas o *ATPDraw* traz uma considerável biblioteca de possíveis linhas a serem utilizadas na simulação. Dada a extensa natureza do sistema elétrico brasileiro, as linhas de transmissão do sistema acabam tendo valores consideráveis de impedância, de modo que a incorporação de um modelo correto é de grande valia para estudos de fluxo de potência e ensaios de curto-circuito.

Todas as linhas de transmissão do estudo são linhas com comprimento inferior a 80 km, limite superior para que uma linha seja dita curta. Com isso, é possível desprezar efeitos de capacitância nas linhas, eliminando a necessidade de modelar susceptâncias *shunt* nas extremidades das linhas, em derivação.

Dentre as possibilidades de modelos de linha de transmissão disponíveis no *software*, escolheu-se o modelo de parâmetros concentrados com informações de sequência. Esse modelo pede como dados de entrada somente informações de resistência e reatância das sequências zero e positiva (mesmo modelo usado para os equivalentes de Thévenin).

Figura 12 – Modelo de linha de transmissão usado no *ATPDraw*.



A Tabela 6 apresenta os dados das linhas de transmissão do estudo.

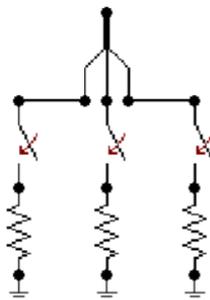
Tabela 6 – Dados das linhas de transmissão do estudo.

Barras		Tensão (kV)	Sequência Positiva		Sequência Zero	
De	Para		Resistência (Ω)	Reatância (Ω)	Resistência (Ω)	Reatância (Ω)
1321	1232	69	2,02200	10,07428	10,14093	32,51763
2094	2055	138	7,41573	18,20266	21,57304	44,49440
2055	1244	138	4,21063	10,33518	12,24910	25,26377
1244	1229	138	9,36965	21,73492	24,60485	65,56087
1229	9751	138	7,03542	16,04457	18,81395	45,91889
9751	1234	138	11,35022	26,26548	32,62428	71,37691
2055	83411	138	4,77624	11,19787	12,07009	34,35728

3.4 Circuito *splitter*

O curto-circuito é efetuado nas simulações através da conexão de um bloco *splitter* no ponto de análise desejado. Este recurso permite que, no esquema elétrico apresentado pelo *ATPDraw*, o circuito comumente representado em linhas grossas (circuitos trifásicos) seja dividido em cada uma das três fases que compõem o sistema (linhas finas). Com isso, todas as configurações de faltas podem ser feitas através do bloco apresentado na Figura 13. As resistências adicionadas à massa têm magnitude ínfima, de modo a simplesmente evitarem erros de divisão por zero durante a solução do caso.

Figura 13 – Conexão para efetuar curto-circuitos na simulação.



3.5 Impedância *shunt*

Um banco capacitivo está presente em conexão com a barra de Lagoa do Quintão (83585), para controle de fator de potência do sistema. Tal reatância foi modelada no *ATPDraw* como sendo uma reatância capacitiva trifásica pura, com valor por fase de 1291,91 μ S.

3.6 Aerogeradores e PEOLs

O parque eólico em análise foi modelado a partir do estudo proposto por Howard (2013). Contudo, salienta-se dizer que a indutância de filtro L_{gf} por ele proposta foi desconsiderada: devido a complicações numéricas pertinentes à rotina de cálculos do *ATPDraw*, uma indutância colocada em série com uma fonte de corrente causa a perda da resposta do sistema em regime transiente, sendo então somente possível o retorno de informações em regime permanente. Dada a natureza essencialmente transiente de um efeito de curto-circuito e o interesse em seus desdobramentos no sistema estudado, optou-se então por remover tal indutância da simulação. Ainda assim, esse modelo segue sendo corroborado por outros estudos, tal qual o proposto por Morais *et al* (2014): o aerogerador do tipo IV

pode ser modelado como sendo uma fonte de corrente de sequência positiva, limitada a um valor superior específico de corrente.

De modo a modelar cada gerador, foi utilizado um modelo em escala detalhado por Howard (2013). Abaixo seguem os dados do protótipo por ele utilizado:

Tabela 7 – Dados do protótipo de aerogerador tipo IV utilizado por Howard (2013).

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Potência	S	1,717	MVA
Tensão	V	575	V
Corrente máxima	I_{gmax}	2926	A (RMS)
Indutância de filtro	L_{gf}	0,3	mH

A partir desses dados, é possível calcular a corrente de saída desse protótipo através da Equação (3.1):

$$I_g = \frac{\bar{S}}{\sqrt{3} V} \quad (3.1)$$

na qual \bar{S} denota o conjugado fasorial da potência aparente S do gerador, dada por:

$$S = S \angle \text{acos}(FP) \quad (3.2)$$

Na Equação (3.2), FP é o fator de potência do gerador. Tomando o fator de potência de pré-falta da máquina igual a 1, temos que:

$$S = 1,717 \angle 0^\circ \text{ MVA} \quad (3.3)$$

Substituindo os valores na Equação (3.1), temos que a corrente nominal no gerador será:

$$I_g = \frac{1,717 \cdot 10^6 \angle 0^\circ}{\sqrt{3} \cdot 575} = 1724,02 \angle 0^\circ \text{ A} \quad (3.4)$$

A corrente previamente calculada é de pré-falta do aerogerador em operação nominal. Para poder analisar o maior impacto possível nos níveis de curto-circuito do sistema devido à inserção do PEOL em estudo, é recomendado analisar os aerogeradores operando com curto-circuito em seus terminais. Howard (2013) propõe a Equação (3.5) para a identificação de uma corrente posterior a um evento de curto-circuito para o protótipo por ele proposto:

$$I_g^{sc} = \text{Real}(I_g) - j \sqrt{\frac{I_{gmax}^2}{2} - \text{Real}^2(I_g)} \quad (3.5)$$

Na qual I_g^{sc} representa a corrente no gerador após o curto-circuito em seus terminais. Em seu estudo, Howard (2013) força uma saída de corrente de 1,2 pu, como pode ser visto na Tabela 10. Neste estudo, é considerado que o aerogerador opera a 1,1 pu. Com isso, a corrente máxima do protótipo será tida como 2682,17 A (RMS). Por fim, a corrente após o curto-circuito do gerador será igual a:

$$I_g^{sc} = 1724,02 - j \sqrt{\frac{2682,17^2}{2} - 1724,02^2} = 1896,58 \angle -24,62^\circ \text{ A} \quad (3.6)$$

Aqui ressalta-se que este modelo deve ser conectado a um sistema de 575 V. A conexão física dos aerogeradores é feita a partir de uma entrada em 34,5 kV no PEOL do estudo. Tomando-se um transformador ideal fictício cuja função é exclusivamente elevar a tensão do protótipo proposto por Howard para a tensão alvo de 34,5 kV, tem-se uma relação de transformação de 60. Com isso, a corrente do aerogerador corrigida para a tensão de 34,5 kV igual a:

$$I_g = 31,61 \angle -24,62^\circ \text{ A} \quad (3.7)$$

O PEOL possui uma potência instalada efetiva de 57,7 MW. Seguindo-se a suposição já dita de que o modelo aqui usado opera a 1 pu e com fator de potência igual a 1 em situações pré-falta, seriam necessários 34 aerogeradores para suprir a demanda. Usando-se essa quantidade de aerogeradores, podemos estabelecer a corrente máxima na saída do PEOL como sendo:

$$I_{PEOL} = 34 \cdot I_g = 1074,74 \angle -24,62^\circ \text{ A} \quad (3.8)$$

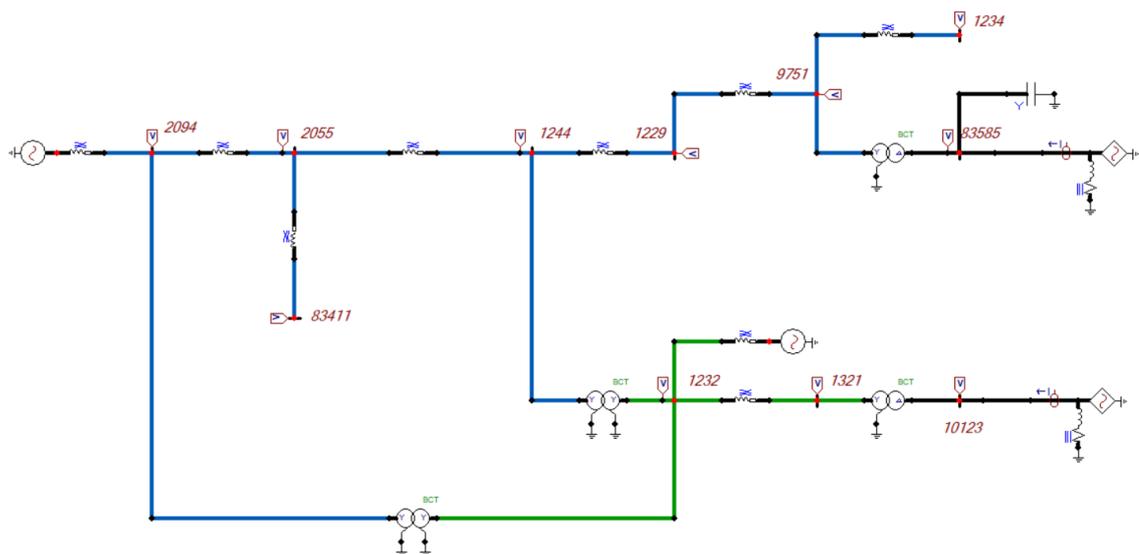
O valor acima descrito é utilizado para modelar o PEOL conectado à subestação de Lagoa do Quintão (barra 83585) como sendo uma fonte de corrente que injeta exclusivamente corrente de sequência positiva. O modelo utilizado no *ATPDraw* é apresentado na Figura 14:

Figura 14 – Modelo de aerogeradores concentrados para representação de PEOL.



O PEOL localizado na subestação de Cidreira (barra 1347) foi modelado de forma similar. Possui uma potência instalada de 70 MW, requisitando, portanto, 41 aerogeradores previamente analisados. Com isso, o PEOL de Cidreira foi modelado como sendo uma fonte de corrente com valor de 1296,01 A, com o mesmo argumento do PEOL de Lagoa do Quintão. A Figura 15 traz o modelo completo utilizado.

Figura 15 – Diagrama unifilar do sistema estudado.



4 METODOLOGIA

O sistema foi inicialmente validado dentro do *software PowerWorld*, no qual observou-se que todas as barras operam em condições aceitáveis, como indicado na Tabela 8.

Tabela 8 – Informações de tensão nas barras do sistema em operação nominal.

Barra	Tensão Nominal (kV)	Tensão em pu	Argumento (°)
2094	138	1,00000	0,00
2055	138	0,98839	3,66
1244	138	0,98363	5,78
83411	138	0,98839	3,66
1229	138	0,99220	9,86
9751	138	1,00205	12,82
1234	138	1,00205	12,82
1232	69	0,95789	5,91
1321	69	0,97111	14,97
10123	34,5	0,97796	21,71
83585	34,5	0,98894	-9,20

De modo a efetuar as simulações do trabalho, escolheu-se a utilização do *software ATPDraw*, dada a sua boa acessibilidade – sendo um programa disponível gratuitamente – e por ter uso bem difundido em estudos relacionados a sistemas elétricos de potência, uma vez que possui diversos modelos já inclusos para análises em linhas de transmissão, transformadores e geradores. Uma vantagem do uso do *ATPDraw* é a possibilidade de visualização de eventos transientes, tais como os curtos-circuitos estudados neste trabalho.

De modo a observar o impacto nos níveis de curto-circuito do sistema, foram realizados curtos trifásicos e curtos fase-terra nas barras 9751, 2094 e 1232 para três cenários:

- i. PEOL de Lagoa do Quintão desconectado e com linha de transmissão entre barras 2094 e 2055 operando;
- ii. PEOL de Lagoa do Quintão (barra 83585) conectado com operação nominal e com linha de transmissão entre barras 2094 e 2055 desconectada;
- iii. PEOL de Lagoa do Quintão conectado com operação nominal e com linha de transmissão entre barras 2094 e 2055 conectada.

Conforme dito previamente, a linha de transmissão mencionada nos itens acima está em construção para reforçar o sistema analisado e tem previsão de conexão em 2023.

Para o estudo foram realizados curtos trifásicos e curtos fase-terra. Uma análise prévia foi efetuada na barra 9751, observando-se os níveis de corrente de curto-circuito para diferentes momentos da incidência das faltas. O *ATPDraw* trabalha internamente com tensões expressas em funções cossenoidais. A análise é apresentada na Tabela 9:

Tabela 9 – Dados obtidos para curtos fase-terra e trifásico na barra 9751.

Ângulo de Incidência (°)	Curto Fase-Terra			Curto Trifásico		
	Corrente Subtransitória (A)	Corrente de Regime Permanente (A)	Fator de Assimetria	Corrente Subtransitória (A)	Corrente de Regime Permanente (A)	Fator de Assimetria
0	2425	2298	1,06	2377	2241	1,06
30	3060	2295	1,33	2951	2243	1,32
45	3386	2294	1,48	3196	2243	1,42
60	3616	2293	1,58	3391	2244	1,51
90	3814	2293	1,66	3566	2244	1,59

O fator de assimetria apresentado na Tabela 9 é uma relação entre a corrente subtransitória e a corrente de regime permanente. Como pode ser observado, o fator de assimetria varia até atingir um valor máximo para um ângulo de incidência de 90°, no qual a falta encontra a tensão em seu valor nulo. Com isso, tem-se que a corrente subtransitória de curto-circuito atinge seu valor máximo. A fim de analisar os maiores impactos possíveis no sistema, optou-se, portanto, na análise da corrente de curto-circuito em nível subtransitório para um ângulo de incidência de 90° para todas as faltas consideradas.

5 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados os três cenários previamente estabelecidos (apresentados no Capítulo 4) para os ensaios de impacto de curto-circuito devido à inserção do parque eólico, separados por barra de análise.

5.1 Barra 9751

Gráficos com a evolução das correntes de falta na barra 9751 podem ser encontrados no Apêndice A.

Os valores dos ensaios para os curtos-circuitos fase-terra e trifásico francos na barra 9751 são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados para análise de curto-circuito na barra 9751.

Cenário	Curto Fase-Terra		Curto Trifásico	
	Corrente Máxima (A)	Varição em Relação ao PEOL desconectado (%)	Corrente Máxima (A)	Varição em Relação ao PEOL desconectado (%)
PEOL desconectado, com LT	2089	-	1640	-
PEOL conectado, sem LT	3441	64,72	3138	91,34
PEOL conectado, com LT	3814	82,57	3566	117,44

De um modo geral, é possível observar a partir da Tabela 10 que as correntes de falta fase-terra e falta trifásica estão elevadas quando comparadas à situação de parque desconectado, com variações significativas no valor eficaz da corrente para os dois cenários apresentados, com e sem a conexão da linha de transmissão entre as barras 2094 e 2055.

O segundo cenário estudado (PEOL em operação nominal sem a linha de transmissão) é um cenário fictício, uma vez que a linha está em desenvolvimento e será conectada em 2023; ainda assim, é interessante observar que sua remoção diminui os níveis de curto-circuito da barra. Contudo, isso não garante o melhor escoamento da potência incremental do PEOL em análise, uma vez que, em regime permanente, as barras 1244 e 1232 apresentam tensões de 0,88 pu e 0,89 pu, respectivamente, índices esses abaixo de valores considerados aceitáveis para a operação do sistema.

5.2 Barra 2094

Gráficos com a evolução das correntes de falta na barra 2094 podem ser encontrados no Apêndice B.

Os valores dos ensaios para os curtos-circuitos fase-terra e trifásico francos na barra 2094 são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados para análise de curto-circuito na barra 2094.

Cenário	Curto Fase-Terra		Curto Trifásico	
	Corrente Máxima (A)	Varição em Relação ao PEOL desconectado (%)	Corrente Máxima (A)	Varição em Relação ao PEOL desconectado (%)
PEOL desconectado, com LT	15199	-	13834	-
PEOL conectado, sem LT	14498	-4,61	13181	-4,72
PEOL conectado, com LT	15362	1,07	14100	1,92

É possível observar, a partir dos dados apresentados na Tabela 11, que o sistema apresenta pequena variação entre os casos do PEOL desconectado e conectado com a linha de transmissão em operação, podendo ser dito, portanto, que a conexão do parque nesse cenário não causa impacto significativo nos níveis de curto-circuito do sistema.

5.3 Barra 1232

Gráficos com a evolução das correntes de falta na barra 1232 podem ser encontrados no Apêndice C.

Os valores dos ensaios para os curtos-circuitos fase-terra e trifásico francos na barra 1232 são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Dados para análise de curto-circuito na barra 1232.

Cenário	Curto Fase-Terra		Curto Trifásico	
	Corrente Máxima (A)	Varição em Relação ao PEOL desconectado (%)	Corrente Máxima (A)	Varição em Relação ao PEOL desconectado (%)
PEOL desconectado, com LT	25554	-	19834	-
PEOL conectado, sem LT	24773	-3,05	19243	-2,98
PEOL conectado, com LT	26253	2,73	20500	3,36

Com base nos dados apresentados na Tabela 12, nota-se que os valores de corrente de curto-circuito na barra 1232, com o PEOL e a linha operacionais, apresentam pequenas variações em relação ao cenário do PEOL desconectado. Portanto, a conexão do PEOL com seu incremento de potência pouco impacta nos níveis de curto-circuito do sistema.

6 CONCLUSÃO

O sistema apresenta razoável comportamento frente a eventos de curtos-circuitos fase-terra e trifásico nas barras analisadas, tendo desempenho aquém do esperado somente na barra 9751, a mais próxima do PEOL em análise.

Alguns pontos a serem analisados são as possíveis correções e desenvolvimentos de procedimentos de proteção no sistema, com análises para a duração do curto-circuito. Os apêndices anexados ao trabalho demonstram os gráficos da evolução do curto-circuito em cada situação, sendo observável que em menos de 0,4 segundos a corrente de falta já atinge um valor de regime permanente. Sendo a corrente máxima de curto-circuito um evento que ocorre somente no primeiro ciclo do evento, atenuada a níveis permanentes em apenas 8 ciclos, é interessante observar como seria o comportamento do sistema frente a manobras com seccionadoras.

Destaca-se, também, que o sistema foi reduzido a partir de equivalentes de Thévenin nas barras 2094 e 1232 no *software* ANAFAS. Em razão disso, um transformador Y-Y foi adicionado ao sistema de forma automática pelo programa, gerando uma conexão fictícia entre as barras em questão. Esse tipo de conexão fez com que algumas componentes harmônicas surgissem de forma mais considerável na análise de curto-circuito na barra 9751; contribuições menores foram observadas nos outros ensaios de curto-circuito, não alterando de forma significativa a forma da corrente de curto-circuito.

6.1 Sugestões de trabalhos futuros

De modo a contribuir para futuros trabalhos na área, algumas considerações podem ser feitas para que sejam tecidos novos comentários e análises em relação ao sistema estudado neste trabalho. Alguns pontos a serem observados são:

- i. Em razão de o sistema ter tido seus equivalentes calculados próximos à barra do PEOL em análise, um detalhamento mais minucioso de outras partes do circuito foi perdido. Recomenda-se uma análise de uma porção maior do circuito, com equivalentes mais distantes do PEOL de Lagoa do Quintão;
- ii. A partir do que foi dito anteriormente, verificar impactos na qualidade da energia do sistema é importante, com averiguações para os níveis de tensão e frequência do circuito. Além disso, tendo em vista principalmente a análise da barra 9751, pode ser estudada a propagação de componentes harmônicas no sistema;
- iii. Análise da coordenação de equipamentos de proteção para o sistema, além de verificar meios para reduzir os níveis das correntes de curto-circuito na barra 9751. Ramos (2011) apresenta métodos para atenuar o impacto nos níveis de falta do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARONAVICH, I. M. **Análise de Impactos de Microgeração Eólica em Redes de Baixa Tensão**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, 2019.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2014 – BEN 2014**. Brasília: MME, 2015.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia – Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional 2018 – BEN 2018**. Brasília: MME, 2019.
- BUNDESVERBAND DER ENERGIE UND WASSERWIRTSCHAFT. **Energy Market – Germany**. Relatório Técnico. Berlim, 2019.
- CAMPONOGARA, L. **Análise Estatística da Intermitência Horária de Fontes Renováveis: Um Estudo de Caso do Estado da Bahia**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- CHAVES, S. B. **Análise Estática e Dinâmica de Sistemas de Potência Via Aplicativo Computacional Integrado: *Organon***. 2008. Dissertação de Mestrado (Computação) – Escola de Engenharia e Computação, Universidade Federal Fluminense, 2008.
- CHICCO, G.; MAZZA, A. **100 Years of Symmetrical Componentes**. *Energies*. Jan 2019.
- GROSSI, L.; HEIM, S.; WATERSON, M. A Vision of the European Energy Future? The Impact of the German Response to the Fukushima Earthquake. **Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung**. Discussion Paper No. 14-051. 2014.
- HEYDT, G. T.; VENKATA, S. S.; BALIJEPALLI, N. **High Impact Papers in Power Engineering, 1990-1999**. NAPS – University of Waterloo, Canada. 2000.
- HOWARD, D. **Short-Circuit Currents in Wind Turbine Generator Networks**. 2013. Tese – (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Georgia, Atlanta, USA.
- KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. UFSC – EEL – LABPLAN, 5ª Ed., Florianópolis, SC. 2010.
- MEDEIROS, C. **Curto-Circuitos Trifásicos no Sistema Elétrico**. Material de Apoio. Escola de Engenharia – Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Goiás. 2017.
- MORAIS, A. *et al.* **Estudo de Curto-Circuito no Sistema Elétrico do Rio Grande do Norte com a Presença de Parques Eólicos Usando o Programa ANAFAS**. In: XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, 2014, Belém, PA, Brasil.
- MULJADI, E.; GEVORGIAN, V. Short-Circuit Modeling of a Wind Power Plant. In: IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2011, Detroit, Michigan.
- RAMOS, M. J. S. **Análise das Correntes de Curto-Circuito Assimétricas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2011.
- REIS, V. F. **Análise do Impacto da Geração Eólica em um Sistema de Distribuição de Energia Elétrica**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, 2015.
- RESENER, M. *et al.* **Wind Farm Connection Impacts on Power Distribution Systems: A Case Study**. In: CIRED Workshop, 2012, Lisbon, Portugal.
- RUCKS, G. **Integração de Parques Eólicos ao Sistema Elétrico de Potência: Uma Análise Voltada ao Estudo de Curto-Circuito**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

SALVUCCI, L. A. P. **Estudo da Influência da Geração Eólica na Operação dos Sistemas Elétricos de Potência**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, 2018.

SONG, L. **Transformer Short-Circuit Calculation and Solutions**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – University of Applied Sciences, Alemanha, 2013.

SULLA, F. **Fault Behavior of Wind Turbines**. 2012. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia) – Faculty of Engineering, Lund University, 2012.

THE GUARDIAN. Europe divided over nuclear Power after Fukushima disaster. Seção: News. 2011. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2011/may/25/europe-divided-nuclear-power-fukushima>>. Acesso em: 25 de novembro de 2019.

TORMAM, D. S. **Simulação e Campanha de Medição para Avaliação de Distorção Harmônica da Rede Básica no Acesso de Parques Eólicos**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

WILLIAMS, J; KARLSON, B. **Wind Power Plant Short-Circuit Modeling Guide**. 2012. Sandia Report. Albuquerque, New Mexico, USA and Livermore, California, USA.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Gráficos para eventos de curto-circuito na barra 9751

Figura A.1 – Evolução de corrente de curto-circuito fase-terra com PEOL desconectado e LT conectada.

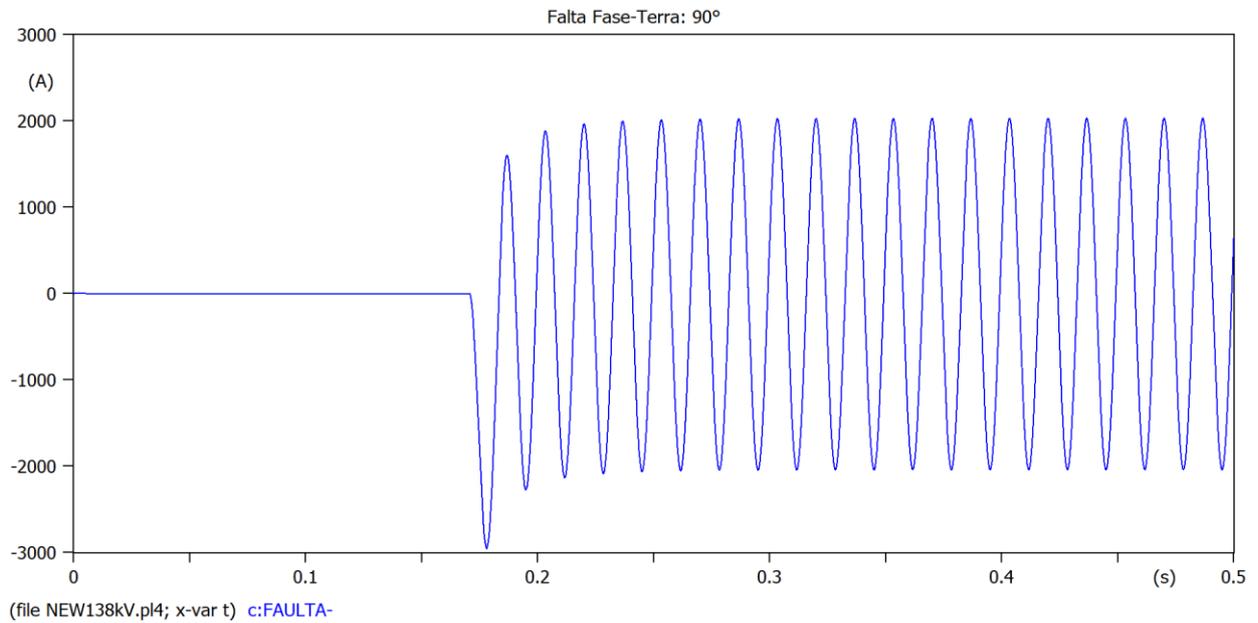


Figura A.2 – Evolução da corrente de curto-circuito trifásico com PEOL desconectado e LT conectada.

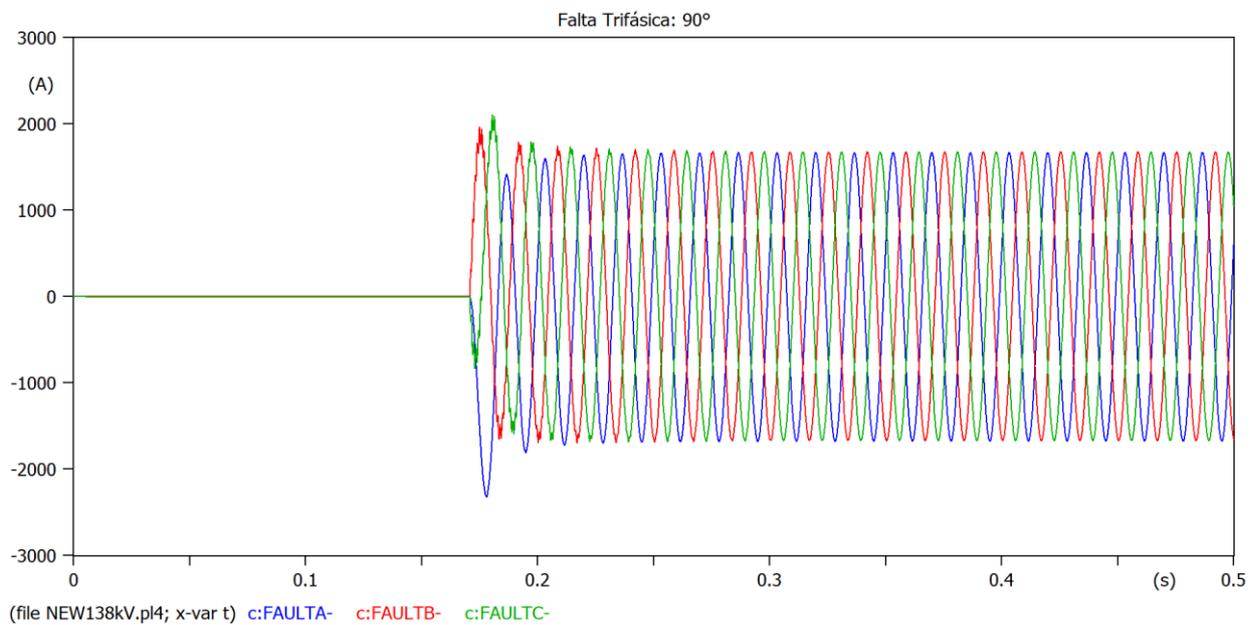


Figura A.3 – Evolução da corrente de curto-circuito fase-terra com PEOL conectado e LT desconectada.

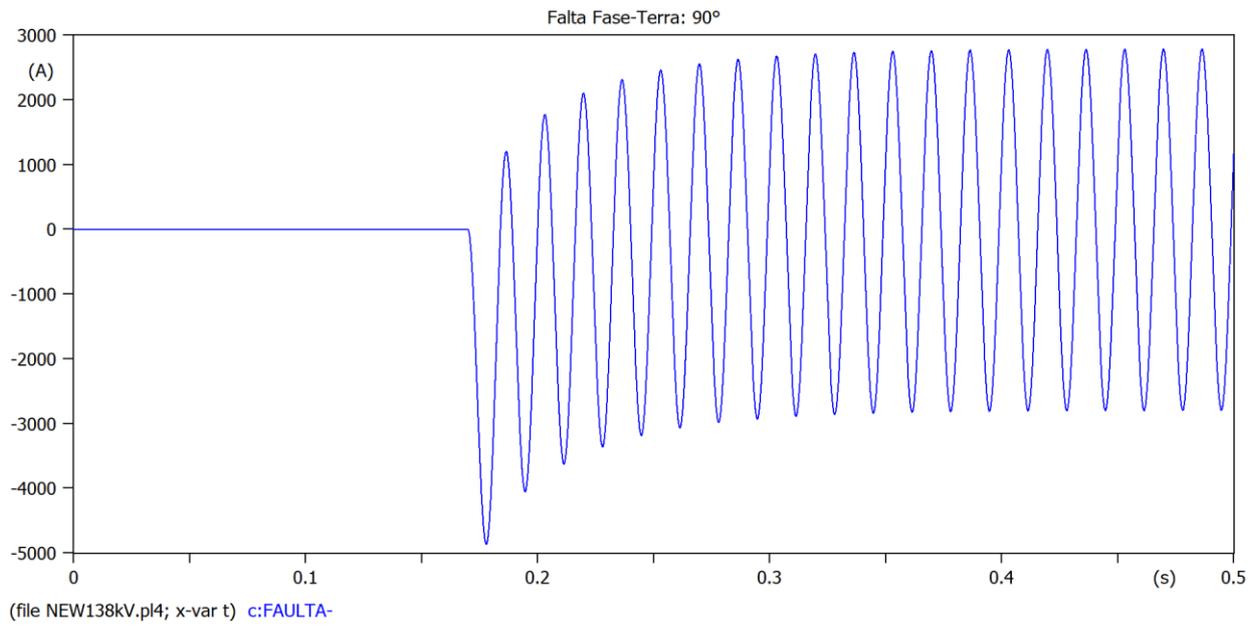


Figura A.4 – Evolução de corrente de curto-circuito trifásico com PEOL conectado e LT desconectada.

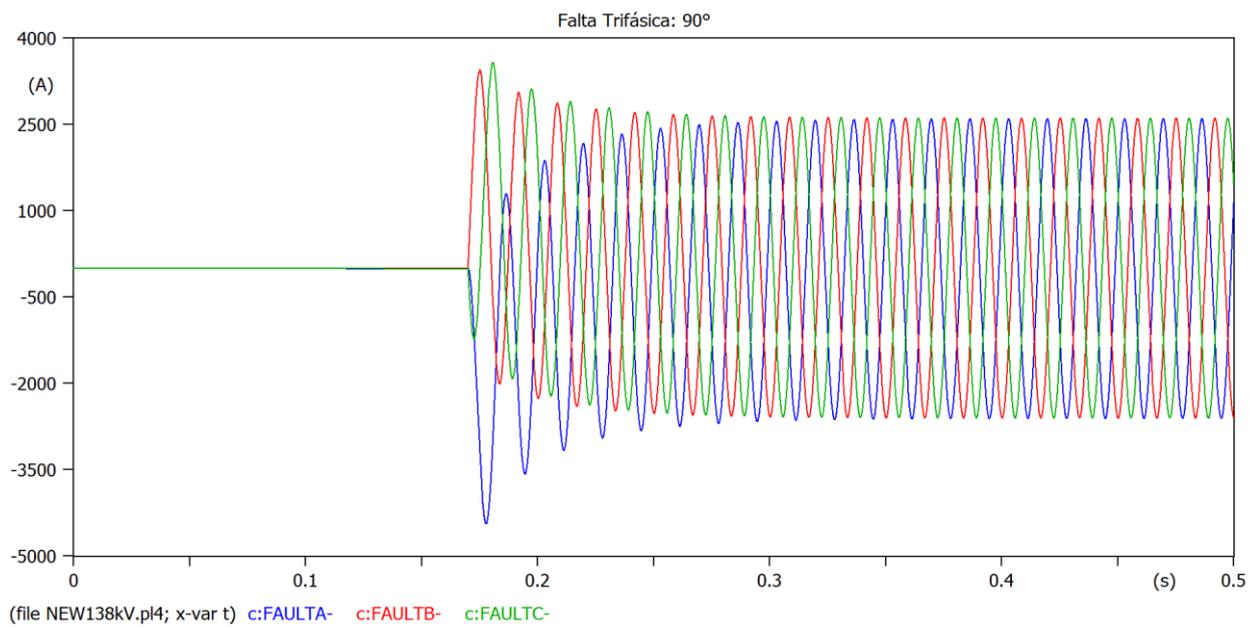


Figura A.5 – Evolução da corrente de curto-circuito fase-terra com PEOL conectado e LT conectada.

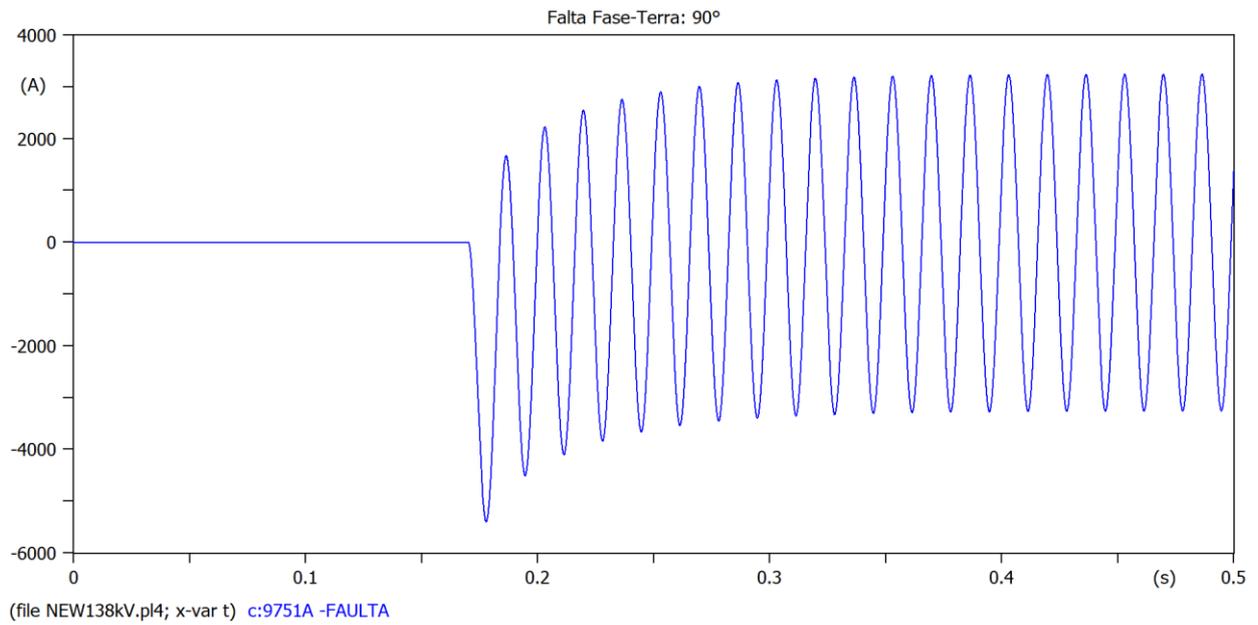
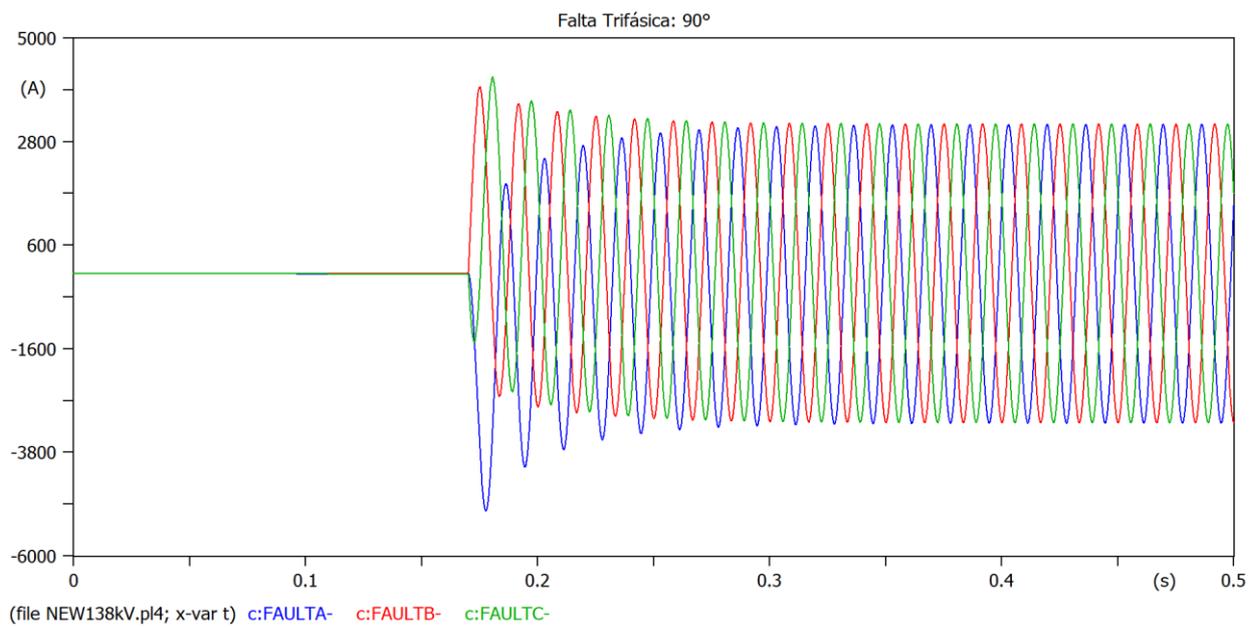


Figura A.6 – Evolução da corrente de curto-circuito trifásico com PEOL conectado e LT conectada.



APÊNDICE B – Gráficos para eventos de curto-circuito na barra 2094

Figura B.1 – Evolução da corrente de curto-circuito fase-terra com PEOL desconectado e LT conectada.

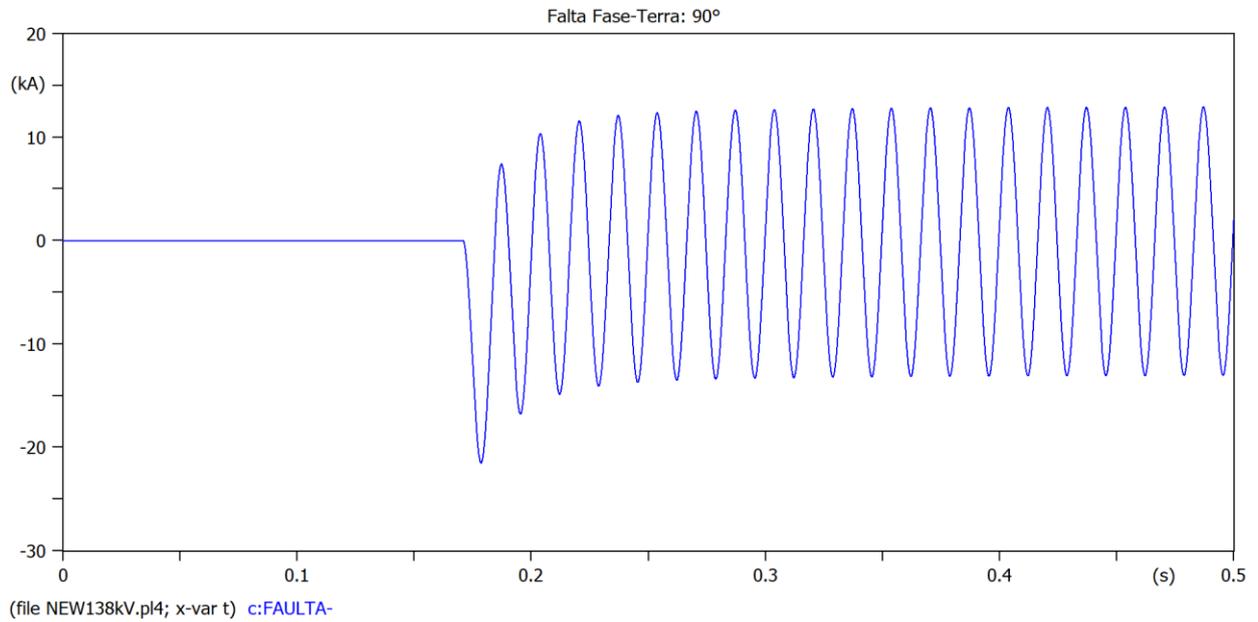


Figura B.2 – Evolução da corrente de curto-circuito trifásico com PEOL desconectado e LT conectada.

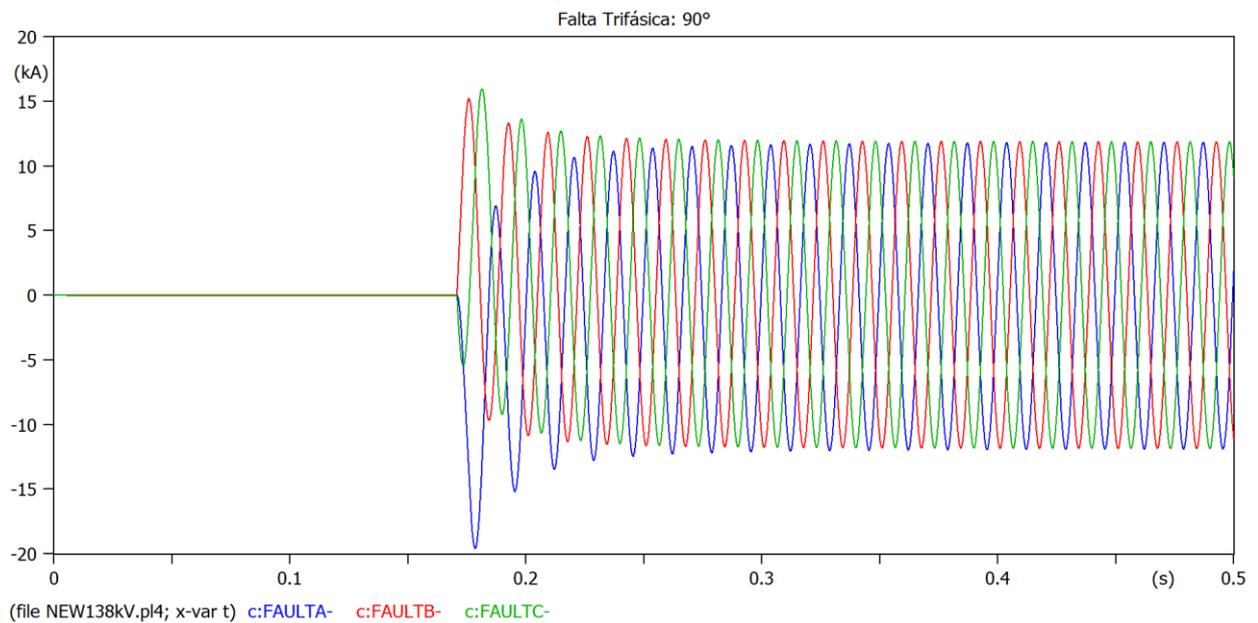


Figura B.3 – Evolução da corrente de curto-circuito fase-terra com PEOL conectado e LT desconectada.

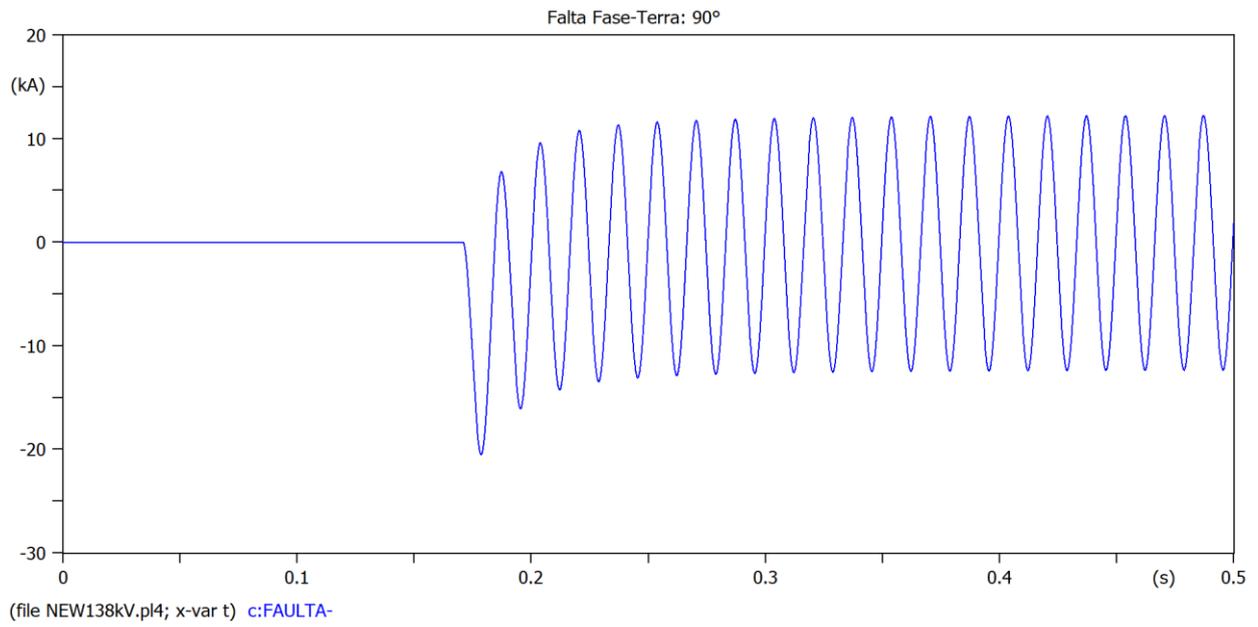


Figura B.4 – Evolução da corrente de curto-circuito trifásico com PEOL conectado e LT desconectada.

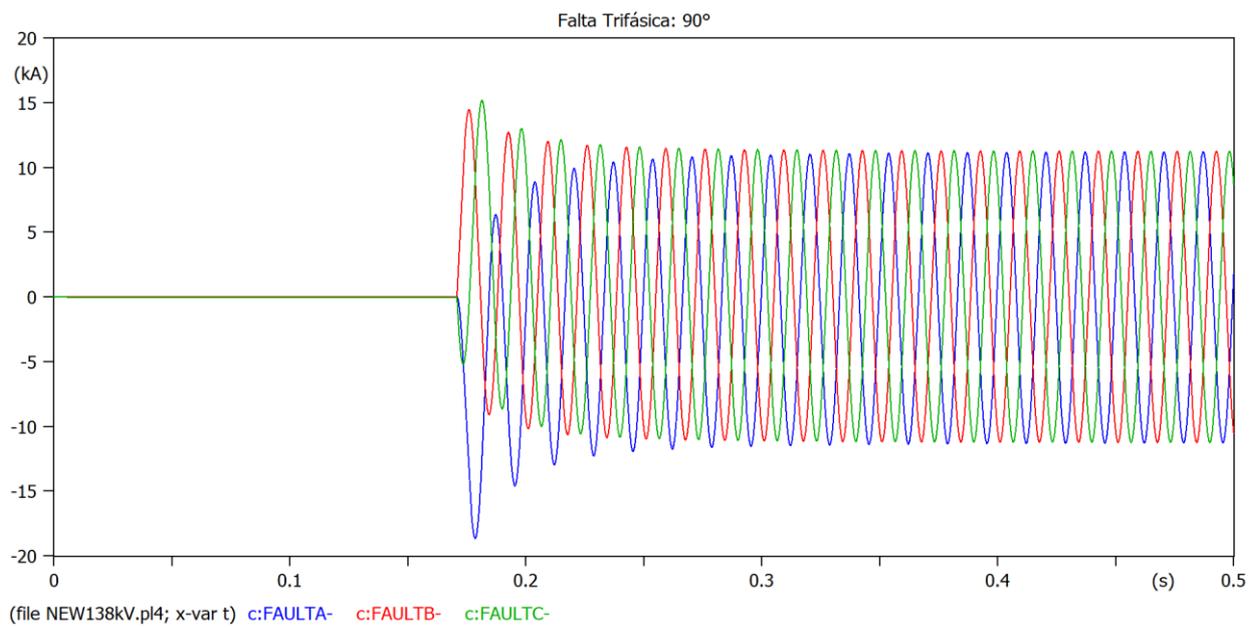


Figura B.5 – Evolução da corrente de curto-circuito fase-terra com PEOL conectado e LT conectada.

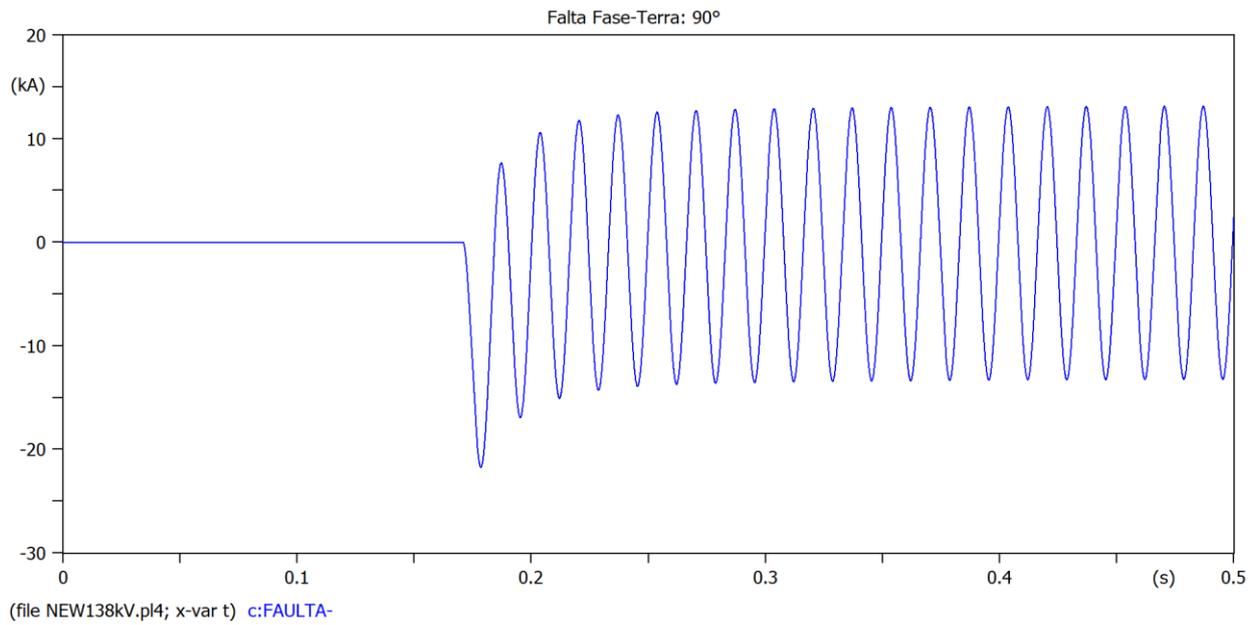
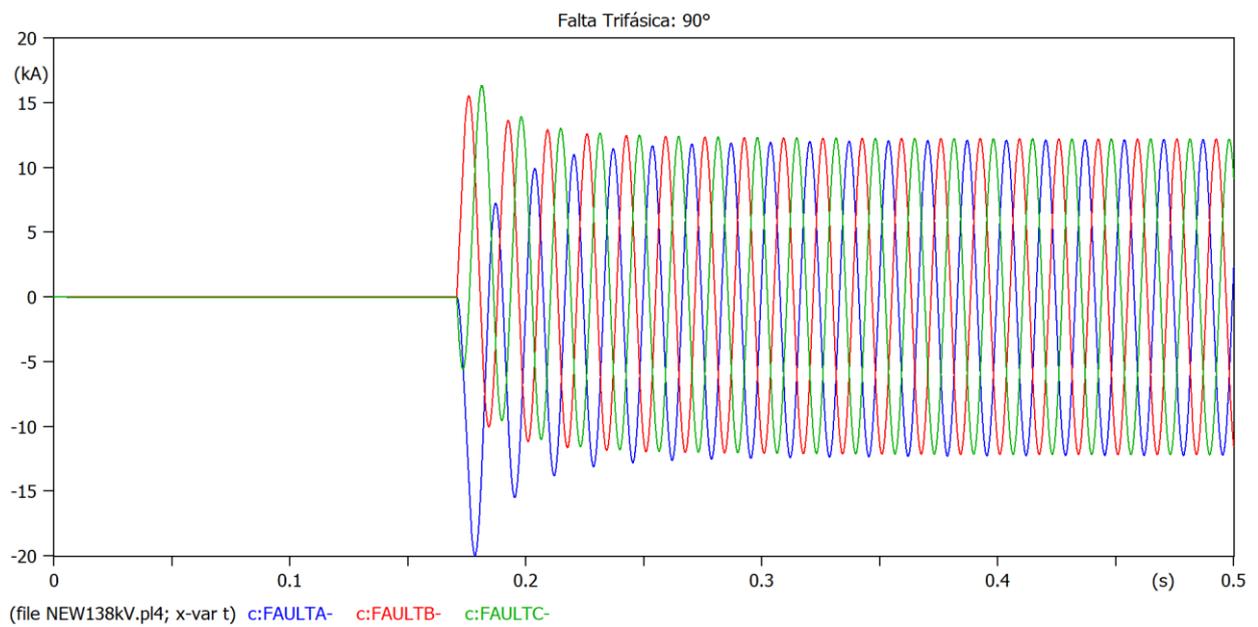


Figura B.6 – Evolução da corrente de curto-circuito trifásico com PEOL conectado e LT conectada.



APÊNDICE C – Gráficos para eventos de curto-circuito na barra 1232

Figura C.1 – Evolução da corrente de curto-circuito fase-terra com PEOL desconectado e LT conectada.

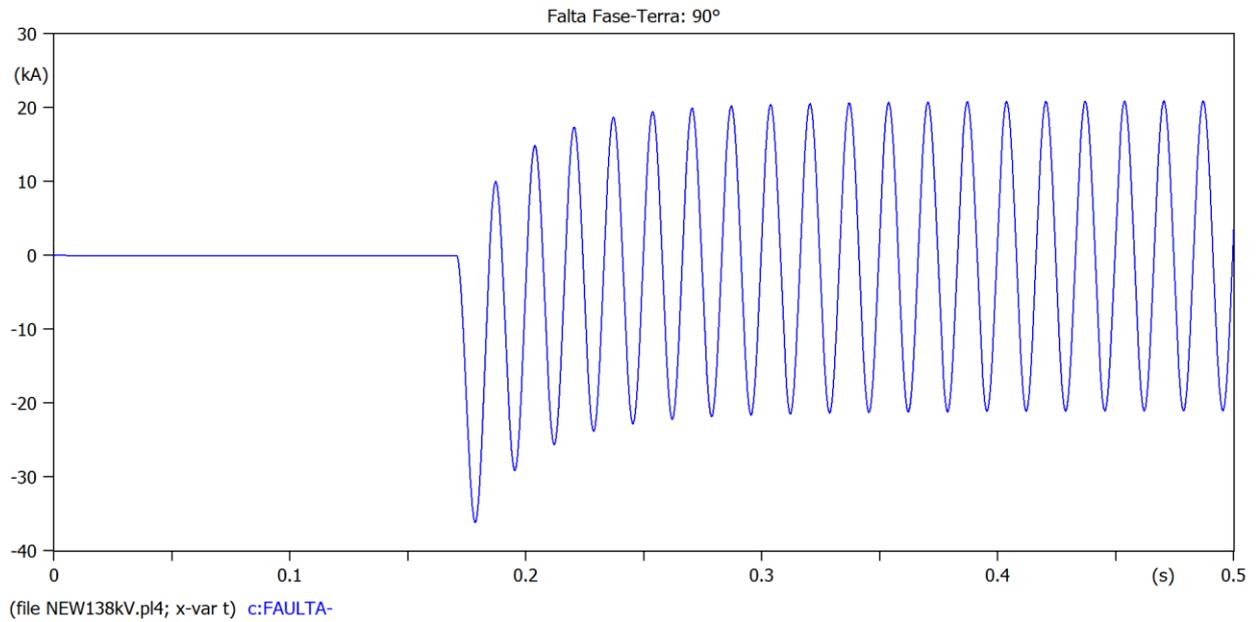


Figura C.2 – Evolução da corrente de curto-circuito trifásico com PEOL desconectado e LT conectada.

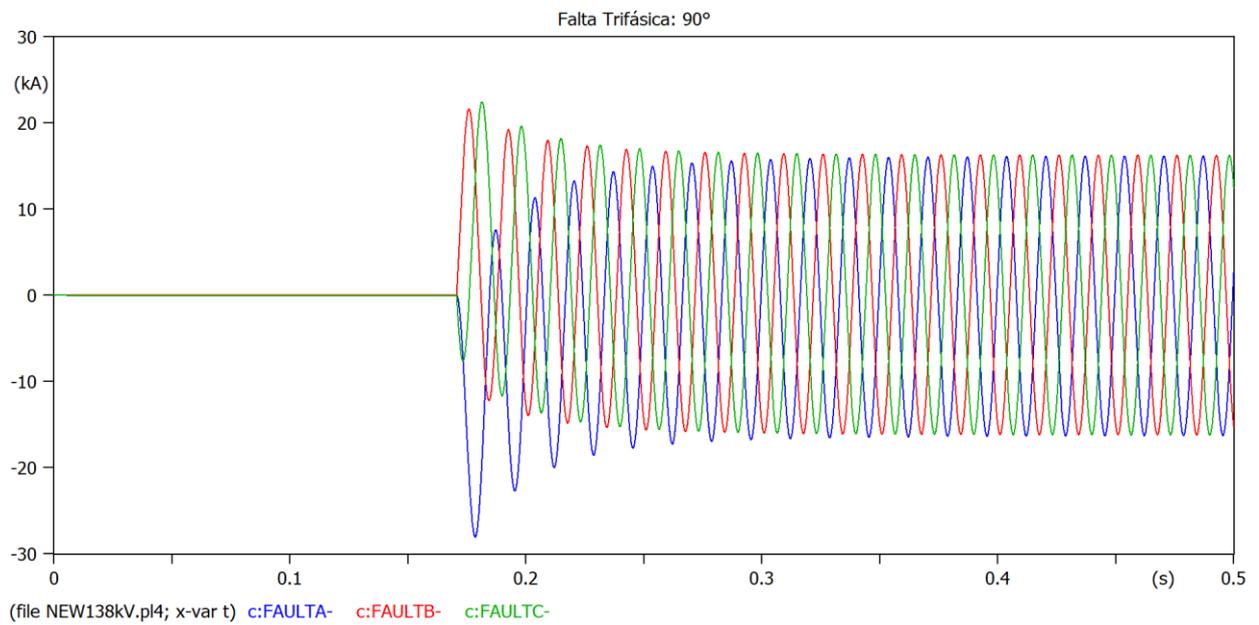


Figura C.3 – Evolução da corrente de curto-circuito fase-terra com PEOL conectado e LT desconectada.

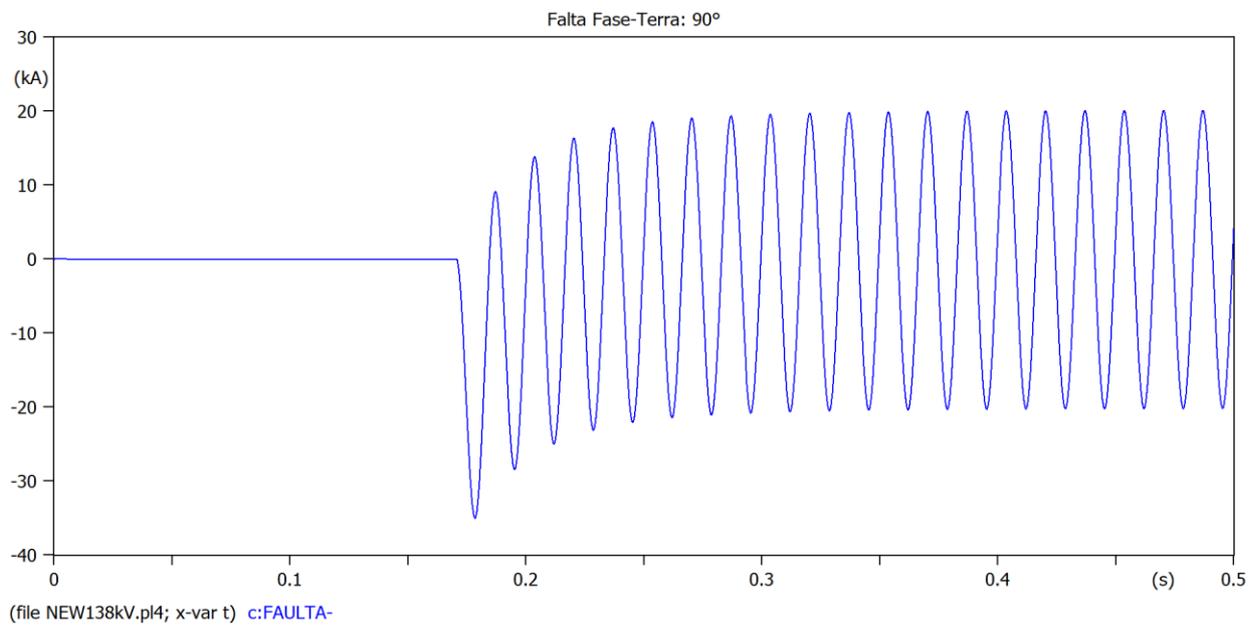


Figura C.4 – Evolução da corrente de curto-circuito trifásico com PEOL conectado e LT desconectada.

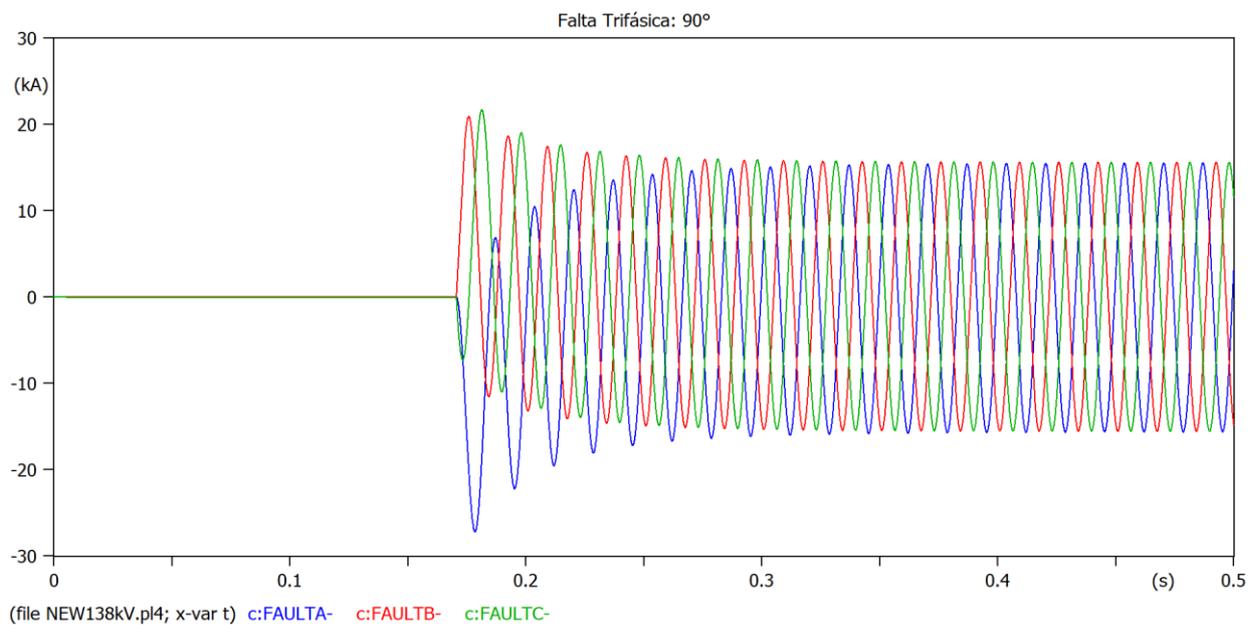


Figura C.5 – Evolução da corrente de curto-circuito fase-terra com PEOL conectado e LT conectada.

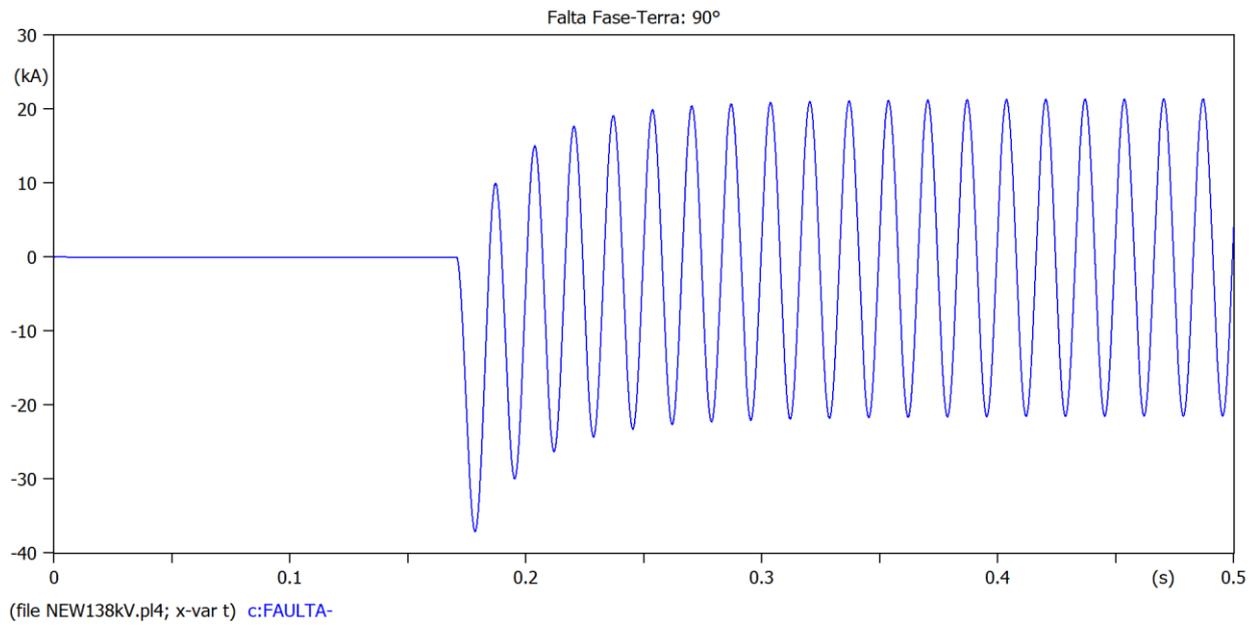


Figura C.6 – Evolução da corrente de curto-circuito trifásico com PEOL conectado e LT conectada.

